



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER PLAN DE NEGOCIO PARA ACTUALIZAR UN PROYECTO PREVIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Candela Arias Sitges
Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Plan de negocio para actualizar un proyecto previo de eficiencia energética
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Candela Arias Sitges

Fecha: 19/ 08/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Iñigo Sanz Fernández

Fecha://

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PLAN DE NEGOCIO PARA ACTUALIZAR UN
PROYECTO PREVIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Candela Arias Sitges

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

PLAN DE NEGOCIO PARA ACTUALIZAR UN PROYECTO PREVIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Arias Sitges, Candela.

Director: Sanz Fernández, Iñigo.

Entidad Colaboradora: ICAI– Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo evalúa la viabilidad técnica y económica de integrar en una vivienda unifamiliar un sistema de ventilación con recuperación de calor, una batería de post-tratamiento y una bomba de calor aerotérmica aire-agua. Partiendo de un proyecto previo en el que se calcularon las pérdidas térmicas y se estudiaron alternativas de mejora, este estudio se centra en el diseño e integración de dichas medidas para reducir la demanda térmica y el consumo energético. Los resultados muestran importantes ahorros en calefacción y ACS, con indicadores económicos (VAN, TIR, ROI) que confirman la rentabilidad de la solución, amortizable en menos de seis años.

Palabras clave: Eficiencia energética, recuperador de calor, aerotermia

- **Introducción**

Se interviene en una vivienda unifamiliar existente que inicialmente tenía una demanda anual de calefacción de 37.987 kWh/año y de ACS de 7.519 kWh/año. Dicha casa contaba con un sistema de calefacción convencional (caldera de gasóleo-C) y ventilación natural por ventanas. El proyecto propone implantar: (i) una unidad de ventilación mecánica de doble flujo con recuperador de calor (Aldes InspirAIR Side 240 Classic Modbus, caudal nominal 240 m³/h) que extrae el aire viciado de baños/cocina y suministra aire filtrado a las estancias secas; (ii) una batería hidrónica de post-tratamiento (intercambiador agua-aire de aletas, colocado en el conducto de impulsión) que ajusta la temperatura del aire impulsado; y (iii) una bomba de calor aerotérmica aire-agua (Vaillant aroTHERM Plus 15 split con unidad interior uniTOWER de 185 L) para generar agua caliente para la calefacción, ACS y alimentar la batería. El objetivo es cumplir con las necesidades térmicas de la vivienda (20°C interior) minimizando el consumo de energía primaria.

- **Descripción del sistema**

Recuperador de calor (Aldes InspirAIR Side 240 Classic): Es una unidad horizontal de doble flujo con motor EC de alta eficiencia. Tiene un caudal máximo de 240 m³/h, dos ventiladores centrífugos (impulsión y extracción), filtros en ambas corrientes y un intercambiador térmico estático contraflujo (placas de polímero) de alta eficacia. Bajo condiciones de diseño extremas (-1,5°C exterior), eleva el aire exterior hasta 17,8°C (eficiencia de 90%), cubriendo así la mayor parte del salto térmico necesario. La eficiencia estacional del recuperador permite reducir las pérdidas por ventilación en 80% (de 33.188 a 6.638 kWh/año) y las pérdidas totales en un 43% aproximadamente. En resumen, el recuperador suministra aire limpio y pre-templado a la vivienda, mejorando el confort y reduciendo la demanda de calefacción. Para validar su integración en la vivienda, se han calculado las pérdidas de carga en los circuitos de impulsión y extracción, así como la selección de conductos y rejillas, comprobando que el equipo opera dentro de su curva característica y con un nivel sonoro adecuado según normativa.

Batería hidrónica de post-tratamiento: Se trata de un intercambiador aire-agua con aletas (cobre-aluminio) diseñado para el caudal de 54 L/s (equivalente a 194 m³/h de ventilación). Se ubica en el conducto principal de impulsión, justo después del recuperador. El circuito hidráulico de esta batería se conecta al circuito de calefacción de la vivienda, alimentado por la bomba de calor. Cuando se requiere aumentar la temperatura del aire de impulsión (por temperaturas exteriores muy bajas), la bomba de calor introduce agua caliente a 35°C en la batería, aportando hasta 420 W térmicos (considerando una eficacia del 70% en el intercambiador) para elevar el aire impulsado otros 6,45°C. Las tuberías de ida/retorno hacia la batería se conectan antes del distribuidor de calefacción, con una válvula de control modulante (2 vías, Siemens VD115CLC) que regula el caudal de agua según la demanda. Se instalan también válvulas de equilibrado, de corte y purgadores automáticos. Así, la batería actúa como un emisor más del sistema de calefacción, completando el precalentamiento del aire renovado.

Bomba de calor aerotérmica (Vaillant aroTHERM Plus 15): Se ha seleccionado un equipo aire-agua split con refrigerante R290, unidad exterior y unidad interior hidráulica integrada. Este modelo proporciona hasta 15 kW de potencia (18,1 kW @A7/W35), cubriendo con margen la potencia de diseño (14,4 kW). Soporta impulsión de agua hasta 75°C sin resistencias eléctricas, por lo que puede reutilizar radiadores existentes. A baja temperatura de impulsión (35–50°C) y un clima medio, alcanza un SCOP de 4,74. Para ACS, ensayado bajo norma EN16147 (perfil XL), tiene COP medio de 3,76. La unidad interior tipo uniTOWER incluye un acumulador de ACS de 185 L que puede entregar 370 L de agua a 40°C. Y se propone instalar un depósito de inercia de 140 L. El COP estacional a A7/W35 es 5,38, lo que hace muy bajo el aporte eléctrico adicional. El nivel sonoro de la unidad exterior es 43 dB(A) a 3 m, adecuado para residencias. Adicionalmente, se ha realizado el dimensionamiento eléctrico del equipo, calculando la intensidad absorbida y la sección de conductores conforme al REBT y la ITC-BT-19, así como las protecciones magnetotérmicas y diferenciales necesarias para garantizar la seguridad y cumplimiento normativo.

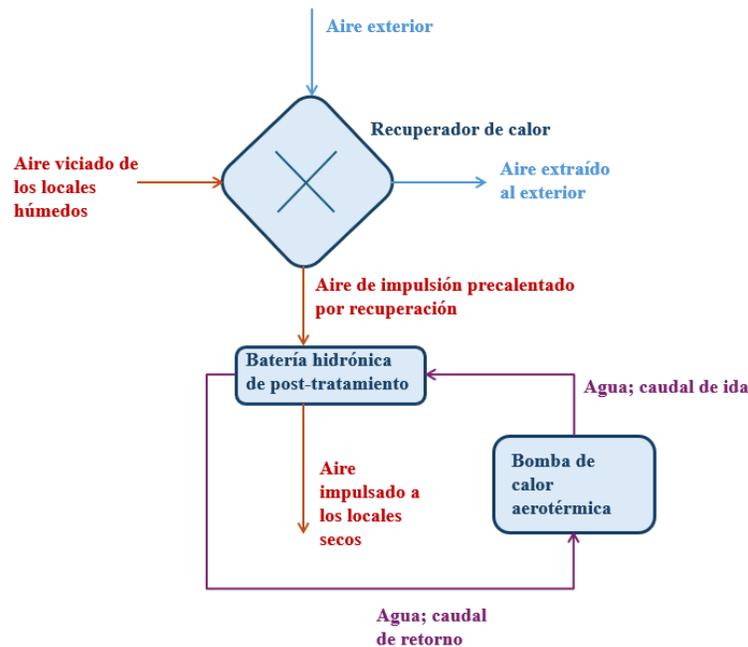


Figura 1 Esquema del sistema propuesto

Control y regulación: La temperatura del aire en impulsión se mide mediante un sensor situado después de la batería hidrónica. Un controlador automático (PI) compara la lectura con la consigna deseada (20°C) y actúa sobre la válvula modulante de agua (0–10 V) para regular el flujo caliente. En condiciones de mucho frío la válvula abre más, y en condiciones templadas casi cierra. Este control proporcional evita oscilaciones y garantiza la temperatura requerida. De este modo, el sistema integra de forma coordinada el recuperador, la batería y la bomba de calor, optimizando el uso de energía térmica.

- **Resultados energéticos y económicos**

La integración del sistema de ventilación con recuperación de calor y de la bomba de calor aerotérmica muestra una notable mejora en la eficiencia energética de la vivienda analizada. En términos de consumo, se pasa de un escenario inicial con 60.595 kWh/año (aproximadamente 6.059 €) a una situación optimizada con 7.973 kWh eléctricos/año (aproximadamente 2.392 €), lo que representa un ahorro neto de 3.667 € anuales y una disminución de aproximadamente el 60 % del gasto energético.

CONSUMO TOTAL ACTUAL		Consumo KWh	Consumo (€)	CONSUMO TOTAL PROPUESTA			
Calefacción		48390,598	4839,05	Calefacción	Demanda KWh	Consumo KWh	Consumo (€)
ACS		12204,302	1220,43	ACS	37986,62	4555,18	1.366,55
				Electricidad Adicional	7518,53	1999,60904	599,88
						1418,47764	425,54
						7,973	2,392
		60.595	6.059				

Figura 2 Comparativa del consumo energético anual actual frente a la propuesta integrada

Desde el punto de vista económico, la inversión inicial de 18.887 € queda amortizada en un periodo de algo más de cinco años, tras lo cual el sistema comienza a generar beneficios netos. Los indicadores financieros refuerzan esta conclusión: el Valor Actual Neto (VAN) alcanza unos 25.900 € y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se sitúa en torno al 17 %, valores claramente superiores a los de inversiones convencionales.

Estos resultados ponen de manifiesto no solo la viabilidad técnica de la solución, sino también su atractivo económico a medio y largo plazo, demostrando que la estrategia propuesta combina eficiencia energética, confort interior y rentabilidad financiera.

<i>Análisis de sensibilidad VAN</i>					
Coste de la energía					
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48
47.286 €	36.584 €	30.162 €	25.881 €	17.319 €	6.617 €

<i>Análisis de sensibilidad TIR</i>					
Coste de la energía					
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48
25,7%	21,4%	18,7%	17,0%	13,3%	8,4%

Figura 3 Análisis de sensibilidad del VAN y del TIR en función del precio de la energía

Los cálculos anteriores se han realizado con un precio de referencia de 0,30 €/kWh. Sin embargo, se muestra un análisis de sensibilidad para un rango de precios entre 0,10 €/kWh y 0,48 €/kWh. Se observa que, incluso en escenarios de bajo coste de la energía, el proyecto mantiene un VAN positivo y una TIR superior al 8 %, confirmando su viabilidad. En escenarios de mayor precio, la rentabilidad aumenta de forma significativa.

- **Conclusiones**

En conjunto, el diseño desarrollado demuestra la viabilidad técnica y normativa de la solución integrada. El recuperador de calor, respaldado por el cálculo de pérdidas de carga y la adecuada selección de difusores, garantiza una ventilación eficiente y silenciosa con reducción significativa de la demanda térmica. La bomba de calor aerotérmica, dimensionada a partir de los cálculos hidráulicos y eléctricos, asegura un aporte renovable fiable y compatible con la instalación existente. La batería de post-tratamiento complementa la estrategia, manteniendo el confort en condiciones extremas. Los análisis realizados —hidráulicos, aerodinámicos y eléctricos— confirman que el sistema puede implementarse de forma práctica, segura y conforme a normativa, integrando eficiencia energética, confort y rentabilidad económica en una única propuesta coherente.

- **Referencias**

TFG. (s. f.). Trabajo de Fin de Grado: Estudio técnico-económico de instalación de autoconsumo solar.

<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/76864/1/TFGAriasSitges%2CCandela.pdf>

Aldes. (2023). InspirAIR Side 240 Classic – Ficha técnica (Ref. 11023310). Recuperado de https://assets.aldes.es/assets/productRefDocs/Aldes_ES_pdf_v2/ES-Espana-Aldes-InspirAIR-Side-240-Classic-Derecha-11023310.pdf

Vaillant. (s.f.). Bomba de calor Vaillant aroTHERM plus – Catálogo técnico. Congreso Edificios Energía Casi Nula. Recuperado de <https://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/wp-content/uploads/VAILLANT-aroTHERM-plus.pdf>

Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002). Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias ITC-BT 01 a 51 (Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto). Boletín Oficial del Estado, núm. 224, de 18 de septiembre de 2002, páginas 34397 a 34528. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/08/02/842/con>

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2002). Instrucción técnica complementaria ITC-BT-47. Instalaciones generadoras de baja tensión [PDF]. https://direct-electro.es/files/reglamentobajatension/ITC_BT_47.pdf

IDAE & AFEC. (2023). La bomba de calor en la rehabilitación energética de edificios: Guía 25. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/Guias_IDAE_La_Bomba_de_calor_2023_V11.pdf

BUSINESS PLAN FOR IMPLEMENTING A PREVIOUS ENERGY EFFICIENCY PROJECT

Author: Arias Sitges, Candela.

Supervisor: Sanz Fernández, Iñigo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work evaluates the technical and economic feasibility of integrating a heat recovery ventilation system, a post-treatment coil, and an air-to-water aérothermal heat pump into a single-family house. Building on a previous project in which thermal losses were calculated and improvement alternatives studied, this study focuses on the design and integration of these measures to reduce thermal demand and energy consumption. The results show significant savings in heating and domestic hot water (DHW), with economic indicators (NPV, IRR, ROI) confirming the profitability of the solution, which can be amortized in less than six years.

Keywords: Energy efficiency, heat recovery unit, aérothermal heat pump

- **Introduction**

The intervention is carried out in an existing single-family dwelling that initially had an annual heating demand of 37,987 kWh/year and a DHW demand of 7,519 kWh/year. The house was originally equipped with a conventional heating system (fuel oil boiler) and natural ventilation through windows. The project proposes to implement: (i) a mechanical double-flow ventilation unit with heat recovery (Aldes InspirAIR Side 240 Classic Modbus, nominal flow 240 m³/h), extracting stale air from bathrooms/kitchen and supplying filtered air to dry rooms; (ii) a hydronic post-treatment coil (finned water-air heat exchanger, installed in the supply duct) to adjust supply air temperature; and (iii) an air-to-water aérothermal heat pump (Vaillant aroTHERM Plus 15 split with uniTOWER indoor unit, 185 L) to provide hot water for heating, DHW, and the coil.

The objective is to meet the thermal needs of the dwelling (20 °C indoor setpoint) while minimizing primary energy consumption.

- **System description**

Heat Recovery Ventilator (Aldes InspirAIR Side 240 Classic): This is a horizontal double-flow unit with a high-efficiency EC motor. It has a maximum airflow of 240 m³/h, two centrifugal fans (supply and extract), filters in both streams, and a static counterflow polymer plate heat exchanger with high effectiveness. Under extreme design conditions (−1.5 °C outdoor), it raises the outdoor air temperature to 17.8 °C (90% efficiency), covering most of the required temperature lift. Its seasonal efficiency reduces ventilation losses by 80% (from 33,188 to 6,638 kWh/year) and total thermal losses by approximately 43%. In summary, the unit supplies clean, preheated air to the dwelling, improving comfort and reducing heating demand. To validate its integration, pressure losses in supply and extract circuits were calculated, ducts and diffusers were selected, and operation within the manufacturer’s fan curve was confirmed, with sound levels compliant with residential standards.

Hydronic Post-Treatment Coil: This finned copper-aluminium air-water exchanger is designed for a 54 L/s flow (≈194 m³/h ventilation). It is located in the main supply duct, downstream of the HRV. Hydraulically connected to the heating circuit powered by the heat pump, it supplies hot water at 35 °C when additional heating of the supply air is required. The coil provides up to 420 W of thermal output (70% exchanger efficiency), raising supply air temperature by approximately 6.45 °C. A modulating 2-way control valve (Siemens VD115CLC) regulates water flow according to demand, supported by balancing valves, shut-off valves, and automatic air vents. Thus, the coil operates as an additional emitter within the heating system, ensuring comfort in very cold outdoor conditions.

Air-to-Water Heat Pump (Vaillant aroTHERM Plus 15): The selected R290 split unit consists of an outdoor unit and a fully integrated indoor hydraulic unit. It delivers up to 15 kW (18.1 kW @A7/W35), exceeding the design load of 14.4 kW. It supports water temperatures up to 75 °C without electric backup, allowing reuse of existing radiators. At low supply temperatures (35–50 °C) in a temperate climate, it reaches a SCOP of 4.74. For DHW, tested under EN16147 (XL profile), the average COP is 3.76. The uniTOWER includes a 185 L DHW tank capable of delivering 370 L of 40 °C water, complemented by a proposed 140 L buffer tank. The seasonal COP at A7/W35 is 5.38, minimizing electricity consumption. Sound pressure level is 43 dB(A) at 3 m, suitable for residential use. Additionally, electrical design was carried out:

absorbed current and cable sizing according to REBT and ITC-BT-19, as well as protective devices (circuit breakers, residual current devices), were calculated to ensure safe and compliant installation.

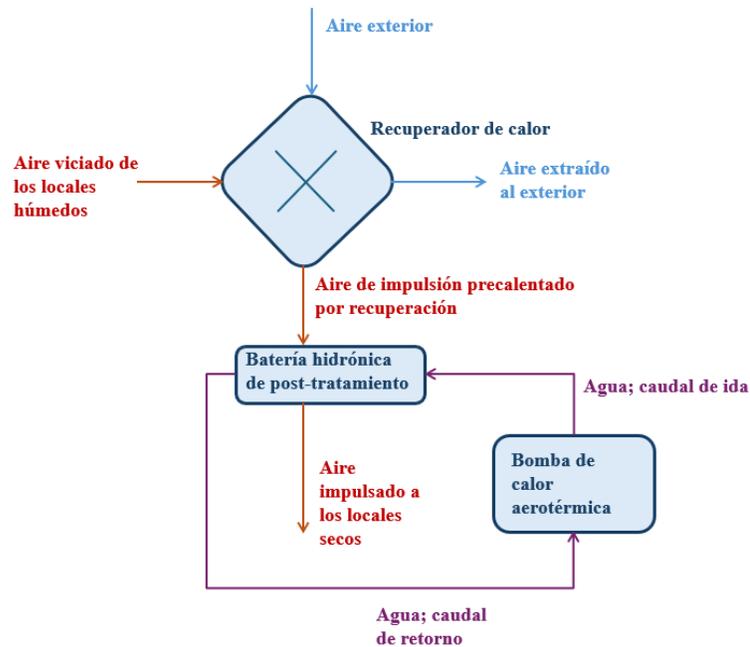


Figure 1 Schema of the proposed system

Control and Regulation: The supply air temperature is measured by a sensor located after the coil. A PI controller compares the reading with the 20 °C setpoint and modulates the control valve (0–10 V). In cold weather, the valve opens more; in mild conditions, it nearly closes. This proportional control prevents oscillations and ensures stable indoor comfort. Overall, the HRV, coil, and heat pump operate in coordination, optimizing thermal energy use.

- **Energy and economic results**

The integration of the HRV system and aerothermal heat pump leads to significant improvements in household energy efficiency. Total energy consumption decreases from 60,595 kWh/year (around €6,059) to 7,973 kWh electricity/year (around €2,392), resulting in annual net savings of €3,667 and a reduction of about 60% in energy expenditure.

CONSUMO TOTAL ACTUAL	Consumo KWh	Consumo (€)	CONSUMO TOTAL PROPUESTA	Demanda KWh	Consumo KWh	Consumo (€)
Calefacción	48390,598	4839,05	Calefacción	37986,62	4555,18	1.366,55
ACS	12204,302	1220,43	ACS	7518,53	1999,60904	599,88
			Electricidad Adicional		1418,47764	425,54
	60.595	6.059			7.973	2.392

Figure 2 Comparison of the actual annual energy consumption versus the integrated proposal

From an economic perspective, the initial investment of €18,887 is recovered in just over five years, after which the system generates net financial benefits. Financial indicators reinforce this conclusion: Net Present Value (NPV) of approximately €25,900 and Internal Rate of Return (IRR) of around 17%, both well above typical conventional investments.

These results highlight not only the technical feasibility but also the economic attractiveness of the solution in the medium and long term, demonstrating that the proposed strategy successfully combines energy efficiency, indoor comfort, and financial profitability.

<i>Análisis de sensibilidad VAN</i>						
Coste de la energía						
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48	
47.286 €	36.584 €	30.162 €	25.881 €	17.319 €	6.617 €	

<i>Análisis de sensibilidad IIR</i>						
Coste de la energía						
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48	
25,7%	21,4%	18,7%	17,0%	13,3%	8,4%	

Figure 3 Sensitivity analysis of NPV and IRR based on the energy price

Previous calculations assumed an energy price of €0.30/kWh. However, a sensitivity analysis was performed for a range of €0.10–0.48/kWh. The results show that even under low energy cost scenarios, the project maintains a positive NPV and an IRR above 8%, confirming its robustness. At higher prices, profitability increases significantly.

- **Conclusions**

Overall, the proposed design demonstrates the technical feasibility and regulatory compliance of the integrated solution. The heat recovery unit, supported by the pressure drop calculations and the careful selection of diffusers, ensures efficient and quiet ventilation while significantly reducing heating demand. The air-to-water heat pump, dimensioned through detailed hydraulic and electrical calculations, provides a reliable renewable energy contribution that remains compatible with the existing installation. The post-treatment coil complements the strategy by maintaining indoor comfort under extreme outdoor conditions. The analyses performed—hydraulic, aerodynamic, and electrical—confirm that the system can be implemented in a practical, safe, and regulation-compliant manner, combining energy efficiency, thermal comfort, and long-term economic profitability into a single coherent proposal.

- **References**

Aldes. (2023). *InspirAIR Side 240 Classic – Technical datasheet (Ref. 11023310)*. Retrieved from https://assets.aldes.es/assets/productRefDocs/Aldes_ES_pdf_v2/ES-Espana-Aldes-InspirAIR-Side-240-Classic-Derecha-11023310.pdf

Vaillant. (n.d.). *Vaillant aroTHERM plus heat pump – Technical catalog*. Nearly Zero-Energy Buildings Congress. Retrieved from <https://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/wp-content/uploads/VAILLANT-aroTHERM-plus.pdf>

Ministry of Science and Technology. (2002). *Low Voltage Electrotechnical Regulation and complementary technical instructions ITC-BT 01 to 51 (Royal Decree 842/2002, of August 2)*. Official State Gazette, No. 224, September 18, 2002, pp. 34397–34528. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/08/02/842/con>

Ministry of Industry, Tourism and Trade. (2002). *Complementary technical instruction ITC-BT-47. Low-voltage generating installations* [PDF]. https://direct-electro.es/files/reglamentobajatension/ITC_BT_47.pdf

IDAE & AFEC. (2023). *The heat pump in building energy renovation: Guide 25*. Institute for Energy Diversification and Saving. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/Guias_IDAE_La_Bomba_de_calor_2023_V11.pdf

TFG. (n.d.). *Bachelor's Thesis: Technical-economic study of a solar self-consumption installation*. <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/76864/1/TFGAriasSitges%2CCandela.pdf>



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PLAN DE NEGOCIO PARA ACTUALIZAR UN PROYECTO PREVIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Candela Arias Sitges

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción	23
Capítulo 2. Motivación	26
Capítulo 3. Objetivos del proyecto	28
3.1 Objetivos particulares	28
3.2 Objetivos generales	29
Capítulo 4. Metodología	31
Capítulo 5. Estado de la cuestión.....	33
5.1 Bomba de calor aerotérmica	33
5.1.1 Principio de funcionamiento	33
5.1.2 Componentes principales del sistema.....	35
5.1.3 Tipo de bombas de calor aerotérmicas	37
5.1.4 Comparación entre los servicios que pueden ofrecer	40
5.1.5 Tecnología inverter y otras características.....	41
5.1.6 Ventajas y desventajas de la aerotermia.....	42
5.2 Recuperador de calor	46
5.2.1 Principio de funcionamiento	46
5.2.2 Componentes principales del sistema.....	48
5.2.3 Tipos de recuperadores de calor.....	50
5.2.4 Integración con la batería de post-tratamiento.....	52
5.2.5 Ventajas y desventajas del sistema.....	53
Capítulo 6. Diseño del sistema de ventilación con recuperador de calor.....	56
6.1 Introducción y justificación normativa.....	56
6.2 Cálculo de los caudales de ventilación según CTE DB HS3	58

6.3 Selección del recuperador de calor y rendimiento esperado	60
6.4 Presión estática disponible e importancia en la red.....	62
6.5 Planos de distribución de conductos y cálculo de pérdidas de carga	63
6.6 Selección y características de los conductos	69
6.7 Curva de funcionamiento del recuperador Aldes 240	70
6.8 Distribución de bocas de impulsión y extracción	73
6.10 Recomendaciones finales	75
Capítulo 7. Diseño del sistema de calefacción y ACS con bomba de calor aerotérmica	76
7.1 Situación inicial de la vivienda.....	76
7.2 Potencia de diseño para condiciones extremas.....	77
7.3 Comprobación de conexión entre circuito primario y elementos terminales.....	79
7.4 Selección del sistema de bomba de calor.....	81
7.5 Comprobación de potencia y adaptación de los radiadores existentes	84
7.6 Comprobación del depósito de ACS.....	86
7.7 Instalación eléctrica	90
Capítulo 8. Integración del recuperador Aldes InspirAIR Side 240 Classic con batería hidrónica de pos-tratamiento y bomba de calor Vaillant aroTHERM Plus 15	95
8.1 Introducción y justificación de la integración	95
8.2 Diseño del sistema hidráulico.....	97
8.3 Diseño de las características de la batería de post-tratamiento.....	100
8.4 Selección de componentes de la batería de post-tratamiento	101
8.4.1 Simulación del control PI	103
Capítulo 9. Estudio de viabilidad y rentabilidad	108
Capítulo 10. Conclusiones y acciones futuras	117
Referencias.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tabla resumen de las propuestas y elección final	24
Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible	30
Figura 3 Metodología de trabajo.....	32
Figura 4. Aerotermia vs Caldera tradicional.....	33
Figura 5. Representacion del funcionamiento de una bomba de caloeer aerotermica.....	35
Figura 6. Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor aerotermica	35
Figura 7. Diferencia entre sistema monobloc y bibloc	39
Figura 8. Esquema sistema de ventilación de una vivienda.....	47
Figura 9. Tipos de recuperadores de calor	51
Figura 10 Esquema de funcionamiento de recuperador de calor	57
Figura 11 Modelo seleccionado de recuperador de calor	60
Figura 12 Red de conductos Planta de Abajo	64
Figura 13 Red de conductos Planta de Arriba	64
Figura 14 Cálculo de pérdida de carga de la red de conducto	66
Figura 15 Curva de funcionamiento Aldes 240	70
Figura 16 Características de SDRF-2	73
Figura 17 Características SDRF-4	74
Figura 18 Diagrama psicométrico.....	77
Figura 19 Porcentaje sobre la potencia total de diseño.....	78
Figura 20 Esquema de una instalación de una bomba de calor con conexión directa	80
Figura 21 Curva de potencia térmica del radiador EUROPA 600 C	84
Figura 22 Depósito acumulador de ACS	87
Figura 23 Tabla de volúmenes mínimos para el depósito de inercia	89
Figura 24 Ejemplo de la instalación.....	89
Figura 25 Línea monofásica o trifásica según potencia eléctrica consumida.....	90
Figura 26 Factor de corrección por motor	91

Figura 27 Tipo de configuración de los cables	92
Figura 28 Tabla de intensidades máximas admisibles según sección del cable y tipo de configuración	92
Figura 29 Sección mínima de los conductores de protección.....	93
Figura 30 Calibres normalizados para protecciones	94
Figura 31 Ejemplo de esquema con caja de distribución.....	98
Figura 32 Esquema del sistema.....	99
Figura 33 Ejemplo de circuito de batería hidrónica acoplada a la bomba	102
Figura 34 Respuesta de control PI	106
Figura 35 Gráfico de la salida del control PI	107
Figura 36 Cálculo de coste de inversión del sistema	109
Figura 37 Permisos y bonificaciones	110
Figura 38 Gastos operativos anuales.....	111
Figura 39 Cálculo de ahorro en el consumo energético.....	111
Figura 40 Cálculo de rentabilidad.....	112
Figura 41 Análisis de sensibilidad del VAN y del TIR	116

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Expresión de Darcy-Weisbach.....	68
Ecuación 2 Cálculo del caudal necesario en la bomba de calor conocida la potencia de diseño .	79
Ecuación 3 Velocidad del agua por el circuito primario en la bomba de calor	79
Ecuación 4 Energía renovable consumida por calefacción.....	82
Ecuación 5 Energía renovable consumida por ACS.....	82
Ecuación 6 Potencia suministrada por una bomba de calor.....	85
Ecuación 7 Volumen proporcionado por un depósito de ACS.....	86
Ecuación 8 Cálculo de intensidad por una línea monofásica.....	91
Ecuación 9 Condiciones de intensidad de las protecciones	93
Ecuación 10 Cálculo de la temperatura de impulsión a la salida del recuperador de calor	95
Ecuación 11 Salto térmico del aire a la salida del recuperador de calor con respecto a la temperatura ambiente deseada en el interior.....	100
Ecuación 12 Caudal de impulsión de aire a la salida del recuperador de calor	100
Ecuación 13 Potencia necesaria de la batería de post-tratamiento a la salida del recuperador de calor.....	100
Ecuación 14 Temperatura del aire a la salida del recuperador de calor, salto térmico y potencia necesaria proporcionada por la batería de post-tratamiento en condiciones menos favorables .	100
Ecuación 15 Cálculo del coeficiente Kv para la selección de la válvula.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cálculo de la velocidad del agua con la caldera de gasóleo	79
Tabla 2 Cálculo de la velocidad del agua con la bomba de calor	80
Tabla 3 Condiciones de entrada y salida del agua	85
Tabla 4 Número de radiadores para la potencia necesaria de 14,4 kW	85
Tabla 5 Matriz de riesgos del proyecto.....	115

Capítulo 1. Introducción

Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un plan de negocio detallado a partir de un proyecto anterior, de elaboración propia, titulado “*Análisis de mejora de la eficiencia energética de una vivienda unifamiliar*”¹, realizado durante el curso académico 2022-2023. Dicho trabajo fue evaluado positivamente, obteniendo una calificación de notable, y sentó las bases técnicas y teóricas para abordar los desafíos energéticos de una vivienda real. Este primer proyecto consistió en un análisis profundo de la situación energética de la vivienda, evaluando sus consumos actuales, las pérdidas térmicas, y proponiendo varias soluciones técnicas con el objetivo de reducir significativamente la demanda y el consumo energético.

Los resultados iniciales reflejaban una baja calificación energética, con un indicador de consumo energético de 176,6 kWh/m² anuales (calificación D) y un indicador de emisiones de 46,6 kgCO₂/m² anuales (calificación E), lo que evidenciaba la necesidad urgente de una intervención. Entre las medidas propuestas entonces destacaban: la instalación de un recuperador de calor (capaz de reducir hasta un 26% las pérdidas caloríficas), la colocación de un Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE) en fachada y cubierta (con una reducción estimada del 50%), la instalación de un sistema fotovoltaico tanto sin batería (reducción del 38% del consumo eléctrico) como con batería (reducción del 79%), y la sustitución de la caldera mixta de gasóleo-C por una de biomasa o una bomba de calor aerotérmica (con potenciales reducciones del 18% y 84%, respectivamente, en consumo térmico).

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las soluciones propuestas, el coste de inversión aproximado y tras una valoración económica, si sería rentable la solución en cuestión o no en base a su ahorro energético, y por lo tanto, si es seleccionada.

¹ TFG. (s. f.).

<i>Propuesta</i>	<i>Coste de la inversión (€)</i>	<i>¿Rentable?</i>	<i>¿Seleccionada?</i>
Sistema SATE	23206,71	NO	NO
Recuperador de calor	2097,50	SÍ	SÍ
Caldera de biomasa	17774,00	SÍ	NO
Bomba de calor aerotérmica	18171,54	SÍ	SÍ
Sistema fotovoltaico	7955,75	SÍ	NO
Sistema fotovoltaico con batería	13461,25	SÍ	SÍ

Figura 4. Tabla resumen de las propuestas y elección final

Sin embargo, aunque el análisis fue extenso y permitió seleccionar una combinación óptima de medidas, no se profundizó en el diseño técnico de cada solución. Es precisamente en ese punto donde este nuevo proyecto cobra sentido: retomar las propuestas más viables del trabajo anterior (recuperador de calor y bomba de calor aerotérmica) y desarrollarlas con un diseño técnico completo, actualizado y adaptado a las condiciones actuales del mercado. Esto incluye considerar factores como los cambios en el precio del MWh (que, aunque ha disminuido un 48%, sigue siendo alto), las mejoras tecnológicas en equipos y componentes, y las nuevas exigencias normativas en eficiencia energética².

² Evolución precio MWh. (s. f.).

Además, este proyecto no solo se centra en el diseño de las medidas seleccionadas, sino que incorpora un componente fundamental: una auditoría económica exhaustiva, en la que se evaluará la viabilidad financiera de cada solución, su rentabilidad a medio y largo plazo, y su sostenibilidad en un horizonte temporal de hasta diez años. Esto permitirá comprobar si, más allá de ser técnicamente eficaces, las inversiones tienen sentido económico para el propietario, considerando también posibles riesgos como el mantenimiento o la vida útil de cada sistema.

En resumen, este proyecto busca dar un paso más respecto al análisis anterior: transformar un conjunto de buenas ideas en un plan de acción realista, fundamentado técnicamente y viable económicamente, que sirva como modelo para actuaciones similares en viviendas unifamiliares.

Capítulo 2. Motivación

La motivación principal de este trabajo parte de una experiencia personal y académica muy significativa: haber desarrollado en profundidad un proyecto anterior sobre eficiencia energética, que me permitió conocer de cerca los desafíos que plantea este ámbito. Aquel proyecto fue un punto de partida clave que despertó en mí un gran interés por seguir profundizando en las energías renovables, la ingeniería aplicada a la sostenibilidad y el análisis económico asociado a cada decisión técnica.

Durante su realización me di cuenta de lo mucho que se puede aportar desde el ámbito de la ingeniería a la mejora del entorno, no solo en términos técnicos sino también en términos de bienestar económico y social. Por eso, sentí la necesidad de darle continuidad al trabajo que inicié entonces, y no dejarlo solo como una propuesta teórica: quise transformarlo en algo real, medible y aplicable.

Este nuevo enfoque me permite también abordar una parte que en el TFG quedó pendiente: el diseño técnico detallado de las medidas elegidas, desde cálculos termodinámicos hasta la selección de componentes y materiales, pasando por el diseño de sistemas de conexión, control y soporte. Es una oportunidad para aplicar los conocimientos adquiridos durante todo el máster y poner a prueba mi capacidad para desarrollar un proyecto completo de ingeniería con todos sus elementos.

Por otro lado, una motivación clave en este TFM es el análisis económico. Siempre he creído que la eficiencia energética no debe quedarse solo en una mejora del comportamiento térmico de una vivienda, sino que debe acompañarse de una reflexión económica: ¿realmente es rentable lo que propongo? ¿Compensa la inversión inicial con el ahorro a medio y largo plazo? ¿Qué riesgos hay? ¿Qué indicadores financieros se deben tener en cuenta? Esas preguntas son las que me llevaron a querer incluir un plan de negocio bien argumentado, con indicadores como el VAN, el TIR y el ROI³, que permitan evaluar de forma objetiva el impacto económico del proyecto.

³ LCOH. (s. f.).

En definitiva, me motiva el hecho de poder integrar todas las áreas que me interesan: energía, sostenibilidad, diseño técnico y economía. Y, sobre todo, me ilusiona la posibilidad de que este proyecto no se quede solo en el ámbito académico, sino que pueda servir como base para aplicarse en casos reales, demostrando que es posible combinar eficiencia, ahorro, sostenibilidad y rentabilidad en el diseño de una vivienda.

Capítulo 3. Objetivos del proyecto

3.1 Objetivos particulares

A partir del enfoque planteado, los objetivos principales de este TFM son los siguientes:

- Diseñar con detalle las medidas seleccionadas en el proyecto anterior para disminuir el consumo de energía térmica, que fueron previamente identificadas como las más eficientes y rentables: recuperador de calor y bomba de calor aerotérmica.
- Actualizar estas medidas al contexto actual, teniendo en cuenta los nuevos precios de la energía, avances tecnológicos, regulaciones recientes y necesidades de mayor eficiencia en componentes.
- Realizar un análisis técnico completo de cada solución, incluyendo cálculos energéticos, diseño de componentes, elección de materiales, estimación de rendimientos, condiciones de operación, y diseño del sistema eléctrico y de integración.
- Evaluar exhaustivamente la viabilidad económica de las propuestas, incluyendo un análisis de la inversión inicial, ahorro energético esperado, periodo de retorno, y principales indicadores de rentabilidad financiera (TIR, VAN, ROI).
- Identificar los riesgos financieros o técnicos que podrían influir en la decisión de implementar estas medidas (alta inversión inicial, mantenimiento costoso, obsolescencia tecnológica, etc.).
- Proponer un plan de negocio estructurado, que contemple tanto el diseño técnico como el análisis económico y que pueda servir de guía para la implementación de las medidas en la vivienda.
- Contribuir al consumo responsable de la energía en el entorno residencial, demostrando que se puede combinar eficiencia, ahorro económico y sostenibilidad.

3.2 Objetivos generales

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que se alinean con los objetivos principales de este proyecto se muestran a continuación⁴.

Séptimo objetivo: Energía asequible y no contaminante

Gracias al uso de las energías renovables, en este proyecto de energía térmica del aire, la vivienda podrá abastecer parte o completamente la demanda de manera sostenible y moderna. Pudiendo acceder a energía asequible y limpia, ya que se reducirán las emisiones de gases nocivos al planeta por parte del uso de la vivienda.

Undécimo objetivo: Ciudades y comunidades sostenibles

Si este plan de negocio que se propondrá se pone en marcha, hará que se promueva la utilización de recursos renovables y sostenibles en la ámbito cotidiano, creando así ciudades seguras y resilientes. Además de optar por la inversión en tecnología eficiente y poder crear un avance en el mundo.

Duodécimo objetivo: Producción y consumo responsables

El plan que se quiere llevar a cabo para mejorar la eficiencia energética de la vivienda se basa en medidas que permiten reducir el consumo energético de la vivienda, haciendo uso de energías renovables, en el caso de la bomba de calor aerotérmica, siendo este consumo responsable y sostenible.

Decimotercer objetivo: Acción por el clima

El propósito primordial de este proyecto es el ahorro energético en el consumo de la vivienda. Esto se debe al agravante problema del cambio climático y la necesidad de hacer un uso responsable de la energía para poder ponerle fin. Gracias a estas medidas se reducirán las emisiones de dióxido de carbono y mitigar poco a poco la transformación climática que está viviendo el planeta.

⁴ Pacto Mundial de la ONU España. (s. f.).

Además, ayudando así al planeta, se podrán conservar aquellos recursos no renovables de los que se está haciendo un uso indebido, como el gas o el petróleo.



Figura 5. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Capítulo 4. Metodología

La metodología de este trabajo se basa en un proceso secuencial que parte de la definición del sistema y de sus requisitos, para después abordar el diseño de cada uno de sus componentes y su posterior integración. En primer lugar, se llevará a cabo el diseño de un ventilación mecánica con recuperación de calor, seleccionando un recuperador que se ajuste a las necesidades de caudal, eficiencia y pérdidas de carga establecidas en el proyecto. Se evaluarán distintas opciones comerciales y se analizarán sus prestaciones con el objetivo de escoger el modelo más adecuado para las condiciones de la instalación.

En segundo lugar, se abordará el diseño del sistema de generación de calor, que en este caso se plantea mediante una bomba de calor aerotérmica. Se estudiarán varias configuraciones posibles y se valorarán aspectos como la potencia térmica, el rendimiento estacional y la compatibilidad con el resto de la instalación. El análisis permitirá definir las condiciones de trabajo más adecuadas y prever cómo se integrará este equipo con el sistema de ventilación.

Una vez definidos el recuperador y la bomba de calor, se pasará al diseño de la batería de post-tratamiento, elemento que permitirá ajustar la temperatura del aire impulsado a las estancias en las condiciones más desfavorables.

A continuación, se estudiará la integración física y funcional de todos los componentes, analizando cómo interactúan y definiendo la lógica de control necesaria para un funcionamiento estable y eficiente. Este planteamiento se completará con una simulación que permita anticipar el comportamiento del sistema en distintos escenarios de operación y validar las decisiones de diseño.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis económico que permita estimar la inversión inicial y valorar la viabilidad global de la propuesta. Este apartado servirá para poner en contexto los resultados técnicos dentro de un marco de costes y beneficios, facilitando la comparación con alternativas y proporcionando una visión integral que incluya tanto la eficiencia como la rentabilidad del sistema diseñado.

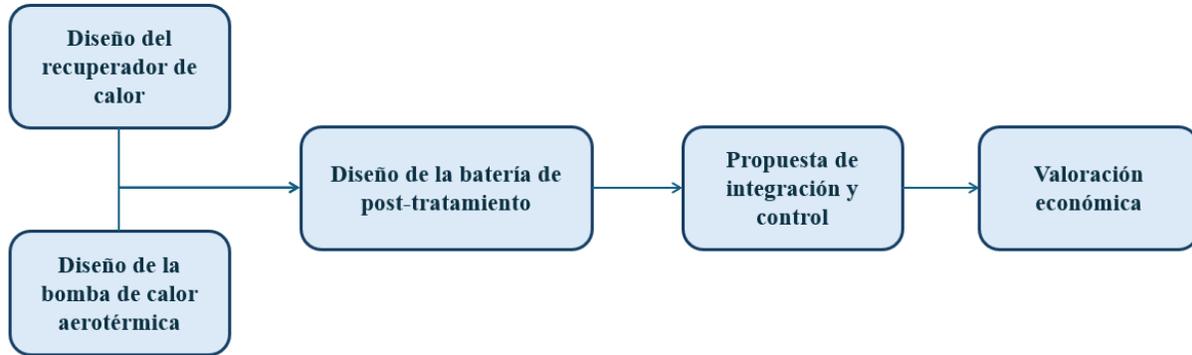


Figura 6 Metodología de trabajo

Capítulo 5. Estado de la cuestión

5.1 Bomba de calor aerotérmica

5.1.1 Principio de funcionamiento

La aerotermia es un sistema de climatización que aprovecha la energía térmica existente en el aire ambiente para proporcionar calefacción en invierno, refrigeración en verano y agua caliente sanitaria (ACS) durante todo el año.

Una bomba de calor aerotérmica extrae calor del aire exterior (sin importar la temperatura de este) y lo transfiere al interior de la vivienda. Además, en verano, el ciclo puede invertirse para extraer el calor del interior y expulsarlo fuera, enfriando la vivienda.

Este proceso se basa en un ciclo termodinámico cerrado con refrigerante, similar al de un refrigerador o aire acondicionado, pero aplicado a climatizar espacios. Gracias a ello, los sistemas de aerotermia pueden llegar a obtener alrededor de un 75% de la energía que necesitan para climatizar, requiriendo solo aproximadamente un 25% de electricidad⁵.

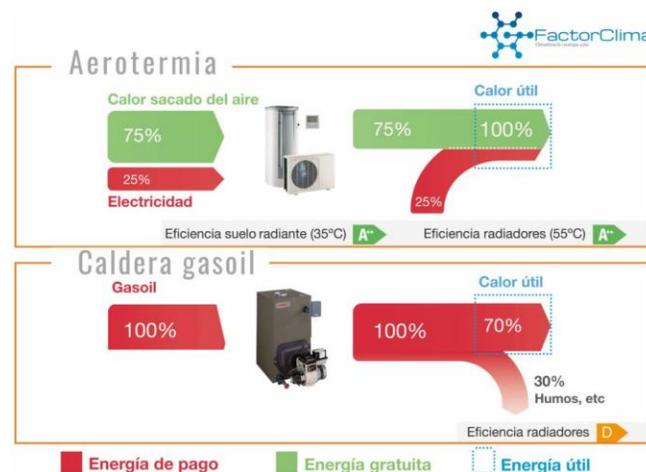


Figura 7. Aerotermia vs Caldera tradicional

⁵ Repsol. (s.f.).

Esto significa que por cada 1 kW de energía eléctrica consumida, la bomba de calor puede aportar entre 3 y 5 kW en forma de calor útil, multiplicando la energía aportada y logrando eficiencias superiores al 100% (ya que se suma la energía renovable extraída del aire).

El principio de funcionamiento de una bomba de calor aerotérmica se basa en los siguientes pasos:

- Evaporación: En la unidad exterior, un fluido refrigerante muy frío circula por un intercambiador (evaporador) y absorbe el calor del aire exterior que pasa a través de él, incluso si el aire está a baja temperatura⁶. Al absorber calor, el refrigerante se evapora en el intercambiador.
- Compresión: El compresor eléctrico succiona ese refrigerante gaseoso a baja presión y lo comprime, elevando notablemente su temperatura.
- Condensación: El gas caliente circula hacia otro intercambiador (condensador) donde cede su energía calorífica al circuito de calefacción del hogar, en el caso de esta vivienda sería el agua de los radiadores, condensándose de nuevo a líquido al liberar calor. De este modo calienta el agua de calefacción.
- Expansión: El refrigerante líquido pasa por una válvula de expansión que reduce su presión y temperatura, dejándolo otra vez en estado frío inicial. Así, puede retornar al evaporador para reiniciar el ciclo continuamente mientras se necesite calefacción. Cuando se desea refrigeración en verano, el ciclo opera de forma inversa mediante una válvula de 4 vías, de modo que el calor se toma del interior de la vivienda y se expulsa al exterior, produciendo aire frío en casa, pero esto no se considerará en este proyecto⁷.

⁶ Repsol. (s.f.).

⁷ Arnabat, I. (2019, 16 de mayo).



Figura 9. Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor aerotérmica

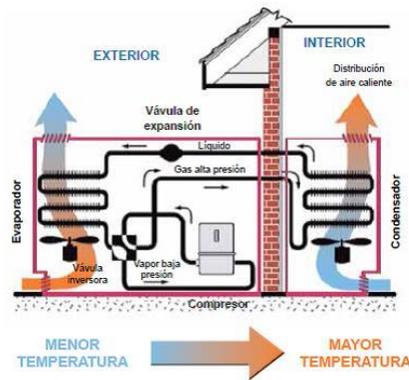


Figura 8. Representación del funcionamiento de una bomba de calor aerotérmica

Por lo tanto, una bomba de calor aerotérmica bombea calor de un lugar a otro en vez de generarlo mediante combustión o efecto Joule, por lo que es mucho más eficiente que cualquier otro sistema de calefacción. Este sistema no consume combustibles fósiles directamente y no genera llama ni humos, por lo que se considera una energía renovable, limpia y segura. Además, con una sola máquina puede ofrecer calefacción, refrigeración y agua caliente, aportando una solución integral de climatización del hogar.

5.1.2 Componentes principales del sistema

Como ya se ha explicado en el apartado anterior el principio de funcionamiento, ahora se entrará más en detalle de cada componente del ciclo que sigue.

- **Compresor:** Es la parte principal de la bomba de calor. Este consume energía eléctrica para comprimir el gas refrigerante y hacer posible el ciclo termodinámico. Suele ser un compresor hermético de alta eficiencia, frecuentemente de tipo inverter con velocidad variable, lo cual se analizará más adelante.
- **Evaporador:** Es el intercambiador de calor donde el refrigerante absorbe calor del aire exterior y se evapora. En los sistemas aire-agua, el evaporador está en la unidad exterior con un ventilador que fuerza el paso de aire ambiente a través de él. En modo calefacción,

actúa captando energía del aire exterior; en modo refrigeración, el evaporador estaría dentro y absorbería calor del interior.

- Condensador: Es el intercambiador donde el refrigerante cede calor al medio de calefacción. En bombas aire-agua, el condensador suele estar en la unidad interior. Este transfiere el calor del refrigerante al agua de calefacción y al ACS del circuito interno.
- Válvula de expansión: Es el dispositivo de estrangulamiento que reduce la presión del refrigerante líquido tras el condensador, provocando que baje de temperatura antes de entrar de nuevo al evaporador. Se encarga de preparar el refrigerante para volver a absorber calor.
- Unidad exterior: Una carcasa instalada fuera de la vivienda que normalmente contiene el compresor, el evaporador, el ventilador y la válvula de expansión. Su función es intercambiar energía con el aire exterior⁸.
- Unidad interior: El módulo interior conocido como hidrokit en sistemas aire-agua. Incluye el intercambiador condensador para transferir calor al agua, la bomba de circulación de agua, válvulas de conmutación, elementos de control y seguridad, y a veces resistencias de apoyo.
- Sistema de distribución y emisores: La aerotermia aire-agua entrega calor al circuito de agua de la calefacción. Este circuito alimentaría a radiadores de baja temperatura y a la unidad de ventilación. En este caso al estudiarse la instalación de un recuperador de calor en la vivienda, aportaría calor a ambas, mediante una batería⁹. También se conecta a los grifos y duchas para el suministro de ACS si el sistema provee agua caliente.

En conjunto, estos componentes trabajan de forma coordinada, la unidad exterior captura el calor ambiental, la unidad interior lo transfiere al agua de los circuitos internos, y los emisores entregan el confort térmico a las estancias.

⁸ Preciogas. (2025, 13 de enero).

⁹ Toshiba Aire. (s.f.).

5.1.3 Tipo de bombas de calor aerotérmicas

Existen distintas configuraciones y modalidades de bombas de calor aerotérmicas, para adaptarse a diversas necesidades. A continuación, se describen los principales tipos y variantes:

- Sistemas monobloc:

En un sistema aerotérmico monobloc, todos los componentes del ciclo frigorífico se alojan en una única unidad exterior compacta¹⁰. Es decir, el compresor, evaporador, condensador y válvula de expansión, vienen integrados de fábrica en un solo módulo que se instala fuera de la vivienda. En las bombas de calor aire-agua monobloc, el agua del circuito de calefacción y ACS pasa directamente a esta unidad exterior.

La instalación es más sencilla y rápida, ya que no requiere conectar tuberías de refrigerante entre unidades ni instalar una unidad interior con circuito frigorífico. Solo se conectan las tuberías hidráulicas de ida y retorno de agua entre la unidad exterior monobloc y la vivienda, además de las conexiones eléctricas y de control¹¹. Esto simplifica la instalación y reduce el riesgo de fugas de refrigerante, pues el circuito frigorífico viene sellado de fábrica.

Este tipo de bomba de calor aerotérmica es adecuada para cuando se desea minimizar el espacio interior ocupado. Por ejemplo, en viviendas sin cuarto técnico amplio, el monobloc evita tener un módulo interior con compresor. También se usa en proyectos donde se reemplaza una caldera exterior y se quiere aprovechar el espacio existente, así como ocurre en este caso de estudio.

Los sistemas monobloc actuales suelen ser para calefacción, refrigeración y ACS. Sin embargo, al estar todo en el exterior, hay que tener en cuenta el riesgo de congelación del agua en las tuberías exteriores en clima muy frío; por ello, se le añade anticongelante al circuito de agua o incluyen resistencias eléctricas de trazado en las tuberías.

¹⁰ Repsol. (s.f.).

¹¹ Preciogas. (2025, 13 de enero).

Por lo que, el monobloc ofrece compacidad y facilidad de instalación, a cambio de tener más elementos expuestos al exterior y debe aislarse bien hidráulicamente. Es común en equipos de pequeña a mediana potencia, tanto en viviendas unifamiliares como en pisos que dispongan de terraza o balcón para su colocación.

- Sistemas bibloc:

En un sistema bibloc, también llamado split, la bomba de calor se divide en dos unidades: una exterior y una interior. La unidad exterior contiene el compresor y el evaporador (similar a un aire acondicionado), mientras que la unidad interior (hidrokit) contiene normalmente el condensador intercambiando con el agua, la bomba de circulación y a veces el depósito de ACS separado o acoplado¹². Ambas unidades se conectan entre sí mediante tuberías de refrigerante (línea de líquido y gas).

Este requiere tendido de líneas frigoríficas aisladas entre el exterior y el interior, así como su vacío y carga de refrigerante adecuada si no vienen precargadas. La instalación es algo más laboriosa que en un monobloc, pero ofrece más flexibilidad: la unidad interior puede ubicarse en un cuarto de máquinas, garaje o armario técnico, y de ella salen ya las tuberías de agua hacia la vivienda.

Al tener el intercambiador de calor agua-refrigerante en el interior, se minimiza el riesgo de congelación del agua, ya que el circuito de agua generalmente está todo dentro. Además, la unidad interior puede incorporar un acumulador de ACS, aunque para una vivienda de pocos habitantes no sería tan necesario, y otros elementos, consolidando en interior lo necesario. Permite conectar varias unidades interiores en algunos sistemas aire-aire o modulaciones zonales, así como facilitar el servicio en edificios grandes distribuyendo varias unidades interiores en distintas zonas¹³.

Este tipo es idóneo cuando se dispone de espacio interior para el módulo hidráulico y se prefiere proteger más el circuito de agua de temperaturas exteriores extremas. En climas fríos es muy

¹² Arnabat, I. (2019, 16 de mayo).

¹³ Repsol. (s.f.).

habitual usar bibloc. También cuando se requiere potencia elevada, muchos equipos de mayor capacidad vienen en formato bibloc.

Por lo que, el sistema bibloc brinda mayor versatilidad en la instalación y expansión, a costa de una obra algo más compleja inicialmente. Es la configuración más usada en viviendas que cuentan con sala técnica, y permite asegurar mejor el funcionamiento en invierno riguroso.

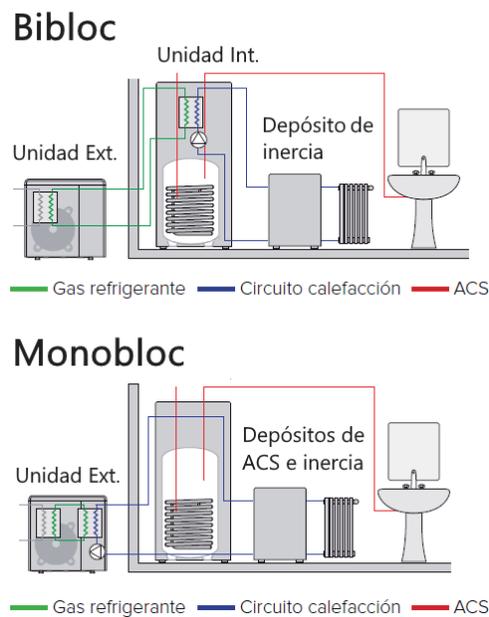


Figura 10. Diferencia entre sistema monobloc y bibloc

Teniendo en cuenta que se trata de una vivienda unifamiliar situada en Oviedo (clima húmedo y con inviernos fríos), y que cuenta con espacio exterior pero también con posibilidad de ubicar un módulo interior en una sala técnica o garaje, la opción más recomendable sería un sistema aerotérmico bibloc. Aunque el sistema monobloc es más compacto y fácil de instalar, en climas como el de Asturias es preferible proteger el circuito hidráulico del riesgo de congelación. Al tener el intercambiador y el agua en el interior, el bibloc garantiza mayor seguridad térmica durante los meses fríos, algo fundamental en este entorno.

5.1.4 Comparación entre los servicios que pueden ofrecer

A continuación, vamos a estudiar los posibles servicios que ofrece un sistema con bomba de calor aerotérmica.

- Solo calefacción: Son equipos diseñados únicamente para calefactar, sin función de refrigeración activa. Estas bombas de calor aire-agua calientan el agua para radiadores o suelo radiante y también suelen dar ACS, pero no tienen ciclo reversible para producir frío en verano. Al simplificarse (no incluyen válvula de 4 vías ni modos de enfriamiento), pueden ser ligeramente más económicas. Son adecuadas en climas donde no se necesita aire acondicionado, o en viviendas que ya cuentan con otro sistema de refrigeración independiente. Por ejemplo, algunas aerotermias se venden en versión solo calor + ACS pensando en zonas de clima frío donde el aire acondicionado no es prioritario.
- Bomba de calor reversible (bomba frío/calor): son las más comunes hoy día. Pueden funcionar tanto en modo calefacción como en modo refrigeración invirtiendo el ciclo, lo que permite climatización anual completa con el mismo equipo¹⁴. Siempre que los emisores lo permitan (por ejemplo, fancoils o suelo refrescante para la parte de frío), la misma instalación puede dar frío en verano. En prestaciones, la reversibilidad aporta mucha versatilidad; prácticamente todas las aerotermias modernas aire-agua medianas incluyen modo frío de serie, aunque su uso es opcional.
- Provisión de ACS: Muchas bombas de calor aerotérmicas incorporan un modo específico para agua caliente sanitaria, ya sea con un intercambiador interno y depósito acumulador integrados, o mediante la conexión a un acumulador externo de ACS mediante una válvula de tres vías. Una aerotermia “calefacción + ACS” está pensada para cubrir también la demanda de agua caliente doméstica además de la climatización. Esto incrementa la

¹⁴ Repsol. (s.f.).

utilidad anual del equipo, pues incluso en meses templados donde no hay calefacción ni refrigeración, la bomba de calor trabajará para el agua caliente¹⁵.

En el caso concreto de esta vivienda unifamiliar situada en Oviedo, un clima templado con inviernos fríos, pero veranos moderados, y considerando además la existencia de un sistema de recuperación de aire que mejora el confort térmico y la ventilación durante todo el año, la opción más adecuada sería una bomba de calor aerotérmica solo calefacción con producción de ACS. Así, permite reducir ligeramente la inversión inicial sin renunciar al confort en los meses fríos ni a la cobertura de agua caliente sanitaria durante todo el año.

5.1.5 Tecnología inverter y otras características

La mayoría de bombas de calor aerotérmicas actuales incorporan tecnología inverter, que permite modular la velocidad del compresor y del ventilador de forma continua. Un inverter ajusta su potencia de salida a la demanda térmica en cada momento, aportando varias ventajas:

- **Mayor eficiencia estacional:** Al funcionar gran parte del tiempo a cargas parciales con un rendimiento óptimo, el consumo se reduce. Un sistema inverter evita los continuos arranques/paradas que penalizan la eficiencia. Esto contribuye a alcanzar altos coeficientes estacionales SCOP (demanda anual de calefacción (kWh) / consumo anual de energía (kWh))¹⁶.
- **Confort estable:** La modulación suave de potencia mantiene la temperatura interior más constante, evitando oscilaciones. El equipo puede operar de manera continua a baja potencia, lo que también reduce el ruido percibido y mejora la sensación de confort (reduciendo las ráfagas de aire frío calor).
- **Menor desgaste:** El funcionamiento a régimen variable suele implicar menos picos de corriente y estrés mecánico, alargando la vida útil del compresor. Los compresores inverter

¹⁵ Preciogas. (2025, 13 de enero).

¹⁶ Toshiba Aire. (s.f.).

modernos tienen una vida útil muy larga y un mantenimiento sencillo, siendo raros los fallos cuando están bien instalados¹⁷.

Prácticamente todas las aerotermias residenciales de 2025 son inverter, pero merece la pena destacarlo como un estándar de calidad. Otras características a considerar en la tecnología de una bomba de calor incluyen el tipo de refrigerante usado (actualmente es común el R-32, más ecológico que el antiguo R-410A), la presencia de resistencias eléctricas de apoyo (muchos equipos incluyen una resistencia de entorno 3~6 kW que se activa solo si la demanda supera la capacidad de la bomba o en descongelaciones). Todas estas innovaciones buscan asegurar que la aeroterminia funcione de forma fiable y ofrezca la máxima eficiencia posible.

5.1.6 Ventajas y desventajas de la aeroterminia

Las bombas de calor aerotérmicas presentan una serie de ventajas importantes respecto a sistemas tradicionales de calefacción (calderas de gasóleo tipo C como la que tiene actualmente la vivienda en cuestión). Sin embargo, también tienen algunos inconvenientes o desafíos a considerar.

Ventajas de la aeroterminia:

- Alta eficiencia energética y ahorro: Como ya se indicó, la aeroterminia puede alcanzar rendimientos de 300-500%. Hay sistemas capaces de entregar 3 a 5 kW de calor por cada 1 kW eléctrico consumido, lo que se traduce en un ahorro notable en las facturas. Frente a resistencias eléctricas puras, el ahorro en consumo puede rondar el 75% o más. Incluso comparada con calderas de gas, la aeroterminia consume aproximadamente un 25% menos de energía para dar el mismo calor¹⁸, gracias a que extrae la mayor parte del calor del aire ambiente gratuitamente.
- Fuente de energía renovable y limpia: La energía aerotérmica aprovecha el calor del aire, que es renovable y no se agota. Al no haber combustión, no emite humo, CO₂ directo, ni gases contaminantes como NO_x, SO_x. Esto mejora la calidad del aire en el hogar y evita

¹⁷ Repsol. (s.f.).

¹⁸ Toshiba Aire. (s.f.).

chimeneas o ventilaciones de gases quemados. Además, si la electricidad que consume proviene de fuentes renovables (o se combina con paneles solares), el sistema puede ser prácticamente cero emisiones en uso¹⁹.

- **Versatilidad (calefacción, refrigeración y ACS):** Una sola instalación de aerotermia sirve para todo el año, proporcionando calefacción en invierno, aire acondicionado en verano, y también agua caliente sanitaria todo el año. Esta multifunción la hace muy completa: sustituye a la vez a la caldera y al aire acondicionado, con la comodidad de un único equipo integrado.
- **Seguridad:** Al prescindir de combustibles fósiles en casa, se eliminan riesgos asociados como fugas de gas, explosiones o intoxicaciones por monóxido de carbono. Tampoco se necesitan depósitos de almacenamiento de combustible en la vivienda. El único suministro requerido es electricidad. Esto hace a la aerotermia un sistema intrínsecamente seguro en la operación diaria.
- **Mantenimiento reducido:** Las bombas de calor tienen un mantenimiento sencillo y relativamente económico. No hay que limpiar quemadores ni chimeneas, ni revisar tanque de gasóleo, etc. Se recomienda una revisión anual o bianual para limpieza de filtros, comprobar la carga de refrigerante y buen estado general, pero en general los compresores modernos son muy duraderos y las intervenciones técnicas son mínimas²⁰. Esto supone menos costes y molestias de mantenimiento que en una caldera tradicional.
- **Confort y precisión:** Ofrecen gran estabilidad de temperatura interior gracias al control electrónico preciso e inverter. Además, algunos sistemas permiten control remoto vía wifi, programación horaria, integración domótica, zonas independientes de climatización, etc., mejorando el confort. Por otro lado, la entrega de calor puede ser más gradual y homogénea (especialmente con suelo radiante) evitando los picos de calor típicos de radiadores muy calientes.

¹⁹ Repsol. (s.f.).

²⁰ Repsol. (s.f.).

Desventajas de la aerotermia:

- **Coste inicial alto:** La inversión para instalar aerotermia es elevada en comparación con sistemas convencionales. Incluye el coste de la bomba de calor en sí, el posible depósito de ACS, obra de instalación... Esto supone una barrera de entrada importante, aunque luego se compense con ahorros.
- **Dependencia de la electricidad:** Al funcionar con energía eléctrica, la aerotermia sujeta al usuario al suministro eléctrico. Si hay un corte de luz, no habrá calefacción. Además, el ahorro económico depende en gran medida de la tarifa de electricidad: tarifas eléctricas altas o con tramos punta pueden mermar la ventaja económica frente al gas. La volatilidad del precio de la luz es un factor a tener en cuenta. No obstante, en la Unión Europea la tendencia es a la descarbonización de la red y tarifas especiales para climatización, lo que puede mitigar este punto.
- **Rendimiento variable según clima:** Aunque las bombas de calor actuales funcionan incluso con temperaturas exteriores muy bajas, su eficiencia disminuye en climas extremadamente fríos y la capacidad útil de calefacción también puede reducirse. Muchos equipos incorporan resistencias eléctricas de apoyo que se encienden en esas condiciones, lo cual garantiza la calefacción, pero con un consumo eléctrico mayor (reduciendo momentáneamente la eficiencia global). Esto hace que en climas de inviernos muy duros la aerotermia pueda perder parte de su ventaja y elevar el consumo²¹. En España, donde la mayor parte del territorio es clima templado o cálido, la aerotermia alcanza rendimientos estacionales muy buenos²², pero en zonas de montaña o climas fríos se debe dimensionar bien y considerar esta característica.
- **Espacio exterior y estética:** La aerotermia requiere instalar una unidad exterior de cierto tamaño y que además necesita buen flujo de aire. No todas las viviendas disponen de un lugar adecuado o las comunidades de vecinos pueden poner restricciones estéticas o de ruido. Aunque este no sea el caso de la vivienda en estudio.

²¹ Junkers Bosch. (s.f.).

²² Vaeron. (s.f.).

- Mantenimiento especializado: Aunque el mantenimiento es menor que en una caldera, requiere técnicos especializados en refrigeración para ciertas intervenciones.
- Otros aspectos: En viviendas existentes, puede ser necesario adecuar la instalación interior: la aerotermia funciona mejor con emisores de baja temperatura (suelo radiante, radiadores grandes) que con radiadores antiguos diseñados para altas temperaturas. Si se conecta una bomba de calor a radiadores convencionales sobredimensionados para caldera, podría no alcanzar la temperatura deseada o funcionar con menor COP al tener que subir mucho la temperatura del agua. En esos casos quizás haya que cambiar algunos radiadores por modelos de baja temperatura o incorporar un apoyo.

5.2 Recuperador de calor

5.2.1 Principio de funcionamiento

Como se ha explicado antes, en la vivienda en cuestión, se ha optado por un sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperador de calor. Este sistema permite renovar el aire interior de forma continua, extrayendo el aire viciado (con CO₂, olores, humedad excesiva...) y simultáneamente introduciendo aire fresco del exterior. La clave está en un intercambiador de calor dentro de la unidad de ventilación: el aire extraído de la vivienda (que en invierno está caliente tras ser calentado por la calefacción y las personas) cede su calor al aire frío que entra del exterior, sin que ambos flujos de aire se mezclen en ningún momento. De este modo, el aire nuevo se precalienta antes de entrar en las estancias, aprovechando hasta un 90-95% del calor que de otra forma se perdería²³. En invierno, por ejemplo, el aire exterior a 5 °C podría entrar a cerca de 18 °C gracias a la recuperación de calor, reduciendo drásticamente la demanda de calefacción para calentarlo y mejorando así, la eficiencia energética de la vivienda. En verano el proceso puede invertirse: si el interior está más fresco que el exterior, el recuperador transfiere frescor al aire entrante caliente, enfriándolo parcialmente²⁴. Muchos equipos incorporan incluso un modo bypass para evitar recuperar calor en entretiempo o noches frescas de verano, permitiendo enfriar la casa con aire exterior cuando es beneficioso.

²³ Casas Pasivas Josman. (2018, 8 de junio).

²⁴ Caloryfrio. (2024, 15 de enero).

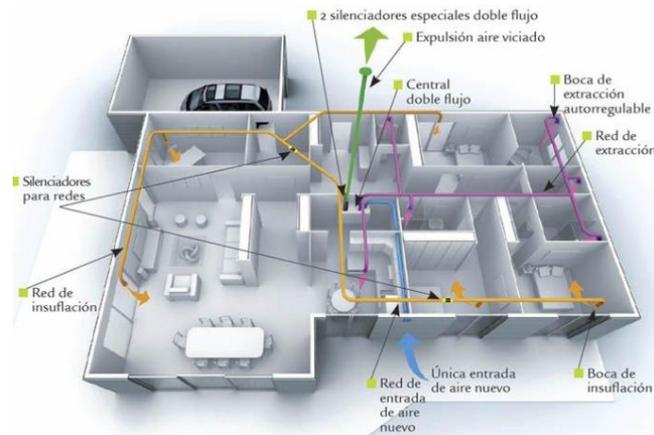


Figura 11. Esquema sistema de ventilación de una vivienda

En este esquema de un sistema de ventilación de doble flujo en una vivienda se observa lo siguiente: El aire fresco (azul) se toma del exterior por una entrada única y pasa por el recuperador de calor central (amarillo), distribuyéndose por conductos aislados (naranja) hacia las distintas estancias mediante bocas de impulsión. El aire viciado (morado) se extrae de baños, cocina y zonas húmedas mediante bocas de extracción autorregulables, confluyendo hacia la unidad recuperadora para expulsarse al exterior (flecha verde). Unos silenciadores acústicos en los conductos aseguran un funcionamiento silencioso.

El resultado de este sistema de doble flujo es una ventilación equilibrada y eficiente. A diferencia de la ventilación natural o de flujo simple (donde entra aire frío por rendijas y se extrae el aire por extractores, provocando corrientes incómodas y pérdidas de calor), aquí los caudales de aire están controlados y son equivalentes: se impulsa el mismo caudal de aire que se extrae para mantener el balance y evitar sobrepresiones o infiltraciones desequilibradas²⁵. Gracias a ello, la vivienda se ventila de forma constante manteniendo una temperatura interior mucho más estable. Además, al no mezclarse nunca el aire de extracción con el de impulsión, la calidad del aire nuevo es alta y no transmite olores ni contaminantes desde las zonas húmedas a las secas. En resumen, en invierno se consigue aire limpio y atemperado, y en verano aire fresco pre-enfriado, mejorando tanto la eficiencia energética como el confort térmico de la vivienda.

²⁵Caloryfrio. (2024, 15 de enero).

5.2.2 Componentes principales del sistema

El sistema de recuperador de calor de doble flujo está formado por varios componentes fundamentales:

- Intercambiador de calor: Es el corazón del equipo. Suele ser un intercambiador de placas donde circulan en canales separados el aire caliente de extracción y el aire frío de impulsión. Las corrientes de aire pasan a través de finas láminas que permiten el intercambio térmico por conducción: el aire cálido cede calor a la superficie y este lo transfiere al aire frío del otro lado²⁶. Existen núcleos de distintos materiales (aluminio, plástico...) y configuraciones, pero todos cumplen la función de recuperar la energía térmica del aire saliente para precalentar o preenfriar el aire entrante. La carcasa del intercambiador suele estar bien aislada térmicamente para no perder calor hacia el exterior de la unidad, y es hermética para que no haya fugas de aire mezclando flujos.
- Ventiladores de impulsión y extracción: Son dos turbinas o ventiladores, típicamente de tipo centrífugo, integrados en la unidad de ventilación. Uno impulsa el aire fresco filtrado hacia la vivienda y otro simultáneamente extrae el aire viciado al exterior. Suelen llevar motores de alta eficiencia con control electrónico para ajustar el caudal. Mediante estos ventiladores se puede regular el equilibrio de caudales y las distintas modalidades de funcionamiento (por ejemplo, modo normal, modo intensivo cuando hay mucha ocupación, o modo mínimo en ausencias). Van montados sobre soportes antivibración dentro de una caja aislada para reducir el ruido transmitido.
- Red de conductos de ventilación: Un conjunto de conductos que distribuye el aire por toda la vivienda. Por un lado, está la red de impulsión de aire nuevo, desde la unidad recuperadora hacia las habitaciones secas y por otro la red de extracción, desde las zonas húmedas hasta la unidad. Estos conductos suelen ser de material aislado térmica y acústicamente para evitar pérdidas de calor y condensaciones, así como para minimizar ruidos. En los extremos de los conductos se instalan bocas de impulsión: rejillas o difusores

²⁶ Casas Pasivas Josman. (2018, 8 de junio).

por donde ingresa el aire limpio a cada estancia y bocas de extracción en techo o pared de baños y cocina para recoger el aire viciado de las zonas húmedas.

- Filtros de aire: Tanto en la admisión de aire exterior como en la extracción se instalan filtros para depurar el aire. Los filtros del lado de impulsión limpian el aire que entra de partículas como polvo, polen, insectos y contaminantes, protegiendo así la salud de los ocupantes y evitando que el intercambiador se ensucie²⁷.
- Batería de post-tratamiento hidrónica: Es un intercambiador adicional tipo agua-aire colocado normalmente en el conducto de impulsión, después del recuperador principal. Consiste en un pequeño radiador por el que puede circular agua caliente o fría proveniente de la bomba de calor de la vivienda. Su función es templar el aire de entrada si es necesario: en invierno, calentar unos grados el aire ya precalentado por el recuperador para alcanzar la temperatura de confort deseada; en verano, deshumidificarlo un poco si el sistema lo permite. Este componente amplía el control térmico sobre el aire de ventilación, actuando de apoyo a la climatización. Se entrará en detalle más adelante.
- Sensores y sistema de control: El recuperador de calor incorpora una placa de control electrónico que gestiona todo el sistema. Dispone de sensores de temperatura, en el exterior, en el retorno de aire interior y a la salida de impulsión. Por ejemplo, la unidad puede aumentar automáticamente la velocidad de ventilación si detecta mucha humedad, o reducirla al mínimo si la casa está desocupada. El control también acciona el bypass motorizado cuando conviene. Asimismo, regula la batería de post-tratamiento mediante una válvula de encendido y apagado o modulante para aportar calor o frío al aire según la consigna. Por último, el sistema de control avisa de filtros obstruidos, posibles averías y permite al usuario ajustar modos de funcionamiento. Todo ello asegura que el recuperador opere de forma óptima y adaptada a las necesidades de la vivienda en cada momento.

²⁷ Tecna. (2023, 10 de marzo).

5.2.3 Tipos de recuperadores de calor

Existen distintos tipos de recuperadores de calor de doble flujo, según el diseño del intercambiador y la forma en que circula el aire a través de él.

- Recuperadores de flujo cruzado: Las dos corrientes de aire se cruzan perpendicularmente dentro del intercambiador. El aire caliente y el aire frío fluyen a través de canales separados por placas que facilitan la transferencia de calor entre ambas corrientes. Son equipos constructivamente sencillos y fiables, con eficiencias típicas del orden del 70-80% en la recuperación de calor sensible. Suelen ser más económicos, aunque su rendimiento térmico es inferior a otros diseños más avanzados.
- Recuperadores de flujo paralelo: El aire de entrada y el de salida circulan en direcciones opuestas pero paralelas, a lo largo de un intercambiador alargado. Gracias a que las corrientes están en sentido contrario y en contacto prolongado a través de las placas, se logra una transferencia de calor muy eficiente. Pueden alcanzar eficiencias térmicas muy altas, de hasta 90-95% en la recuperación del calor²⁸. En la práctica, los intercambiadores a contraflujo son el estándar en casas de bajo consumo y pasivas, ya que maximizan el calor recuperado. Su construcción puede ser algo más voluminosa y costosa que los de flujo cruzado, pero ofrecen la mejor eficacia energética sin partes móviles.
- Recuperadores rotativos: Utilizan un rotor o rueda giratoria fabricada con material con alta capacidad térmica. Esta rueda gira alternadamente atravesando el flujo de aire caliente de extracción y luego el flujo de aire frío de admisión. En cada vuelta, el material poroso del rotor absorbe calor y humedad del aire caliente interior y, al girar, libera esa energía al aire frío exterior que entra. Así consigue transferir calor y parte de la humedad de forma continua. Los recuperadores rotativos tienen eficiencias medias (típicamente entre 70% y 85% en eficiencia sensible) y la ventaja de recuperar también algo de calor latente. Además, suelen permitir cierto control variando la velocidad de la rueda. Presentan partes mecánicas móviles (motor y rotor) que requieren mantenimiento, y existe una pequeña mezcla de aire entre ambas, lo cual puede conllevar transferencia de olores o contaminantes si no están

²⁸ Tecna. (s.f.).

bien diseñados. Aun así, son comunes en climatización industrial y algunas viviendas, especialmente cuando se busca también recuperar humedad²⁹.

- Recuperadores entálpicos: Se denomina entálpico al recuperador capaz de transferir no solo calor sensible (temperatura) sino también calor latente (humedad). Muchos recuperadores entálpicos son de tipo de flujo cruzado fabricados con un material especial (membrana de celulosa, resinas o polímeros) que deja pasar parte del vapor de agua de una corriente a otra, sin mezclar los gases. El resultado es que el aire entrante puede ceder y tomar humedad del aire saliente, lo cual es muy útil en climas extremos de humedad³⁰.

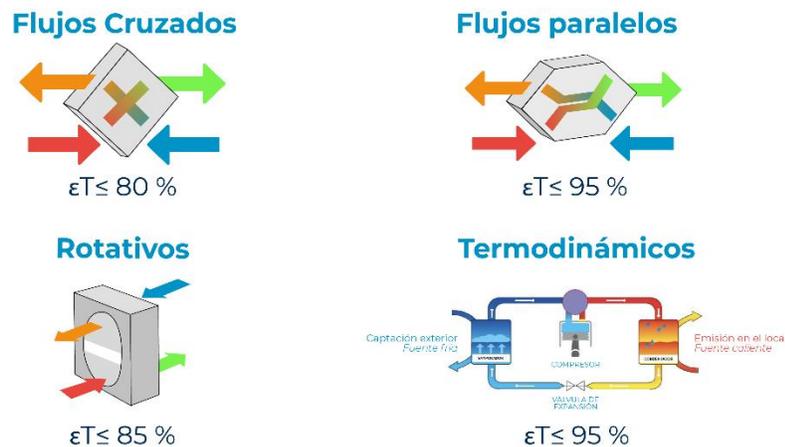


Figura 12. Tipos de recuperadores de calor

Para la vivienda en cuestión, se ha seleccionado un recuperador de calor de placas a contraflujo de alta eficiencia. Este tipo ofrece el mejor rendimiento térmico (ideal en el clima frío de Oviedo, donde interesa recuperar la mayor cantidad de calor posible del aire expulsado) y no tiene partes móviles, mayor fiabilidad y menor mantenimiento. El modelo de flujo cruzado habría resultado más sencillo pero se descarta por su menor eficacia energética, ya que el objetivo del diseño es maximizar la eficiencia.

²⁹ Tecna. (s.f.).

³⁰ Caloryfrio. (2024, 15 de enero).

5.2.4 Integración con la batería de post-tratamiento

Para complementar el sistema y asegurar el confort térmico absoluto, el diseño incluye una batería de post-tratamiento hidrónica en el conducto de aire de impulsión. Como se ha explicado, esta batería es esencialmente un pequeño intercambiador agua-aire por el que puede circular agua caliente o fría proporcionada por la bomba de calor de la vivienda. Su función es acondicionar adicionalmente el aire de ventilación cuando las condiciones exteriores son muy extremas o cuando se desea un control más preciso de la temperatura de suministro de aire. En invierno, cuando el aire exterior está muy frío, el recuperador de calor por sí solo precalentará el aire entrante hasta cerca de la temperatura interior, pero quizá no lo suficiente para alcanzar el confort óptimo en las habitaciones. Es allí donde actúa la batería hidrónica: calienta unos grados extra el aire impulsado hasta llevarlo a la temperatura deseada de impulsión, de modo que al entrar por las rejillas no genere ninguna sensación de corriente fría. En verano, si la bomba de calor es reversible y puede proveer agua fría, la misma batería puede usarse para refrescar ligeramente el aire de ventilación antes de que entre a la casa³¹.

La integración de esta batería hidrónica se diseñará de forma que trabaje coordinadamente con el recuperador de calor. La batería va situada en el tramo de impulsión después del intercambiador principal. Cuando los sensores detectan que la temperatura del aire de impulsión cae por debajo de un umbral establecido, el sistema de control abre una válvula que permite el paso de agua caliente de la bomba de calor a través del serpentín de la batería. El aire forzado a través de dicho serpentín se calienta rápidamente, elevando su temperatura hasta alcanzar la consigna programada. Una vez logrado, la válvula modulante puede cerrarse o ajustarse para mantener esa temperatura sin excederla. Esta regulación precisa asegura tanto el confort como la eficiencia, ya que la batería solo consume energía cuando hace falta.

³¹ Enertres. (s.f.).

La bomba de calor de la vivienda es la encargada de alimentar la batería hidrónica. En invierno provee agua caliente y en verano, si se usa para refrescar, suministraría agua enfriada. En nuestro caso, la batería actuará principalmente como apoyo para días fríos, manteniendo el confort, pero el sistema principal de calefacción de la vivienda seguirá siendo el sistema de radiadores, alimentado por la misma bomba de calor.

La regulación de esta batería hidrónica está integrada en el control del recuperador. Existe una sonda de temperatura ubicada tras la batería o en el propio conducto de impulsión, que retroalimenta al sistema. Lo más común es que la bomba de calor ya esté en funcionamiento para dar servicio de calefacción a la vivienda, manteniendo un circuito de agua caliente. Así, la batería de ventilación simplemente toma de ese mismo circuito mediante una derivación controlada.

5.2.5 Ventajas y desventajas del sistema

Implementar un recuperador de calor de doble flujo en la vivienda conlleva numerosos beneficios en términos de eficiencia y confort, pero también es importante considerar algunos inconvenientes asociados al sistema.

Ventajas:

- **Ahorro de energía en calefacción y refrigeración:** Al recuperar gran parte del calor del aire que se expulsa al ventilar, se reducen significativamente las pérdidas energéticas por ventilación. Esto se traduce en que el sistema de calefacción y refrigeración trabaja menos para mantener la temperatura interior, lo que supone un menor consumo y un menor gasto económico.
- **Confort térmico y ausencia de corrientes frías:** El sistema asegura una temperatura interior más estable. Al introducir siempre aire, se evitan las molestas corrientes frías o calientes que ocurren con la ventilación natural al abrir ventanas. Además, se evitan problemas de salud asociados a cambios bruscos de temperatura o a ambientes mal ventilados.
- **Mejor calidad de aire interior de forma continuada:** Un recuperador de calor garantiza una ventilación constante y controlada. Esto significa que la concentración de CO₂ se mantiene en niveles saludables y se eliminan de manera continua los olores, el exceso de humedad

y los contaminantes³². En una zona húmeda como Oviedo, la ventilación constante ayuda a prevenir condensaciones y moho, manteniendo la vivienda en mejores condiciones higiénicas. Todo esto redundará en un aumento del bienestar y puede mejorar la salud respiratoria de los ocupantes.

- Reducción de ruidos externos y mejora del aislamiento: Al contar con ventilación mecánica, ya no es necesario abrir las ventanas con frecuencia para ventilar, lo que conlleva un beneficio añadido: se mantienen cerradas las puertas y ventanas, mejorando el aislamiento acústico respecto al exterior.
- Eficiencia energética global y sostenibilidad: La recuperación de calor se alinea con los objetivos de eficiencia energética y reducción de emisiones. Al gastar menos energía en climatización, la vivienda reduce su huella de carbono y cumple más fácilmente con normativas actuales de ahorro energético ya que reduce las emisiones de CO₂ asociadas a la calefacción³³. Además, la inversión en el recuperador suele revalorizar la vivienda y puede amortizarse a medio plazo con el ahorro en costos de energía.

Desventajas:

- Inversión inicial y complejidad de instalación: La incorporación de un recuperador de calor conlleva un coste inicial notable. El equipo en sí, más la red de conductos, accesorios y la mano de obra de instalación representan una inversión significativa, superior a la de un sistema de ventilación convencional o simplemente abrir ventanas. Además, la instalación requiere espacio físico: hace falta un lugar para ubicar la unidad de ventilación (por ejemplo un falso techo, trastero o sala técnica) y espacio para pasar los conductos por toda la casa.
- Mantenimiento periódico obligatorio: A diferencia de la ventilación natural, un sistema mecánico requiere ciertos cuidados. Principalmente, los filtros deben cambiarse o limpiarse regularmente. Asimismo, cada cierto tiempo conviene revisar y limpiar los conductos y el propio intercambiador de calor para eliminar polvo acumulado.
- Consumo eléctrico constante: Los dos ventiladores del recuperador funcionan las 24 horas del día moviendo el aire, lo que implica un consumo de electricidad continuo. Aunque los

³² Casas Pasivas Josman. (2018, 8 de junio).

³³ Soler & Palau. (2020, 28 de septiembre).

equipos modernos son muy eficientes y el gasto eléctrico es reducido, no deja de ser un consumo añadido a la vivienda.

- Operación y uso adecuado: El uso de un recuperador de calor implica cambiar ligeramente la forma en que se ventila la casa. Para que cumpla su función, es recomendable mantener ventanas cerradas la mayor parte del tiempo y dejar que sea el sistema quien renueve el aire. Por tanto, se requiere cierta concienciación y ajuste de hábitos: ventilar principalmente de forma mecánica y usar las ventanas solo puntualmente.

Capítulo 6. Diseño del sistema de ventilación con recuperador de calor

6.1 Introducción y justificación normativa

En este capítulo se aborda el diseño del sistema de ventilación mecánica con recuperador de calor para la vivienda unifamiliar. La ventilación adecuada de los espacios habitados es esencial para garantizar la salubridad del aire interior y el confort de los ocupantes. La normativa vigente refleja esta importancia: el *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)* y el *Código Técnico de la Edificación (CTE)* establecen requisitos mínimos de calidad del aire interior y obligan a disponer medios de ventilación en las viviendas. En particular, la sección HS3 del CTE (Calidad del aire interior) exige que los edificios dispongan de medios de ventilación que aporten un caudal suficiente de aire exterior y garanticen la extracción del aire viciado. Esto implica renovar el aire interior con la frecuencia necesaria para eliminar contaminantes, humedad excesiva y CO₂ generado por ocupantes, evitando problemas de salud y confort.

La normativa también especifica la dirección de los flujos de aire en una vivienda: “*El aire debe circular desde los locales secos a los húmedos*”. Es decir, las estancias denominadas locales secos (salones, dormitorios y otras zonas de estar) deben recibir el aire nuevo (impulsión), y los locales húmedos (cocinas, baños, aseos, lavaderos) deben ser los puntos de extracción del aire viciado. Para asegurar esta circulación, las particiones entre locales secos y húmedos deben incorporar aberturas de paso (por ejemplo, bajo puertas o rejillas de transferencia) que permitan el flujo de aire de unos espacios a otros. De este modo, el aire fresco impulsado en salas y dormitorios atraviesa la vivienda y arrastra los contaminantes hacia las zonas húmedas, donde es extraído al exterior.

Además de los requerimientos de salubridad, el RITE pone énfasis en el aprovechamiento de la energía en los sistemas de ventilación. En instalaciones de climatización con grandes caudales de aire expulsado, es obligatoria la incorporación de sistemas de recuperación de calor en el aire de

extracción para mejorar la eficiencia energética.³⁴ Si bien en viviendas unifamiliares de tamaño medio los caudales de ventilación son menores (y por tanto no siempre obligan por RITE a instalar recuperadores), su uso está altamente recomendado. Un recuperador de calor permite reducir las pérdidas térmicas debidas a la ventilación en climas fríos o templados, repercutiendo en un menor consumo de calefacción y una mejora de la eficiencia global del edificio. En resumen, desde el punto de vista normativo y técnico, se justifica la adopción de un sistema de ventilación mecánica controlada con recuperador de calor para cumplir las exigencias de calidad de aire interior (CTE HS3) y eficiencia energética (RITE, CTE HE). A continuación, se describirá el sistema propuesto, sus componentes, y se detallará el proceso de cálculo y dimensionado específico para esta vivienda.

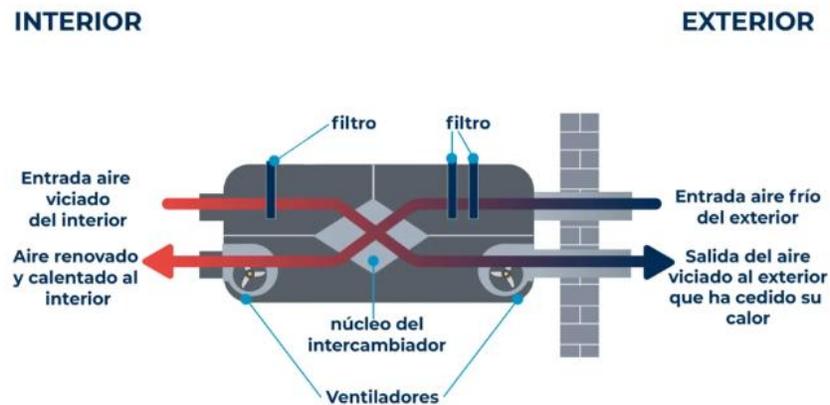


Figura 13 Esquema de funcionamiento de recuperador de calor

Dado que el objetivo es recuperar energía del aire expulsado (minimizando las pérdidas térmicas), se opta por un sistema de doble flujo con recuperador de calor que simultáneamente extraiga el aire viciado e impulse aire nuevo precalentado, equilibrando caudales de impulsión y extracción.

³⁴ Siber Zone, S.L.U. (2024, mayo 16).

6.2 Cálculo de los caudales de ventilación según CTE DB HS3

Para diseñar el sistema, en primer lugar se determinan los caudales mínimos de ventilación exigidos por la normativa para esta vivienda. El CTE DB HS3 (Calidad del aire interior) especifica caudales de aire fresco mínimos en función del tipo de local y su uso (ventilación de caudal constante en viviendas). En términos generales, para una vivienda unifamiliar, los criterios del CTE establecen unos caudales de impulsión mínimos en los locales habitables (secos), habitualmente en torno a 8–10 litros por segundo (L/s) por persona, y caudales de extracción mínimos en locales húmedos del orden de 8 L/s por cada local como base (pudiendo incrementarse en cocinas o baños grandes, o reducirse si hay sistemas específicos como campanas extractoras de cocina).

En este caso, la vivienda dispone de varias habitaciones y cuartos húmedos. Asumiendo una ocupación simultánea de 6 personas (familia numerosa) distribuida en los dormitorios y considerando también estancias como salón-comedor, se aplican las tasas de ventilación recomendadas por HS3. De acuerdo a dichas pautas, en el proyecto previo se estimó un caudal total de aire nuevo necesario en los locales secos de 54 L/s, equivalente a aproximadamente 194,4 m³/h, para garantizar la ventilación adecuada de todas las estancias habitables. Por otra parte, sumando los requerimientos de los locales húmedos, se obtuvo un caudal mínimo de extracción de 32 L/s (unos 115,2 m³/h) para evacuar el aire viciado de esas zonas.

Estos valores se han obtenido considerando, un caudal de 8 L/s para cada baño o aseo, y un caudal base en la cocina en torno a 8 L/s (dado que la cocina cuenta con campana extractora independiente para la ventilación reforzada durante la cocción). En total, la vivienda cuenta con varios baños y aseos, aunque únicamente los principales han sido considerados para la ventilación continua mecánica para alcanzar los 32 L/s (algunos baños poco usados o secundarios podrían ventilarse de forma natural si existieran ventanas, complementando la ventilación forzada principal). Del lado de la impulsión, se ha considerado caudal para los dormitorios (asignando caudal proporcional a su ocupación estimada) y para el espacio de salón-comedor, de modo que la suma alcance los 54 L/s en total de aire suministrado a la vivienda.

Es importante notar que en los sistemas de doble flujo los caudales de aire impulsado y extraído deben ser iguales para un correcto funcionamiento y equilibrio del sistema. Sin embargo, según los mínimos normativos calculados, en esta vivienda el caudal total de impulsión requerido (54 L/s) supera al de extracción (32 L/s). Este desequilibrio inicial es común en viviendas, ya que suele haber más volumen habitable que número de locales húmedos. La solución de diseño consiste en aumentar ligeramente los caudales de extracción por encima del mínimo en algunos locales húmedos hasta igualar el caudal de impulsión. En otras palabras, se ventilará un poco más de lo estrictamente exigido en baños y/o cocina, para lograr un caudal total extraído igual a 54 L/s. Este ajuste garantiza que la unidad recuperadora trabaje en equilibrio (misma cantidad de aire entrando y saliendo), evitando presiones diferenciales en la vivienda. El incremento de caudal de extracción en cada punto húmedo se realiza dentro de márgenes razonables (pasando de 8 L/s normativos a 13–14 L/s reales en cada baño), lo cual sigue siendo seguro y beneficioso para la calidad de aire, a la vez que permite alcanzar el caudal de diseño equilibrado de 54 L/s en impulsión y 54 L/s en extracción.

6.3 Selección del recuperador de calor y rendimiento esperado

Conocido el caudal de diseño (195 m³/h), se procede a seleccionar un recuperador de calor adecuado. Se elige el modelo Aldes InspirAIR Side 240 Classic, cuyo punto de funcionamiento nominal es de 240 m³/h. La razón de sobredimensionar ligeramente el equipo (240 m³/h > 195 m³/h) es no operar al límite de su curva de rendimiento. Un margen de capacidad asegura que el equipo pueda suministrar el caudal requerido sin forzar los ventiladores, mejorando la eficiencia y vida útil, y manteniendo un nivel sonoro reducido. En otras palabras, al trabajar alrededor del 80% de su capacidad máxima, el recuperador puede compensar mejor posibles pérdidas de carga adicionales o desequilibrios, garantizando el caudal de diseño en todo momento. Este criterio de selección preventiva busca fiabilidad operativa: el modelo de 240 m³/h cubrirá holgadamente los 195 m³/h necesarios sin quedar “ahogado” y dejando capacidad sobrante para picos de demanda o futuros ajustes.

Grupo de purificación de aire y de ventilación doble flujo

11023446

InspirAIR® Side 240 Classic Modbus Derecha

Solución de ventilación doble flujo y filtración de aire conectada que late al ritmo de la vida de los ocupantes.



InspirAIR® Side 240 Classic Modbus Derecha

Figura 14 Modelo seleccionado de recuperador de calor

El modelo Aldes InspirAIR Side 240 Classic cuenta con un intercambiador de calor sensible, capaz de recuperar hasta un 85–90 % del calor del aire extraído, según la norma EN 13141-7 / EN 308. Esta eficiencia permite reducir significativamente las pérdidas térmicas debidas a la ventilación, garantizando confort térmico y ahorro energético durante todo el año.

Según las normas de ensayo EN 308 y EN 13141-7, la eficiencia térmica sensible del recuperador se determina midiendo el calor transferido en condiciones estándar de laboratorio: aire exterior a 5 °C y aire interior a 25 °C, ambos secos (HR < 20 %). En estas condiciones, el Aldes InspirAIR Side 240 Classic alcanza una eficiencia de hasta 90 %, lo que significa que el aire nuevo puede entrar a más de 22–23 °C', reduciendo significativamente la carga de calefacción necesaria.³⁵

³⁵ Aldes. (2023). *InspirAIR Side 240 Classic – Ficha técnica (Ref. 11023310)*.

6.4 Presión estática disponible e importancia en la red

Un factor crítico en el diseño es la presión estática disponible que proporciona el recuperador (es decir, la presión que sus ventiladores pueden ejercer para mover el aire a través de los conductos). La presión estática disponible, usualmente expresada en Pascales (Pa), es la capacidad del ventilador para vencer las caídas de presión en la red de conductos.³⁶ En la práctica, esto significa que el ventilador debe generar suficiente presión para superar la pérdida de carga debida a la fricción en los conductos, los filtros, rejillas, codos y demás elementos del sistema. Si la pérdida de carga total del circuito excede la presión que el ventilador puede aportar, el caudal real que circula se verá reducido por debajo del valor de diseño, comprometiendo la ventilación higiénica exigida. Por lo tanto, asegurar que la presión estática disponible del equipo es mayor o igual que la pérdida de carga de la instalación es imprescindible para cumplir con la tasa de renovación de aire del CTE HS3. En resumen, el recuperador seleccionado debe proporcionar la presión suficiente para que el aire recorra toda la red (ida y retorno) y alcance cada estancia; de lo contrario, no se garantizaría el caudal de 195 m³/h en todos los puntos de la vivienda.

³⁶ Eurovent Certification. (s.f).

6.5 Planos de distribución de conductos y cálculo de pérdidas de carga

Para visualizar la solución adoptada, en la figura de la izquierda se presenta el plano de la planta de arriba de la vivienda con la distribución de los conductos de ventilación, mientras que la figura de la derecha muestra la planta baja con su correspondiente red de conductos. En dichos planos se ha diferenciado la red de impulsión de aire nuevo (que lleva el aire filtrado y atemperado desde el recuperador hasta los locales secos, como dormitorios y salón), en color verde, y la red de extracción de aire viciado (que recoge el aire desde cocina, baños y zonas húmedas para llevarlo de regreso al recuperador de calor), en color naranja. Las trazas indican la ubicación de los conductos principales que discurren por los falsos techos de cada nivel, así como las derivaciones hacia las distintas estancias y las posiciones de las bocas de impulsión y extracción. Estas figuras sirven como referencia visual para entender el recorrido del aire: por ejemplo, en la primera figura se aprecia cómo los conductos de impulsión distribuyen aire a los dormitorios de la planta alta, mientras que los de extracción recogen el aire de los baños en esa misma planta; en la segunda, de forma análoga, se muestra la red que cubre las estancias de la planta baja (salón, cocina, aseos, etc.). Esta representación en planos es fundamental para calcular longitudes de conducto, número de codos, accesorios y en general para el cálculo de pérdidas de carga que se detalla a continuación.

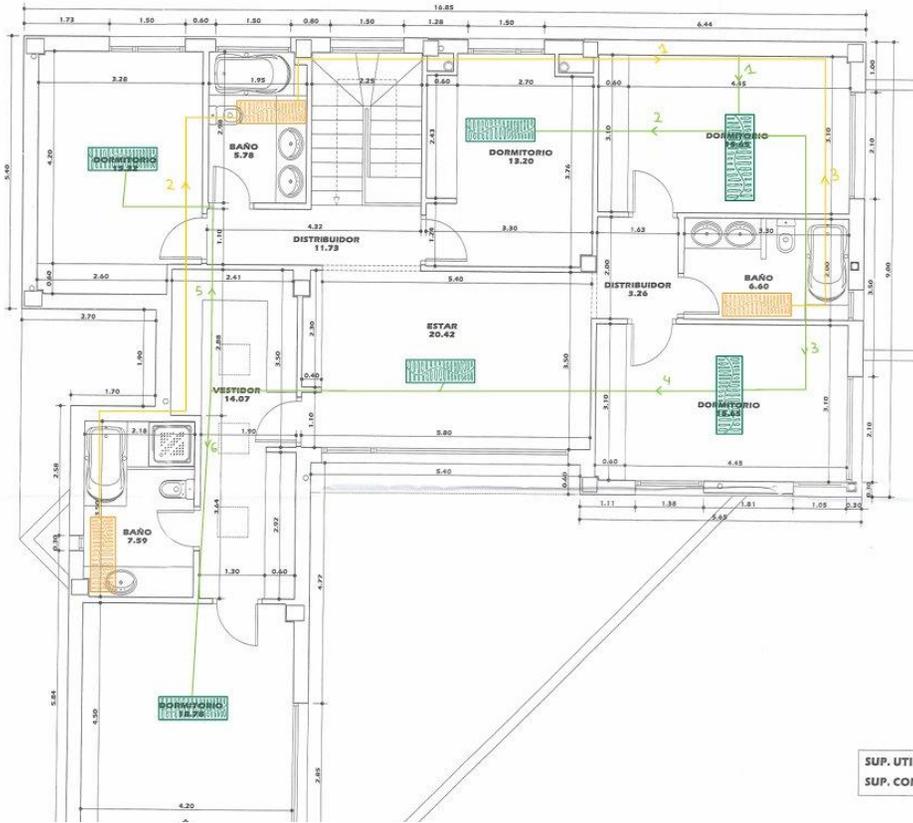


Figura 16 Red de conductos Planta de Arriba

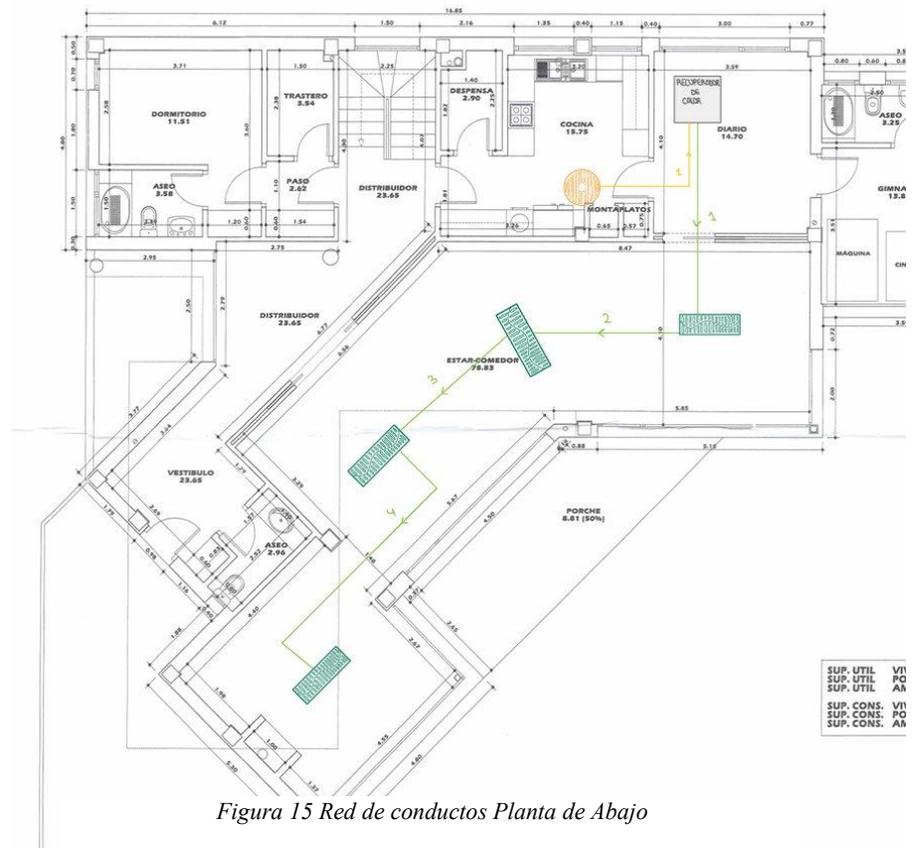


Figura 15 Red de conductos Planta de Abajo

Con la geometría de la red definida en planos, se procede a calcular las pérdidas de carga de cada circuito de conductos (tanto del lado de impulsión como del de extracción). Se considera cada circuito como el recorrido completo desde el equipo hasta el punto más desfavorable de la red (por ejemplo, el tramo más largo de impulsión hasta la rejilla más alejada, y análogamente el tramo de extracción más largo hasta el equipo). El resultado de estos cálculos se resume en la siguiente figura, que muestra una tabla con las pérdidas de carga calculadas para cada circuito principal. En dicha tabla se indican, para cada ramal crítico, la longitud equivalente total, la pérdida de carga unitaria asumida y la pérdida de presión total resultante en Pascales.

Se obtiene una pérdida de carga del orden de 153 Pa en el circuito de impulsión más desfavorable, mientras que en el circuito de extracción más largo la pérdida acumulada es mayor, alrededor de 209 Pa (debido a un recorrido más complejo y posiblemente a elementos como filtros de extracción adicionales). Estos valores serán fundamentales para contrastar la capacidad del recuperador seleccionado, asegurando que sus ventiladores pueden superar dichas pérdidas.

Conductos de aire Impulsion Abajo																						
Tramo	Caudal	Caudal	Longitud	Velocidad	Área	Forma de la sección (circular, cuadrada,)	Diámetro hidráulico	Reynolds	Material	Rugosidad	f (coeficiente de)	Densidad aire	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga secundaria	Pérdida de carga total	Caudal por rejilla	Altura o ancho rejilla	Largo rejilla	Alcance rejilla	Pérdida de carga rejilla	Presión total tramo
	[m ³ /h]	[m ³ /s]																				
1	71	0,02	3,00	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	5,10	0,00	5,10	22	200	0,070		17,0	39,1
2	49	0,01	2,50	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	4,25	0,00	4,25	22	200	0,070		17,0	38,3
3	27	0,01	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	0,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
4	5	0,00	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	1,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
Presión ventilador [Pa]:																					153	

Conductos de aire Impulsion Arriba																						
Tramo	Caudal	Caudal	Longitud	Velocidad	Área	Forma de la sección (circular, cuadrada,)	Diámetro hidráulico	Reynolds	Material	Rugosidad	f (coeficiente de)	Densidad aire	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga secundaria	Pérdida de carga total	Caudal por rejilla	Altura o ancho rejilla	Largo rejilla	Alcance rejilla	Pérdida de carga rejilla	Presión total tramo
	[m ³ /h]	[m ³ /s]																				
1	123	0,03	6,00	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	10,21	0,00	10,21	22	200	0,070		17,0	44,2
2	13	0,00	2,50	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	4,25	0,00	4,25	22	200	0,070		17,0	38,3
3	101	0,03	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	0,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
4	79	0,02	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	1,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
5	40	0,01	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	2,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
6	18	0,00	2,30	4,00	0,014	rectangular	0,134	35461	STEEL	30	0,0237	1,2	1,70	3,91	3,00	3,91	22	200	0,070		17,0	37,9
Presión ventilador [Pa]:																					152	

Conductos de aire Extraccion Abajo																						
Tramo	Caudal	Caudal	Longitud	Velocidad	Área	Forma de la sección (circular, cuadrada,)	Diámetro hidráulico	Reynolds	Material	Rugosidad	f (coeficiente de)	Densidad aire	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga secundaria	Pérdida de carga total	Caudal por rejilla	Altura	Largo rejilla	Alcance rejilla	Pérdida de carga rejilla	Presión total tramo
	[m ³ /h]	[m ³ /s]																				
1	94	0,03	2,50	4,00	0,007	Circular	0,091	24246	STEEL	30	0,0260	1,2	2,74	6,84	0,00	6,84	10	125	225,000	3,0	3,0	12,8
Presión ventilador [Pa]:																					13	

Conductos de aire Extraccion Arriba																						
Tramo	Caudal	Caudal	Longitud	Velocidad	Área	Forma de la sección (circular, cuadrada,)	Diámetro hidráulico	Reynolds	Material	Rugosidad	f (coeficiente de)	Densidad aire	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga primaria	Pérdida de carga secundaria	Pérdida de carga total	Caudal por rejilla	Ancho	Largo rejilla	Alcance rejilla	Pérdida de carga rejilla	Presión total tramo
	[m ³ /h]	[m ³ /s]																				
1	83	0,02	8,58	4,00	0,006	Rectangular	0,086	22775	STEEL	30	0,0264	1,2	2,96	25,39	0,00	25,39	10	70	400,000		11,0	47,4
2	19,64	0,01	10	4	0,001	Rectangular	0,042	11069	STEEL	30	0,0317	1,2	7,29	72,93	1,00	72,93	10	70	400		11	94,9
3	16,99	0,00	5,6	4	0,001	Rectangular	0,039	10295	STEEL	30	0,0322	1,2	7,98	44,72	2,00	44,72	10	70	400		11	66,7
Presión ventilador [Pa]:																					209	

Figura 17 Cálculo de pérdida de carga de la red de conducto

Otro aspecto importante en el dimensionamiento es la velocidad del aire en los conductos, ya que influye tanto en las pérdidas de carga como en el nivel de ruido generado. Por normativa y buenas prácticas de climatización, se han tomado como referencia los siguientes criterios:

- El Código Técnico de la Edificación (CTE) en su documento HS3, así como guías técnicas de ventilación, establecen que en entornos residenciales la velocidad del aire en los conductos próximos a estancias habitables no debe ser elevada, utilizándose típicamente un máximo de 4 m/s para evitar ruidos y corrientes de aire molestas.³⁷ En la práctica común, se considera 4 m/s como límite de diseño en viviendas.
- Por su parte, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) y publicaciones del IDAE recomiendan mantener la velocidad por debajo de 6 m/s incluso en tramos principales, para garantizar un funcionamiento silencioso y eficiente del sistema. Velocidades superiores a 6 m/s pueden provocar turbulencias y ruido aerodinámico significativo, además de mayores pérdidas de carga por fricción.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha adoptado una velocidad de diseño de 4 m/s en los conductos principales de la vivienda. Este valor representa un compromiso equilibrado: por un lado asegura un nivel sonoro bajo (dentro de las estancias no se percibirá ruido de aire en movimiento) y minimiza las pérdidas de presión por fricción; por otro lado, permite que el diámetro o sección de los conductos no sea excesivamente grande (lo que facilita su instalación en el espacio disponible). En síntesis, 4 m/s cumple con las limitaciones normativas de CTE para zonas habitables y sigue las recomendaciones del RITE e IDAE para confort acústico, garantizando a la vez una red de conductos razonable en tamaño y rendimiento.

El cálculo de las pérdidas de carga en la red se ha realizado aplicando la fórmula de Darcy–Weisbach, ampliamente utilizada en mecánica de fluidos para cuantificar la pérdida de presión debida a la fricción en tuberías o conductos.

³⁷ Soler & Palau. (s.f.).

La expresión general de Darcy–Weisbach es:

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

Ecuación 1 Expresión de Darcy-Weisbach

Donde f es el factor de fricción (adimensional, dependiente del régimen de flujo y la rugosidad del conducto), L es la longitud del conducto, D_h su diámetro hidráulico, ρ la densidad del aire, y v la velocidad media del aire en el tramo considerado. Esta fórmula indica que la pérdida de presión por rozamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad del aire. En consecuencia, aumentos en la velocidad tienen un impacto cuadrático en la pérdida de carga: por ejemplo, si se duplica la velocidad, la pérdida de presión se incrementa aproximadamente al cuádruple (manteniendo demás parámetros constantes). Este hecho refuerza la decisión de limitar la velocidad a 4 m/s, ya que velocidades mayores dispararían las pérdidas de carga y exigirían ventiladores más potentes. Durante el diseño, se aplicó esta ecuación a cada tramo, sumando las pérdidas continuas y singulares. Adicionalmente, se verificó el régimen de flujo (Reynolds) para confirmar la validez del factor de fricción utilizado en cada caso, aunque tratándose de aire en conductos de ventilación, normalmente el flujo es turbulento y se emplean factores de fricción de rugosidad relativa conocida según la literatura técnica.

6.6 Selección y características de los conductos

En este proyecto se optó por instalar conductos de sección rectangular fabricados en chapa de acero galvanizado. La elección de conductos rectangulares responde principalmente a motivos de espacio y disposición en falsos techos: su diseño plano y bajo permite un mejor aprovechamiento del espacio disponible en el techo técnico, a diferencia de conductos circulares de diámetro equivalente. En viviendas, donde la altura de los falsos techos es limitada, los conductos rectangulares pueden acomodarse más fácilmente sin invadir o bajar en exceso la altura libre de las estancias. Además, estos conductos cuentan con accesorios modulares (curvas planas, derivaciones en T, reducciones rectangulares, etc.) que facilitan adaptarse a trazados complejos manteniendo la estanqueidad y eficiencia del sistema.³⁸

En cuanto al material, la chapa de acero galvanizado es estándar en instalaciones de ventilación por su robustez, resistencia a la corrosión y buen comportamiento frente al fuego. Para los cálculos de pérdida de carga, se consideró una rugosidad absoluta del orden de 30 μm para la superficie interna de los conductos (valor típico para chapa galvanizada nueva). Una rugosidad baja como esta ayuda a mantener el factor de fricción en valores moderados, reduciendo la pérdida de presión por fricción. Los conductos seleccionados cumplen con las normativas aplicables (EN 12237, EN 1506 y RITE) en cuanto a estanqueidad (clase C) y resistencia mecánica, garantizando que soportarán las presiones de operación previstas (en nuestro caso, del orden de 200–300 Pa como máximo, bien dentro de los límites admisibles para conductos de acero galvanizado).

En resumen, la red de conductos rectangular de acero galvanizado ofrece adaptabilidad al espacio disponible, baja pérdida de carga gracias a su adecuada dimensión y acabado interno, y durabilidad, asegurando el correcto suministro y retorno de aire en todo el sistema de ventilación.

³⁸ Veinsa. (s.f.).

6.7 Curva de funcionamiento del recuperador Aldes 240

Una vez definidos el caudal de diseño y las pérdidas de carga de la red, es importante comprobar la curva de funcionamiento del recuperador seleccionado (Aldes InspirAIR Side 240 Classic) para verificar que puede operar en el punto requerido. Se muestra la curva característica del equipo, proporcionada por el fabricante. En dicha gráfica, el eje horizontal representa el caudal de aire (m^3/h) y el eje vertical la presión estática disponible (Pa) que pueden alcanzar los ventiladores integrados. El equipo de doble flujo dispone de dos ventiladores centrífugos EC, uno para impulsión (suministro de aire fresco) y otro para extracción (retorno de aire viciado), por lo que la ficha técnica del fabricante típicamente incluye dos curvas de presión: la curva de *impulsión* (a veces denominada insuflación) y la curva de *extracción*. Cada curva muestra cómo varía la presión disponible en función del caudal para ese ventilador. Adicionalmente, suelen incorporarse en el gráfico curvas de consumo eléctrico de los ventiladores, aunque el foco aquí está en las curvas de presión-caudal.

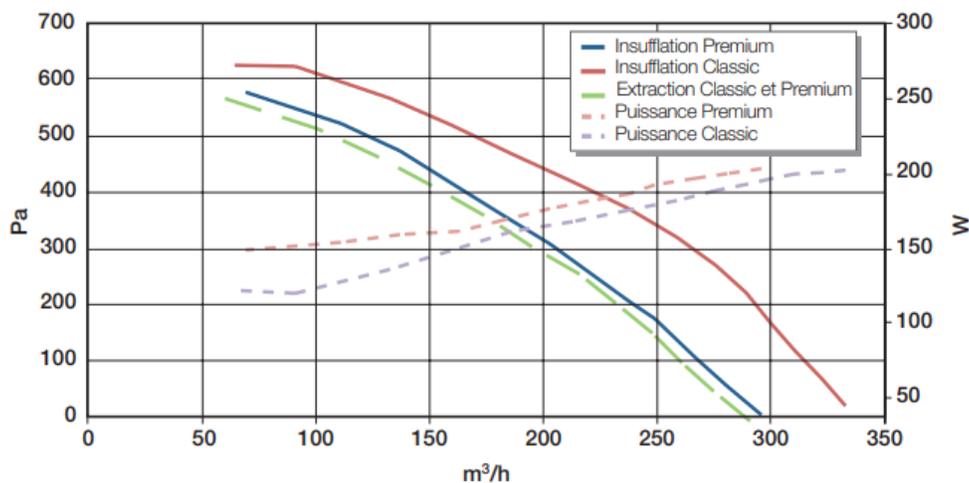


Figura 18 Curva de funcionamiento Aldes 240

Tal como se aprecia en la curva del ventilador de impulsión, a un caudal del orden de nuestro diseño (195 m³/h) el equipo es capaz de proporcionar alrededor de 420 Pa de presión estática disponible para impulsar el aire. Como consideraremos un caudal ligeramente mayor, de 220 m³/h, la presión disponible en impulsión rondaría unos 410 Pa, según la pendiente de la curva de impulsión. Estas cifras concuerdan con la pérdida de carga calculada para la red de impulsión de 153 Pa en la planta de abajo y de 152 Pa en la planta de arriba, lo que significa que el ventilador de impulsión tiene suficiente presión para vencer la resistencia del circuito sin necesidad de operar al máximo. Por su parte, la curva del ventilador de extracción se sitúa ligeramente por debajo, ya que el ventilador extractor en este modelo puede alcanzar presiones algo menores. A 195 m³/h, la presión disponible en extracción es de alrededor de 300 Pa, lo cual cubre holgadamente la pérdida de carga estimada en el circuito de retorno en la planta de debajo de 13 Pa y en la planta de arriba de 209 Pa. De hecho, a 220 m³/h el ventilador de extracción entregaría cerca de 250 Pa, llegando cerca del límite de la pérdida de carga de retorno, pero dentro de rango aceptable de funcionamiento.

En conclusión, la combinación de caudal y presión requerida se encuentra dentro de la envolvente de funcionamiento del Aldes 240 Classic. Dicho recuperador puede trabajar en el punto de operación deseado con un margen de presión remanente, lo que asegura que las variaciones menores (suciedad de filtros, pequeñas modificaciones en la red, etc.) no impedirán alcanzar el caudal objetivo. Por lo que, el equipo está correctamente seleccionado, operando en la zona óptima de su curva (ni muy cerca de caudal cero con exceso de presión, ni al extremo de caudal máximo sin presión).

Tal y como se aprecia en dichas curvas, para el caudal de diseño de aproximadamente la potencia eléctrica requerida por el conjunto de ventiladores se sitúa en torno a los 160 W, valor coherente con la potencia máxima indicada por el fabricante de 183 W. Considerando un funcionamiento continuo durante todo el año (8.760 h), se obtiene un consumo anual en torno a 1.400 kWh.

La ventilación de una vivienda conlleva unas pérdidas térmicas que incrementan la demanda de calefacción. Sin embargo, mediante la incorporación de un sistema de recuperación de calor es posible reducir de forma notable esta fracción de la demanda. La magnitud de dicha reducción depende principalmente del caudal de aire de ventilación y de la eficiencia del recuperador. A

continuación se presentan las expresiones empleadas para cuantificar la disminución de la demanda de calefacción debida al uso del recuperador.

Partiendo de los resultados del proyecto previo, las pérdidas anuales por ventilación ascienden a 33.187,93 kWh/año y las pérdidas por transmisión de la envolvente a 28.325,81 kWh/año (un total de 61.513,73). Para evaluar el efecto del recuperador de calor, se adopta una eficiencia estacional del 80 %, más representativa del funcionamiento real que la eficiencia máxima de catálogo.

Adoptando ese valor de eficiencia estacional, la fracción de pérdidas por ventilación se reduce en un 80 %, pasando de 33.187,93 a 6.637,59 kWh/año. En consecuencia, las pérdidas totales anuales disminuyen de 61.513,73 a 34.963,39 kWh/año, lo que supone un ahorro absoluto de 26.550,34 kWh/año y un ahorro relativo del 43,16 % sobre las pérdidas brutas, y por lo tanto, sobre la demanda de calefacción en la vivienda hasta 21.591,58 kWh anuales.

6.8 Distribución de bocas de impulsión y extracción

La distribución de las bocas de ventilación se ha proyectado siguiendo el criterio habitual de locales secos y húmedos, respetando el equilibrio de caudales previamente calculado para la vivienda. En resumen:

- En cada habitación o zona seca (dormitorios, salón-comedor), se instalará al menos una boca de impulsión de aire nuevo.
- En cada local húmedo (baños, aseos, cocina), se dispondrá una boca de extracción, conectada al circuito de retorno hacia el recuperador.

Para esta instalación se han elegido rejillas del tipo SDRF del fabricante TROX con una disposición tal y como se mostraba en los planos de cada planta, tanto para impulsión como para extracción, por sus siguientes ventajas:

- Diseño compacto y estético
- Bajo nivel sonoro incluso a caudales moderados
- Facilidad de integración en falsos techos
- Ensayo conforme a normativa EN 13141

Se han seleccionado específicamente los siguientes modelos:

Difusores de impulsión:

Tamaño	B x H	Q m ³ /h	L _{WA} dB(A)	ΔP Pa	L (m) V _L = 0,15 m/s	L (m) V _L = 0,20 m/s	L (m) V _L = 0,25 m/s
SDRF-1	Ø 80	10	25	17	0,58	0,45	0,34
		12	30	24	0,61	0,51	0,38
		15	35	34	0,76	0,58	0,48
SDRF-2	200 x 70	19	25	12	0,62	0,59	0,46
		22	30	17	0,65	0,67	0,51
		27	35	28	0,78	0,71	0,62

Figura 19 Características de SDRF-2

Difusores de retorno:

Tamaño	B x H	Q m ³ /h	L _{WA} dB(A)	ΔP Pa	L (m) V _L = 0,15 m/s	L (m) V _L = 0,20 m/s	L (m) V _L = 0,25 m/s
SDRF-1	Ø 80	10	25	17	0,58	0,45	0,34
		12	30	24	0,61	0,51	0,38
		15	35	34	0,76	0,58	0,48
SDRF-2	200 x 70	19	25	12	0,62	0,59	0,46
		22	30	17	0,65	0,67	0,51
		27	35	28	0,78	0,71	0,62
SDRF-3	300 x 70	27	25	12	0,64	0,61	0,52
		30	30	17	0,73	0,66	0,61
		38	35	25	0,79	0,73	0,64
SDRF-4	400 x 70	36	25	11	0,65	0,63	0,56
		46	30	15	0,75	0,68	0,63
		51	35	22	0,82	0,75	0,67
SDRF-5	500 x 70	46	25	10	0,68	0,65	0,61
		51	30	13	0,77	0,71	0,67
		65	35	20	0,84	0,77	0,76
SDRF-6	500 x 70	53	25	8	0,71	0,67	0,63
		65	30	13	0,79	0,75	0,71
		76	35	18	0,88	0,82	0,78

Figura 20 Características SDRF-4

La elección se ha realizado en base a los caudales parciales previstos por estancia, asegurando que cada boca trabaje dentro de su rango óptimo. Estos modelos permiten mantener velocidades de aire bajas en la salida (2–3 m/s), lo que evita ruidos molestos y mejora el confort.

Además, las rejillas SDRF permiten incorporar regulación manual de caudal (con difusor interior ajustable), lo que facilita el equilibrado del sistema durante la puesta en marcha.

Por último, se garantizará la presencia de aberturas de paso entre locales secos y húmedos, tal como exige la norma. Esto se logra dejando un retorno de aire mediante rejillas de transferencia en puertas o un resquicio bajo las puertas (de 1 a 2 cm de espacio libre) que permita al aire fluir desde las habitaciones hacia los pasillos y de estos hacia baños/cocina. Sin estas aberturas, el circuito de ventilación no se cerraría correctamente y podrían generarse sobrepresiones locales.

6.10 Recomendaciones finales

Finalmente, se presentan algunas recomendaciones de diseño e instalación para optimizar el rendimiento del sistema de ventilación con recuperador de calor:

- Minimizar codos cerrados: Evitar en la red los codos a 90° de radio pequeño o codos en ángulo recto pronunciado. Es preferible utilizar curvas amplias o codos redondeados que reduzcan la pérdida de carga asociada al cambio de dirección del flujo.
- Aumentar diámetros si es posible: Siempre que la arquitectura lo permita, emplear conductos de mayor sección para disminuir la velocidad del aire. Un diámetro (o lado de conducto rectangular) mayor conlleva menor velocidad para el mismo caudal, reduciendo pérdidas por fricción y ruido. Alternativamente, usar derivaciones paralelas para repartir el caudal entre dos conductos en lugar de uno solo, cuando un único conducto deba transportar un caudal muy grande; esto equilibra el flujo y disminuye la resistencia.
- Evitar empalmes y tramos innecesarios: Reducir al mínimo las uniones, transiciones bruscas o accesorios superfluos en la red de conductos. Cada empalme, conexión o cambio repentino de sección introduce turbulencias y posibles fugas, incrementando la pérdida de carga y afectando la estanqueidad. Mantener un trazado lo más limpio y directo posible mejora la eficiencia.
- Reducir la velocidad donde sea viable: Si alguna rama de la instalación admite un caudal menor (por ejemplo, conductos hacia estancias pequeñas), se pueden sobredimensionar ligeramente esos tramos para que la velocidad del aire baje por debajo de 4 m/s. Esto contribuirá a un mayor silencio de funcionamiento y aún menos pérdidas puntuales. En general, un sistema que opera a menor velocidad tendrá una mejor eficiencia energética y requerirá menos mantenimiento (los filtros y conductos acumularán menos suciedad debido a la menor turbulencia).

En conclusión, el diseño propuesto de ventilación con recuperador de calor no solo cumple con las obligaciones normativas, sino que incorpora consideraciones de eficiencia y confort que redundarán en el buen funcionamiento a largo plazo del sistema.

Capítulo 7. Diseño del sistema de calefacción y ACS con bomba de calor aerotérmica

7.1 Situación inicial de la vivienda

Se estudia la rehabilitación del sistema de climatización y agua caliente sanitaria (ACS) de una vivienda unifamiliar ubicada en Oviedo (zona climática D1). Se trata de una casa de aproximadamente 328,32 m², con 6 ocupantes estimados. Actualmente dispone de una caldera convencional de gasóleo tipo C con una potencia nominal de 48 kW para calefacción por radiadores de aluminio y producción instantánea de ACS. Este sistema presenta un elevado consumo de combustible y emisiones de CO₂, por lo que se plantea su sustitución por una bomba de calor aerotérmica de alta eficiencia. Se pretende mantener los radiadores existentes, adaptando su funcionamiento a un régimen de baja temperatura. La temperatura interior de confort objetivo es 20 °C en invierno. No se dispone de sistema centralizado de refrigeración (en el clima de Oviedo la demanda de frío es muy baja), por lo que el proyecto se centra en calefacción y ACS.

Como se explicó en el proyecto previo, la demanda de calefacción de la vivienda es de 37.986,6 kWh al año y la demanda de Agua Caliente Sanitaria (ACS) es de 7.518,5 kWh al año. Dado que la calefacción solo se utiliza durante los meses más fríos del año (de noviembre a abril, en el clima de Oviedo, Asturias), mientras que el ACS se consume durante todo el año, en conjunto estas necesidades energéticas equivalen a una potencia media aproximada de 9,65 kW. Además, para el ACS se considera un consumo de 168 litros de agua al día a una temperatura de 60 °C.

El objetivo de la rehabilitación es mejorar la eficiencia energética de la vivienda reduciendo el consumo de energías fósiles, aprovechando la bomba de calor para cubrir el 100% de la demanda térmica (calefacción + ACS) de forma sostenible

A continuación, se detallan los cálculos de demanda, la adecuación de los emisores y la selección y dimensionado de la nueva bomba de calor.

7.2 Potencia de diseño para condiciones extremas

El dimensionamiento de la bomba de calor se ha realizado considerando las condiciones climáticas de diseño de invierno para Oviedo, según la normativa vigente. En concreto, se aplica la Instrucción Técnica 1.2.4.1.1.A.3 del RITE (Real Decreto 178/2021) que indica utilizar la temperatura seca de diseño con un percentil del 99% de horas más frías. Esto significa que la temperatura exterior de cálculo se elige de modo que solo un 1% de las horas del año estarán por debajo de ella (son las llamadas condiciones extremas poco frecuentes). Adicionalmente, al usar bombas de calor aire-agua reversibles, el RITE establece que la temperatura mínima de cálculo debe tomarse como la temperatura de bulbo húmedo coincidente al percentil 99% menos 2 °C. Este margen extra (-2 °C) introduce un factor de seguridad para tener en cuenta la humedad y la formación de escarcha en el evaporador.

Para Oviedo (zona D1), los datos climáticos IDAE indicativos son aproximadamente: temperatura seca del 99% $TS(99) \approx 1,2$ °C, con humedad relativa coincidente $\approx 89\%$. Usando un diagrama psicrométrico, se obtiene una temperatura de bulbo húmedo alrededor de 0,5 °C en esas condiciones, calculado con el diagrama psicrométrico del aire.³⁹

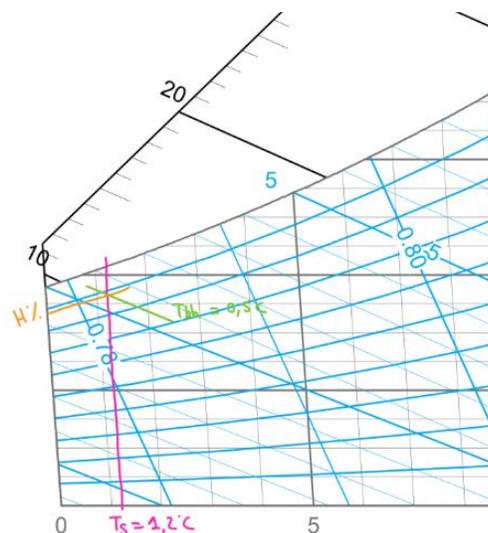


Figura 21 Diagrama psicrométrico

³⁹ IDAE & AFEC. (2023).

Aplicando la instrucción del RITE (restar 2 °C al bulbo húmedo), resulta una temperatura de entrada de aire de $-1,5$ °C como condición extrema de selección del equipo.

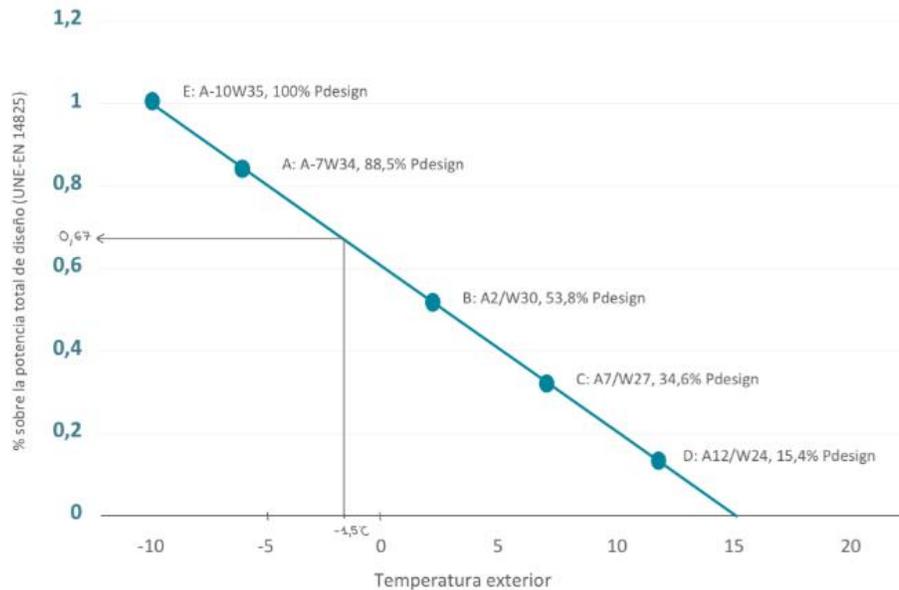


Figura 22 Porcentaje sobre la potencia total de diseño

Según la estimación de cargas, a esta condición se requieren los 14,4 kW térmicos para mantener la temperatura interior. Esta cifra incluye tanto la calefacción de la envolvente como, de forma conservadora, una simultaneidad del 100% de la carga de ACS (en la práctica, la ACS no sería simultánea permanentemente mientras se demanda calefacción máxima, pero aquí se dimensiona como caso peor simultáneo). Por tanto, se exige que la bomba de calor proporcione 14,4 kW de calor en el punto de diseño.

7.3 Comprobación de conexión entre circuito primario y elementos terminales

La vivienda en cuestión dispone de un sistema de radiadores de alta temperatura de aluminio. Para poder realizar el diseño de la instalación debemos estudiar si es necesario disponer de algún separador hidráulico o si sería conexión directa entre el circuito de la bomba de calor aerotérmica y el circuito de los radiadores ya existentes en la vivienda. Además, también hay que evaluar si es necesario que haya un depósito de inercia.

Inicialmente en la vivienda la conexión hidráulica entre el circuito de la caldera y los radiadores es directa, la tubería es de cobre de 26 mm de diámetro.

El circuito primario, de la caldera, la impulsión es a una T de 60°C, un salto térmico de 30 K y un caudal de 16,8 l/min.

Sabiendo que la potencia necesaria es de 14,4 kW, calcularemos el caudal de agua que es necesario:

$$P = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Ecuación 2 Cálculo del caudal necesario en la bomba de calor conocida la potencia de diseño

Por otro lado, la velocidad del agua por el circuito primario se calcula así:

$$v = \frac{Q}{\pi * r^2}$$

Ecuación 3 Velocidad del agua por el circuito primario en la bomba de calor

Y conociendo que la densidad del agua a 60 °C es de 983,21 kg/m³.

Primero observamos como para el sistema actual de la vivienda no se necesitaba separador hidráulico:

$r [mm]$	$\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right]$	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$v [m/s]$
13	0,1148	0,1167	0,0001167	0,2199

Tabla 1 Cálculo de la velocidad del agua con la caldera de gasóleo

Por otro lado, para la bomba de calor, y un salto térmico de 10 K:

$r [mm]$	$\dot{m} [\frac{kg}{s}]$	$Q [l/s]$	$Q [m^3/s]$	$v [m/s]$
13	0,3444	0,3503	0,0003503	0,6599

Tabla 2 Cálculo de la velocidad del agua con la bomba de calor

Como en el caso de la bomba de calor, la velocidad es menor a 1 m/s, concluimos con que no es necesario que haya un separador hidráulico y que se hará por conexión directa, tal y como se disponía la caldera de la vivienda ya que se dispondrá de suficiente caudal para la pérdida de presión considerada.

En la siguiente imagen observamos un ejemplo de instalación con conexión directa, similar a lo que se desea diseñar.

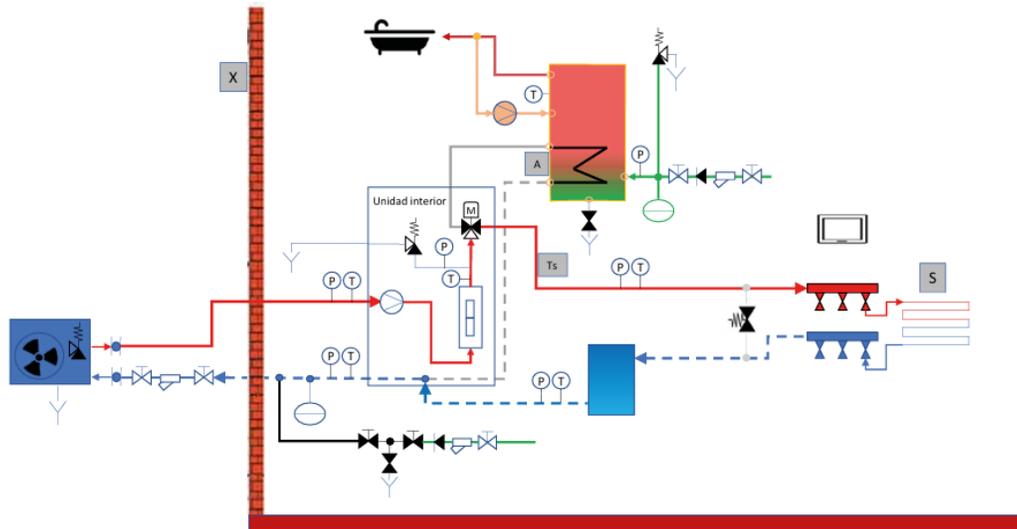


Figura 23 Esquema de una instalación de una bomba de calor con conexión directa

La instalación de un depósito de inercia sí que es necesaria para que el sistema pueda trabajar en régimen más continuo, evitando pares y arranques del compresor y así se alarga su vida útil, y así se asegura que haya el volumen mínimo de agua para poder hacer un ciclo de desescarche.

7.4 Selección del sistema de bomba de calor

En base a la demanda calculada y a las características de la vivienda, se selecciona una bomba de calor aerotérmica aire-agua de tipo partido (split), modelo Vaillant aroTHERM Plus 15. Se trata de una bomba de calor bicloc exterior con refrigerante natural R290 (propano), acoplada a una unidad interior hidráulica (unidad hidráulica + acumulador ACS integrado). Las razones de esta elección son las siguientes:⁴⁰

- Capacidad térmica: El modelo escogido puede proporcionar hasta unos 15 kW de potencia calorífica incluso en condiciones invernales frías, cubriendo así la potencia de diseño de 14,4 kW. De hecho, a condiciones estándar A7/W35 (7 °C exterior, 35 °C agua) su potencia máxima es 18,1 kW, y mantiene una capacidad considerable a temperaturas bajo cero. Es decir, tiene margen suficiente para satisfacer la carga térmica de la vivienda en casi cualquier circunstancia.
- Temperatura de impulsión alta: La Vaillant aroTHERM plus está diseñada para impulsar agua hasta 75 °C sin apoyo eléctrico. Esto la hace ideal para reformas con radiadores existentes, ya que en caso necesario puede trabajar a temperaturas comparables a una caldera convencional. En operación normal se usará a menor temperatura (35–50 °C), pero esta capacidad garantiza poder hacer frente a picos de demanda sin requerir una resistencia auxiliar constante.
- Eficiencia estacional elevada: presenta una elevada eficiencia estacional en condiciones de clima medio. En calefacción a baja temperatura (35 °C de impulsión) alcanza un SCOP de 4,74, lo que supone que, en promedio anual, por cada kWh eléctrico consumido se entregan casi 5 kWh de calor útil a la vivienda. En el caso de la producción de agua caliente sanitaria, ensayada bajo la norma EN 16147 con perfil de carga XL, el equipo obtiene un COP medio de 3,76, lo que igualmente garantiza un aprovechamiento muy superior al de sistemas convencionales. Estos valores confirman que la instalación cumple sobradamente el

⁴⁰ Vaillant. (s.f.).

requisito de SPF > 2,5 para ser considerada renovable y permiten estimar con precisión el consumo eléctrico anual asociado tanto a calefacción como a ACS.

Por lo tanto, la energía renovable consumida para calefacción sería de:

$$E_{Renovable\ calefacción} = Demanda_{calefacción} * \left(1 - \frac{1}{SCOP_{calefacción}}\right) = 17.036,39\ kWh$$

Ecuación 4 Energía renovable consumida por calefacción

Y el consumo de energía no renovable por tanto, de 4.555,18 kWh

En cuanto al ACS:

$$E_{Renovable\ ACS} = Demanda_{ACS} * \left(1 - \frac{1}{COP_{ACS}}\right) = 5.518,92\ kWh$$

Ecuación 5 Energía renovable consumida por ACS

Y por lo tanto, 1.999,60 kWh de consumo de energía eléctrica.

- Refrigerante ecológico: Utiliza propano (R290) como fluido refrigerante, con PCA=3 (potencial de calentamiento atmosférico muy bajo). Esto la hace respetuosa con el medio ambiente y preparada para normativas futuras de reducción de HFC. Además, el R290 le permite alcanzar las altas temperaturas mencionadas.
- Unidad interior compacta: Se dispone una unidad interior tipo Vaillant uniTOWER que integra un depósito acumulador de ACS de 185 L y todos los componentes hidráulicos (bomba circuladora, válvulas, etc.). Este depósito proporciona hasta unos 370 L de agua caliente mezclada a 40 °C, suficiente para los consumos puntuales familiares. La unidad interior escogida tiene dimensiones y peso (unos 210 kg en vacío) que permiten su ubicación en el espacio de la antigua caldera (garaje o cuarto técnico), apoyada sobre el suelo capaz de soportar unos 300 kg cuando llena.

- Nivel sonoro y situación de la unidad exterior: La unidad exterior presenta un nivel sonoro reducido (≈ 43 dB(A) a 3 m en modo máximo), adecuado para entorno residencial. Se instalará en el jardín o fachada, elevada sobre soportes para evitar acumulación de nieve y agua, tal como recomienda el fabricante y la guía. Se respetarán las distancias máximas de tuberías frigoríficas/hidráulicas indicadas (en este caso la distancia entre unidades será corta, sin impacto apreciable en la potencia). La ubicación exacta se elige próxima a la antigua salida de humos de la caldera, facilitando la conexión hidráulica.

7.5 Comprobación de potencia y adaptación de los radiadores existentes

En la vivienda objeto de estudio se dispone de un sistema de emisión de calor basado en radiadores de aluminio convencionales, distribuidos por las tres plantas del edificio. Cada radiador está compuesto por una media de 8 elementos y se estima un total aproximado de 34 radiadores en toda la instalación, lo que supone alrededor de 272 elementos emisores.

Este tipo de radiadores de aluminio tienen una elevada emisión térmica y de fácil adaptación a instalaciones de baja temperatura, lo que conviene para el sistema de la bomba de calor, consiguiendo un mayor confort térmico y ahorro energético.

La curva del radiador en cuestión, EUROPA 600 C, es la siguiente:

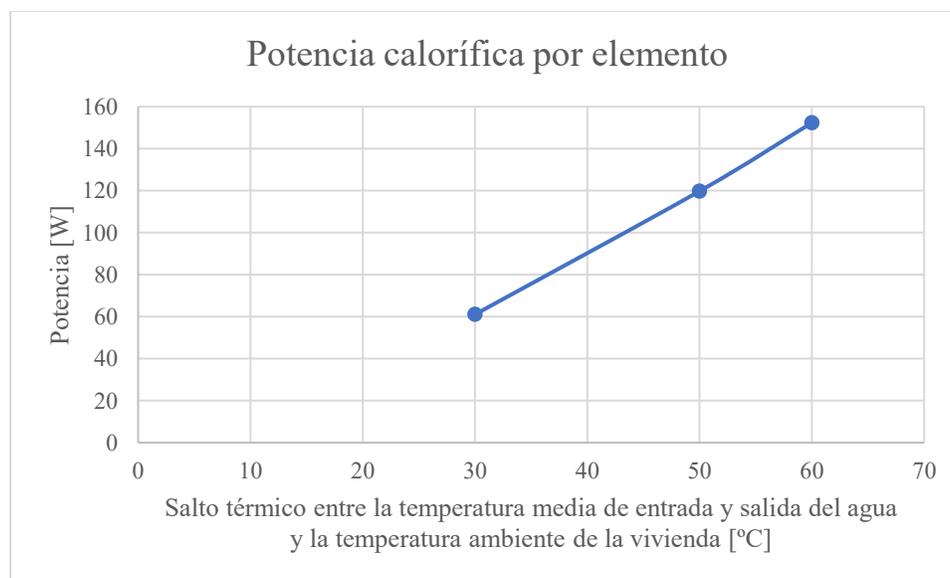


Figura 24 Curva de potencia térmica del radiador EUROPA 600 C

Esta curva se ha obtenido conociendo el exponente n y la constante km , propios del radiador, dados por el fabricante.

Como se quiere adaptar a la instalación de la bomba de calor, se optará por el caso en el que el salto térmico es de 30°C, régimen de baja temperatura. Por lo que, cada elemento proporciona una potencia de 61,07 W. Por otro lado, la bomba de calor seleccionada (Vaillant aroTHERM Plus 15) tiene un caudal de calefacción nominal de 2.500 litros por hora, y se ha considerado una temperatura de impulsión del agua de 35 °C. En este tipo de sistemas, la diferencia típica entre la temperatura de ida y la de retorno del agua suele estar comprendida entre 5 y 10 °C, lo cual condiciona la potencia térmica útil disponible. La potencia suministrada por la bomba de calor puede calcularse con la fórmula:

$$Q = \dot{V} * C_p * \Delta T$$

Ecuación 6 Potencia suministrada por una bomba de calor

donde \dot{V} es el caudal (en litros/hora), C_p es el calor específico del agua (1,16 Wh/kg·°C), y ΔT es el salto térmico del agua.

Potencia necesaria en calefacción (W)	Caudal (l/h)	Tª entrada (°C)	Tª salida (°C)	Variación Tª (K)	Tª media (°C)	Variación Tª con ambiente (K)
14.400	2500	35	25	10	30	10

Tabla 3 Condiciones de entrada y salida del agua

Potencia proporcionada por la BdC (W)	P elemento (W)	Nº de elementos	Nº de radiadores
29.000	61,07	236	30

Tabla 4 Número de radiadores para la potencia necesaria de 14,4 kW

Esta potencia es más que suficiente para cubrir la potencia de diseño requerida en calefacción, que se había fijado en 14,4 kW. Por tanto, se confirma que, tanto por capacidad térmica de la bomba de calor como por el número de elementos emisores instalados, la instalación existente es compatible con el nuevo sistema de aerotermia.

7.6 Comprobación del depósito de ACS

Para verificar si el depósito de acumulación de ACS integrado en la torre hidráulica seleccionada (uniTOWER plus) resulta adecuado para cubrir la demanda diaria de agua caliente sanitaria de la vivienda, se realiza a continuación el cálculo del volumen útil disponible. La uniTOWER incorpora un acumulador de 185 litros de capacidad, que trabaja a una temperatura de acumulación de hasta 75 °C. Sin embargo, el agua caliente de uso no se suministra directamente a esa temperatura, sino que se mezcla con agua fría de red (aproximadamente a 10 °C en el caso de Asturias) mediante una válvula mezcladora termostática, que entrega agua a 40 °C, considerada la temperatura de confort habitual para duchas y grifos. Para conocer cuántos litros útiles a 40 °C se pueden obtener a partir de los 185 L almacenados a 75 °C, se aplica la fórmula que proporciona el volumen equivalente tras la mezcla:

$$V_1 = V_2 + V_2 * \left(\frac{T_2 - 40^{\circ}\text{C}}{40^{\circ}\text{C} - T_1} \right)$$

Ecuación 7 Volumen proporcionado por un depósito de ACS

donde $V_2 = 185 \text{ L}$, $T_2 = 75^{\circ}\text{C}$ y $T_1 = 10^{\circ}\text{C}$. Sustituyendo en la expresión se obtiene que $V_1 = 370 \text{ L}$.

Esto significa que el depósito es capaz de proporcionar diariamente más de 370 litros de ACS a 40 °C, lo cual supera ampliamente la demanda estimada de la vivienda (que se había fijado en 168 L/día a 60 °C en el sistema anterior con caldera, lo que equivaldría incluso a menos volumen si se entrega a 40 °C, el cual sería según la ecuación de 280 L). Por tanto, se concluye que el sistema seleccionado es totalmente adecuado en cuanto a capacidad de ACS para los usos habituales en la vivienda.

Además del depósito, la uniTOWER plus incluye todos los componentes hidráulicos necesarios para el funcionamiento de la instalación de calefacción y ACS. En concreto, integra:

- El vaso de expansión del circuito de calefacción.
- Bomba de circulación modulante.
- Válvulas de seguridad.

- Válvula de mezcla.
- Conexiones rápidas con la unidad exterior.
- Aislamiento térmico integral y protección contra sobre temperatura.

Gracias a este diseño compacto, se facilita enormemente la instalación en viviendas ya construidas, reduciendo el espacio necesario y el número de elementos a instalar por separado. Su funcionamiento es sencillo: la unidad exterior (aroTHERM plus) transfiere calor al circuito de agua a través del condensador integrado, y este calor se utiliza tanto para alimentar el circuito de calefacción (radiadores) como para calentar el agua del acumulador. Cuando se solicita ACS, la bomba de calor carga el depósito hasta la temperatura de consigna (70 °C), y a través de la válvula mezcladora entrega agua caliente a los grifos a 40 °C. Además, el sistema puede realizar ciclos automáticos de anti-legionela, elevando la temperatura del depósito periódicamente, sin necesidad de resistencias eléctricas auxiliares gracias a la capacidad de alta temperatura del modelo aroTHERM plus (hasta 75 °C con R290).

En conjunto, este sistema compacto satisface plenamente las necesidades térmicas de calefacción y ACS, con alta eficiencia, seguridad y facilidad de integración en rehabilitaciones como la presente.

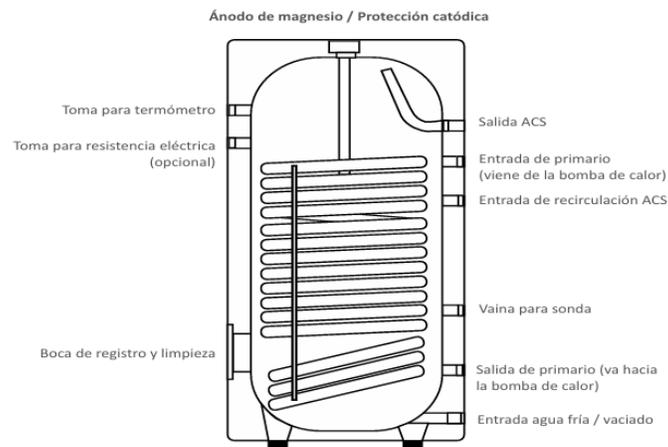


Figura 25 Depósito acumulador de ACS

Además del acumulador de ACS, es altamente recomendable la instalación de un depósito de inercia en el circuito de calefacción para garantizar el correcto funcionamiento de la bomba de calor, especialmente en sistemas con radiadores existentes. Este depósito no almacena agua caliente para uso sanitario, sino que actúa como amortiguador térmico dentro del circuito de calefacción, con varias funciones esenciales.

En primer lugar, ayuda a reducir el número de arranques y paradas del compresor, que es uno de los factores que más afectan a la vida útil y eficiencia de una bomba de calor. En instalaciones donde el sistema de emisión (radiadores) está regulado con válvulas termostáticas o presenta zonas de baja demanda, es común que el volumen de agua circulante sea insuficiente para absorber la energía producida por la bomba de calor en cada ciclo. Esto provoca que el compresor se apague y encienda con frecuencia (ciclos cortos), lo cual reduce la eficiencia estacional (SCOP) y puede provocar averías prematuras.

En segundo lugar, el depósito de inercia permite cumplir con el volumen mínimo de agua recomendado por el fabricante. Para el modelo Vaillant aroTHERM plus 15, la documentación técnica indica un volumen mínimo necesario en el circuito de calefacción para asegurar un intercambio térmico estable y un buen control de temperatura. Si no se alcanza dicho volumen con el propio circuito de radiadores, el depósito de inercia actúa como volumen adicional que compensa la diferencia.

Además, el depósito de inercia ayuda a estabilizar la temperatura de retorno, lo que es especialmente importante en bombas de calor modulantes. Si la temperatura de retorno sube demasiado rápido por falta de masa térmica, la bomba modula antes de tiempo y no trabaja en su punto óptimo.

Recomendación de volumen mínimo en la instalación	Volumen de agua disponible en toda condición	Volumen de depósito de inercia recomendado
Radiadores	10 l x kW de potencia nominal	mínimo de 50 l a 200 l en función del fabricante.
Suelo radiante	5 l x kW	mínimo de 50 l a 200 l, en función del fabricante y si hay zonas abiertas
En cascada (más de una bomba de calor)	La que precise el equipo de menor potencia	mínimo 200 l y en función de la potencia nominal del primer escalón

Figura 26 Tabla de volúmenes mínimos para el depósito de inercia

Por todo ello, en rehabilitaciones como la presente, con emisores ya instalados y distribución de tres plantas, la incorporación de un depósito de inercia en el circuito hidráulico garantiza un funcionamiento eficiente, duradero y estable del sistema, adaptándolo correctamente a las características reales de la vivienda y del generador térmico seleccionado. El volumen mínimo recomendado para una instalación con radiadores, es de 10 litros por kW de potencia térmica, lo que en este caso supondría un depósito de 144 litros para la potencia de diseño de 14,4 kW.

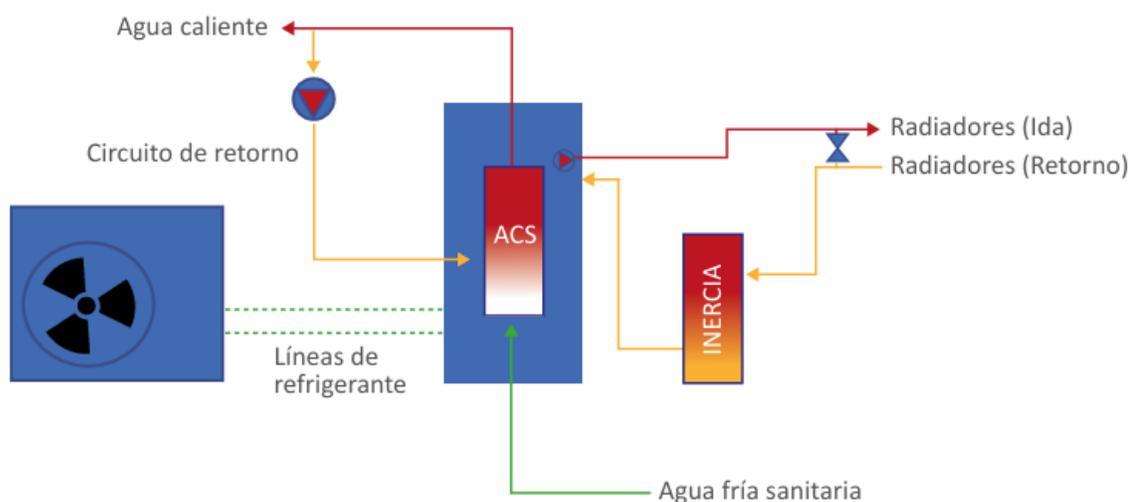


Figura 27 Ejemplo de la instalación

7.7 Instalación eléctrica

Como se plantea la instalación de una bomba de calor de accionamiento eléctrico, es necesario ver cual sería el consumo eléctrico. Aunque se quiera que la temperatura de impulsión sea de 35 °C, se diseñará para la situación más desfavorable. Por lo que, conociendo de la ficha técnica los valores del COP según la temperatura del aire y del agua, se conoce el consumo eléctrico en cada caso.

	COP	Consumo Eléctrico
A7W35	5,38	2,67 kW
A7W45	4,10	3,51 kW
A7W55	3,11	4,63 kW

A continuación, se hará el cálculo de la sección de los conductores y de las protecciones eléctricas para el consumo máximo 4,63 kW.

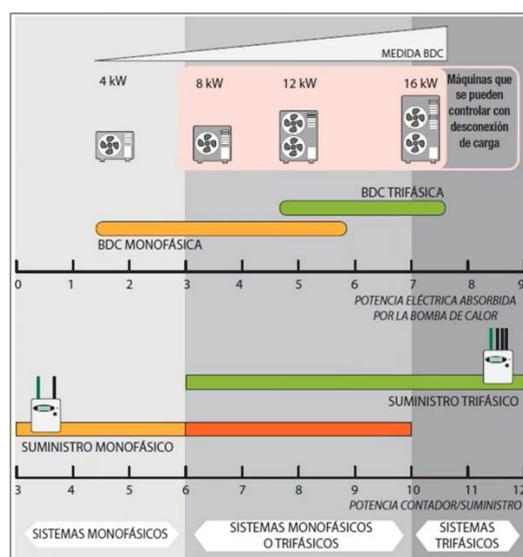


Figura 28 Línea monofásica o trifásica según potencia eléctrica consumida

Como se observa en la anterior imagen, al ser la potencia eléctrica absorbida por la bomba de calor en la situación más desfavorable menor a 6 kW, la bomba de calor y el sistema serán monofásicos.

Por lo que, la intensidad en la línea será:

$$I = \frac{4,63 \text{ kW}}{230 \text{ V}} = 20,13 \text{ A}$$

Ecuación 8 Cálculo de intensidad por una línea monofásica

A este cálculo se le debe aplicar la corrección del ITC-BT-47 REBT: “Los conductores de conexión que alimentan a un solo motor deben estar dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga del motor.”⁴¹

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA		MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	
Potencia nominal del motor	Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga $\frac{I_a}{I_{N(*)}} \leq$	Potencia nominal del motor	Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga $\frac{I_a}{I_{N(*)}} \leq$
De 0,75 kW a 1,5 kW	2,5	De 0,75 kW a 1,5 kW	4,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	2	De 1,5 kW a 5,0 kW	3
De más de 5,0 kW	1,5	De 5,0 kW a 15,0 kW	2
		De más de 15,0 kW	1,5

Figura 29 Factor de corrección por motor

Por lo que, la intensidad de diseño será de 25,16 A.

Para la correcta selección de la sección de los conductores eléctricos en una instalación de bomba de calor, se debe partir del criterio de la intensidad máxima prevista, garantizando así que los cables no sufran sobrecalentamientos y cumplan con las normativas de seguridad. En este caso, se ha optado por el método de instalación A2, que corresponde a cables multipolares instalados en el interior de un tubo empotrado en una pared térmicamente aislante. Esta configuración es muy común en viviendas y proporciona una buena protección mecánica y térmica a los conductores.

⁴¹ Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2002).

Ref.	Modo inst.	Descripción	Tipo
1	Local	Cond. aislado o cables unipolares en tubo en el interior de una pared térmicamente aislante . ¹⁾	A1
2	Local	Cables multipolares en tubo en el interior de una pared térmicamente aislante . ¹⁾	A2
3	Local	Cable multipolar en el interior de una pared térmicamente aislante . ¹⁾	A1

Figura 30 Tipo de configuración de los cables

Según la tabla 1 de la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, y considerando una instalación monofásica, se pueden emplear dos opciones válidas: cable de tipo PVC (policloruro de vinilo) con una sección de 6 mm² y una protección de 27 A, o bien cable de tipo XLPE (polietileno reticulado) con una sección de 4 mm² y una protección también de 27 A.⁴²

Método de instalación	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento											
	3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE								
A1												
A2	3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE								
B1			3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE			3x XLPE	2x XLPE		
B2			3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE			3x XLPE	2x XLPE		
C					3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE				
D	Ver Tabla D (pág.278) – Valores coincidentes con Tabla D1/D2 (pág.278)											
E					3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE				
F							3x PVC	2x PVC	3x XLPE	2x XLPE		

Sección mm ²	INTENSIDADES MÁXIMAS ADMISIBLES (A)												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	16,5	19	20	21	24	24	
2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	23	26	26,5	29	33	33	
4	20	21	23	24	27	30	31	34	36	38	45	45	
6	25	27	30	32	36	37	40	44	46	49	57	57	
10	34	37	40	44	50	52	54	60	65	68	76	76	
16	45	49	54	59	66	70	73	81	87	91	105	105	
25	59	64	70	77	84	88	95	103	110	116	123	140	
35	--	77	86	96	104	110	119	127	137	144	154	174	
50	--	94	103	117	125	133	145	155	167	175	188	210	
70	--	--	--	149	160	171	185	199	214	224	244	265	
95	--	--	--	180	194	207	224	241	259	271	296	327	
120	--	--	--	208	225	240	260	280	301	314	348	380	
150	--	--	--	236	260	278	299	322	343	363	404	438	
185	--	--	--	268	297	317	341	368	391	415	464	501	
240	--	--	--	315	350	374	401	435	468	490	552	590	
300	--	--	--	361	401	430	461	500	538	563	638	678	
400	--	--	--	431	480	515	552	600	645	674	770	817	
500	--	--	--	493	551	592	633	687	741	774	889	937	
630	--	--	--	565	632	681	728	790	853	890	1.028	1.071	

Figura 31 Tabla de intensidades máximas admisibles según sección del cable y tipo de configuración

⁴² Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002).

El uso de “2x” en la designación (por ejemplo, 2x6 mm², en el caso de 2xPVC) indica que se trata de dos conductores activos: uno de fase y uno de neutro, que es lo necesario en una instalación monofásica. No se cuenta aquí el conductor de protección (tierra), que debe añadirse como conductor separado (CP o PE). Por tanto, se hablaría de un conjunto de 2x6 mm² + PE.⁴³

Sección conductores de fase de la instalación S (mm ²)	Sección mínima de los conductores de protección S _p (mm ²)
S ≤ 16	S _p = S*
16 < S ≤ 35	S _p = 16
S > 35	S _p = S/2

Figura 32 Sección mínima de los conductores de protección

Como la sección tanto si es 2xPVC como para 2xXLPE es menor a 16 mm², la sección mínima de los conductores de protección tendrá que ser de igual valor que la sección de los conductores de fase (Para 2xPVC, 6 mm² y para 2xXLPE, 4 mm²).

En cuanto a las protecciones eléctricas, deben dimensionarse para proteger la instalación frente a sobreintensidades (sobrecargas y cortocircuitos). Se debe instalar un interruptor automático magnetotérmico adecuado a la sección y tipo de cable. Como es una instalación de uso doméstico será entonces curva C y una intensidad de disparo entre 5 a 10 veces la intensidad nominal del cable.

A parte la intensidad de la protección rige por estas dos condiciones:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$I_2 \leq 1,45 * I_z$$

Ecuación 9 Condiciones de intensidad de las protecciones

⁴³ Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002).

Siendo I_b , corriente para la que se ha diseñado el circuito, I_z , corriente máxima admisible del cable e I_2 , corriente que asegura la actuación del dispositivo de protección y que según UNE EN 60898 o UNE EN 61009, de uso doméstico o análogo, $I_2 = 1,45 * I_n$.⁴⁴

Por lo que, I_n , corriente asignada al dispositivo de protección, debe ser menor a 27 A. De entre los siguientes calibres normalizados, se escoge el de 25 A.⁴⁵

2	4	6	10	16	20	25	35
40	50	63	80	100	125	160	200
250	315	400	425	500	630	800	1000

Figura 33 Calibres normalizados para protecciones

Adicionalmente, es obligatoria la instalación de un interruptor diferencial, que sirve para detectar fugas de corriente hacia tierra, como podría ocurrir si un cable dañado entra en contacto con una carcasa metálica. Esta protección no depende de la carga eléctrica, sino de las corrientes de fuga que puedan poner en riesgo a las personas. El diferencial debe tener una sensibilidad máxima de 30 mA, ya que es el valor estipulado por normativa para garantizar la seguridad en entornos domésticos y terciarios.

⁴⁴ Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002).

⁴⁵ Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002).

Capítulo 8. Integración del recuperador Aldes InspirAIR Side 240 Classic con batería hidrónica de pos-tratamiento y bomba de calor Vaillant aroTHERM Plus 15

8.1 Introducción y justificación de la integración

El uso de un sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia (de hasta 90%) permite reducir drásticamente las pérdidas térmicas debidas a la ventilación, manteniendo el confort interior con un mínimo consumo adicional de calefacción. En invierno, el recuperador Aldes InspirAIR Side 240 Classic transfiere la mayor parte del calor del aire de extracción al aire de impulsión sin mezclarlos, logrando recuperar entre un 70% y 90% de la energía que de otro modo se perdería, tal y como se explicaba en el capítulo 6. De este modo se precalienta el aire nuevo entrante, reduciendo la carga térmica de calefacción necesaria para mantener la temperatura interior.

Por ejemplo, para las condiciones exteriores extremas de diseño invierno de $-1,5\text{ °C}$ (interior 20 °C), el intercambiador de calor del recuperador eleva la temperatura del aire exterior desde $-1,5\text{ °C}$ hasta aproximadamente $17,8\text{ °C}$ (suponiendo una efectividad sensible del 90%). Esto se calcula mediante la fórmula de eficacia térmica según UNE-EN 308:

$$T_{imp, HR} = T_{ext} + \eta \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

Ecuación 10 Cálculo de la temperatura de impulsión a la salida del recuperador de calor

Gracias al recuperador, el aire ya llega templado y apenas necesita un pequeño post-calentamiento para alcanzar la temperatura de impulsión deseada de confort en el interior de la vivienda (20 °C), con un requerimiento de solo unos $0,14\text{ kW}$.

Por lo que, el recuperador de calor cubre la mayor parte de la necesidad de calentamiento del aire de ventilación, disminuyendo el consumo de calefacción y contribuyendo al cumplimiento del CTE DB-HE de ahorro energético. Sin embargo, incluso con un 90% de eficacia, el aire impulsado podría quedar a unos 18 °C, y suponiendo que trabajase a su máxima eficiencia, lo cual podría resultar ligeramente fresco en los difusores de impulsión durante situaciones de diseño en época de invierno muy frío.

Por ello se justifica la integración de una batería de post-calentamiento o post-tratamiento térmico, para elevar unos grados la temperatura del aire de suministro en los días más fríos, garantizando el confort térmico en espacios habitables, evitando corrientes de aire frío y cubriendo totalmente la consigna de impulsión requerida

La pequeña fracción de energía que debe aportar la batería en los días más fríos se produce de forma muy eficiente mediante la bomba de calor aerotérmica Vaillant aroTHERM Plus 15, la cual presenta un coeficiente de rendimiento estacional muy elevado (COP = 5,38 a A7/W35), tal y como se detalla en el capítulo 7. Por cada kW eléctrico consumido, la bomba de calor introduce más de 5 kW de calor al circuito de agua (gracias al aprovechamiento de la aerotermia), por lo que el gasto energético adicional para precalentar esos pocos grados el aire es prácticamente despreciable en el balance global.

8.2 Diseño del sistema hidráulico

Configuración general: La instalación es un sistema de Ventilación Mecánica Controlada (VMC) de doble flujo equilibrado, con caudal de impulsión y extracción iguales (54 L/s, equivalentes a $\sim 194 \text{ m}^3/\text{h}$). El recuperador de calor Aldes InspirAIR Side 240 Classic se encarga de la extracción del aire viciado de las estancias húmedas (cocinas, baños, etc.) y del aporte de aire nuevo filtrado a las habitaciones y salas de estar. Este equipo es de tipo horizontal (Side), adecuado para montaje en falso techo o pared técnica. Consta internamente de dos ventiladores centrífugos de velocidad variable (uno para impulsión y otro para extracción, motores EC de alta eficiencia), filtros en ambas corrientes y un intercambiador de calor estático de flujo cruzado (material polipropileno o similar) de alta eficacia. Dispone además de bypass 100% automático de serie para free-cooling estival y de un drenaje de condensados ($\text{Ø}32 \text{ mm}$) para recoger el agua condensada que pueda generarse en el intercambiador⁴⁶.

En la red de conductos, el aire exterior fresco se capta mediante una toma de aire en fachada o cubierta, pasando por un filtro de admisión (integrado en el recuperador) antes del intercambiador. Tras recuperar calor sensible del aire extraído, el aire de impulsión sale del recuperador por su boca de impulsión, donde en nuestro diseño se integra la batería hidrónica de post-tratamiento antes de distribuir el aire a las distintas habitaciones. Es importante remarcar que la batería de agua caliente se instala en el conducto de impulsión principal, inmediatamente aguas abajo del recuperador y antes de las derivaciones a cada habitación. De esta forma, la totalidad del caudal de aire de ventilación pasa a través de la batería, asegurando que el aire se post-calienta homogéneamente antes de repartirse. La batería se ubica lo más próxima posible a la salida del recuperador para minimizar longitudes de conducto sin temperar; además, dicho tramo entre recuperador y batería debe estar bien aislado térmicamente para evitar pérdidas o ganancia de calor indeseadas.

A la salida de la batería, el conducto de impulsión se bifurca en derivaciones hacia los distintos locales secos (salones, dormitorios, despacho, etc.), mediante una caja de distribución adecuada

⁴⁶ InspirAIR® Side 240 Classic Modbus Derecha (n.º 11023446) [Folleto técnico].

(el propio fabricante Aldes ofrece cajas de distribución InspirAIR Side opcionales). Cada ramal incorpora sus reguladores de caudal para asegurar los 54 L/s totales repartidos según las necesidades de cada estancia, según el diseño del capítulo 6.

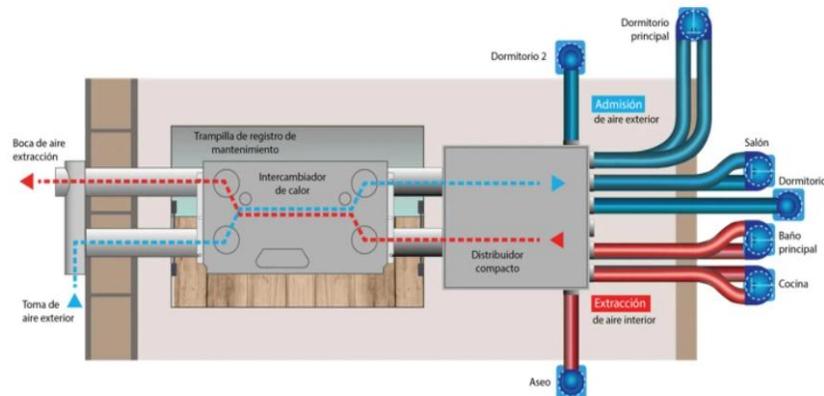


Figura 34 Ejemplo de esquema con caja de distribución

Esquema hidráulico de la batería: La batería de post-calentamiento es un intercambiador aire-agua de aletas y tubo de cobre, dimensionado para el caudal de aire de 54 L/s y la potencia térmica necesaria. Está alimentada por agua caliente provista por la bomba de calor Vaillant aroTHERM Plus 15. El circuito hidráulico comprende un módulo hidráulico interior que conecta la bomba de calor a los distintos emisores. En este proyecto, la batería hidrónica del recuperador actuaría como un emisor más dentro del sistema de calefacción de la vivienda.

La tubería de ida y retorno de agua caliente hacia la batería se conecta antes del distribuidor de calefacción principal, priorizando su alimentación cuando esté activa. Justo antes de la batería se instala una válvula de control de 2 o 3 vías para regular el caudal de agua que atraviesa la misma. Adicionalmente, se disponen válvulas de equilibrado y corte en las líneas de agua, así como purgadores automáticos de aire en el punto más alto de la batería, para eliminar bolsas de aire en el serpentín. La batería hidrónica se monta dentro del propio conducto o acoplada a él con bridas, asegurando la estanqueidad.

La instalación, al ser de doble flujo, se equilibra para que la extracción total (209 Pa de pérdida de carga) iguale a la impulsión total (153 Pa de pérdida de carga) a 54 L/s, logrando un balance neutro en la vivienda. Los ventiladores del recuperador operan en modo de caudal constante,

compensando las pérdidas de carga de la red. En particular, a la pérdida de carga en impulsión (153 Pa) habría que incluirle la pérdida de carga de la batería de post-tratamiento, cuyos pasos de aletas añaden caída de presión de unos 30 a 50 Pa a caudal nominal, y el equipo puede dar hasta 420 Pa, por lo que es suficiente.

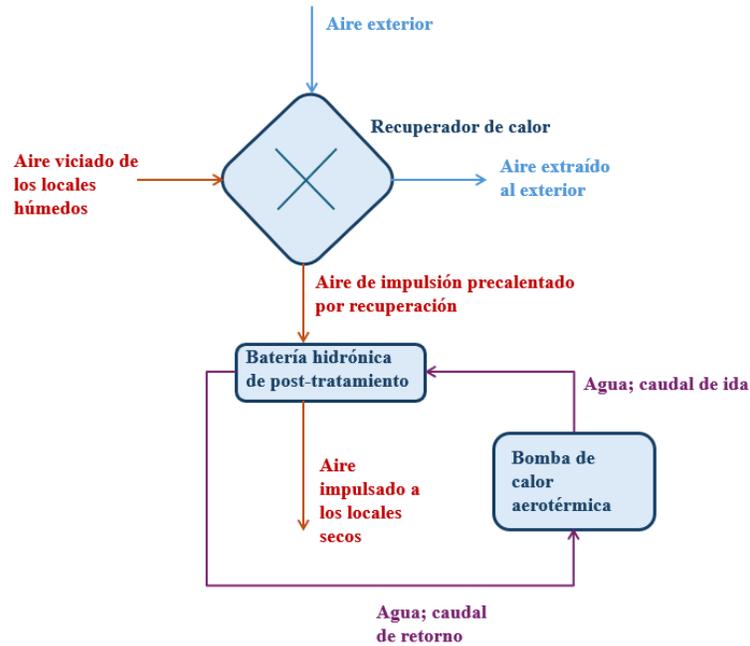


Figura 35 Esquema del sistema

8.3 Diseño de las características de la batería de post-tratamiento

El salto necesario hasta la consigna es de: Sabiendo la temperatura a la salida del recuperador es de 17,85 °C.

$$\Delta T_{aire} = 20^{\circ}C - 17,85^{\circ}C = 2,15^{\circ}C$$

Ecuación 11 Salto térmico del aire a la salida del recuperador de calor con respecto a la temperatura ambiente deseada en el interior

Por lo que el caudal másico necesario sería de, sabiendo que el caudal de impulsión a la salida del recuperador tiene que ser de 54 l/s.

$$\dot{m}_{aire} = \rho * \dot{V} = 0,0648 \frac{kg}{s}$$

Ecuación 12 Caudal de impulsión de aire a la salida del recuperador de calor

Por lo tanto, la potencia necesaria sería de:

$$Q = \dot{m}_{aire} * C_{p,aire} * \Delta T = 140 W$$

Ecuación 13 Potencia necesaria de la batería de post-tratamiento a la salida del recuperador de calor

Pero como estos cálculos son si la eficiencia del recuperador de calor fuese 90%, vamos a diseñar la potencia a una eficiencia menor para un mayor margen de error, del 70%.

$$T_{hr} = -1,5 + 0,7 * (20 - (-1,5)) = 13,55^{\circ}C$$

$$\Delta T_{aire} = 6,45^{\circ}C$$

$$Q = 420 W$$

Ecuación 14 Temperatura del aire a la salida del recuperador de calor, salto térmico y potencia necesaria proporcionada por la batería de post-tratamiento en condiciones menos favorables

Por tanto, el caudal necesario procedente de la bomba de calor será de: (Con una temperatura de agua de impulsión de 35°C, como se especifica en el capítulo 7, y suponiendo una de retorno de 30°C)

$$\dot{m}_{agua} = \frac{Q}{C_{p,agua} * \Delta T_{agua}} = \frac{420}{4180 * 5} = 0,02 \frac{kg}{s} = 0,0723 \frac{m^3}{h}$$

8.4 Selección de componentes de la batería de post-tratamiento

Para lograr la integración eficiente entre el recuperador de calor, la batería hidrónica y la bomba de calor, se han seleccionado componentes de control y regulación adecuados

Válvula de control modulante: Se instala una válvula de 2 vías con actuador modulante (señal 0–10 V) en la línea de alimentación de agua a la batería de post-calentamiento. Esta válvula abre o cierra el paso de agua caliente según la demanda de calefacción en el aire de impulsión. En situaciones de mucho frío exterior, el actuador abrirá más la válvula para enviar más caudal de agua caliente a la batería; en situaciones templadas, la mantendrá casi cerrada (o totalmente cerrada si no se requiere apoyo térmico). La modulación proporcional evita oscilaciones de temperatura del aire impulsado, manteniendo un control preciso.

Para seleccionar las válvulas debemos determinar el coeficiente K_v , que determina el caudal que puede pasar a través de ella, a una caída de presión de 0,1 bar⁴⁷.

$$K_v = Q * \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} = Q * \sqrt{\frac{\rho}{1000 * \Delta P}} = 0,0723 * \sqrt{\frac{1000}{1000 * 0,1}} = 0,228$$

Ecuación 15 Cálculo del coeficiente K_v para la selección de la válvula

Se escoge la válvula VD115CLC de Siemens (características en Anexo III) con un diámetro nominal de 15 mm.

Sonda de temperatura en el conducto de impulsión: Se coloca un sensor de temperatura del aire después de la batería hidrónica, en el conducto de impulsión principal. Esta sonda envía la lectura de la temperatura del aire suministrado a un controlador, que la compara con la consigna deseada (por ejemplo 20 °C). Es recomendable que el sensor esté a cierta distancia aguas abajo de la batería (mín. 1,5–2 m) para garantizar que mide una mezcla homogénea.

⁴⁷ Centro Técnico Europeo (CTEEP). (19 de julio de 2021).

Controlador proporcional-integral (PI): Un controlador electrónico (integrado en el propio sistema de regulación de la bomba de calor que se encarga de regular la apertura de la válvula modulante en función de la temperatura de aire medida y la consigna. Por ejemplo, si la temperatura medida baja de 19 °C, el controlador incrementa la apertura de la válvula para entregar más calor; si supera 20 °C, cierra gradualmente la válvula.

Elementos de seguridad y medición: Se instalará un termostato de seguridad anti-hielo en la batería hidráulica, que pare el ventilador de impulsión o abra al 100% la válvula de agua caliente en caso de que la temperatura del agua descienda a niveles de riesgo de congelación en el serpentín. Esto previene daños en la batería si la bomba de calor estuviese apagada en invierno.

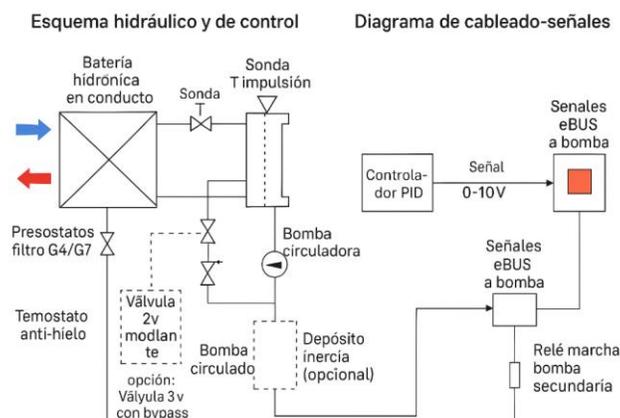


Figura 36 Ejemplo de circuito de batería hidráulica acoplada a la bomba

En cuanto a la selección de la batería hidráulica, se ha dimensionado un modelo estándar compatible con el caudal de aire de unos 200 m³/h y la potencia requerida, una batería de 4 filas con serpentín de cobre y aletas de aluminio, capaz de aportar hasta ~2–3 kW con agua 45/40 °C y aire 0 °C a 20 °C. Esto garantiza holgura ya que en nuestro caso con agua 35 °C y aire –1,5°C a 20°C la demanda es menor a 0,5 kW. El fabricante Aldes ofrece como accesorio una batería de post-calentamiento hidráulica para algunos modelos, se escoge la batería *Ext. Post-heating coil InspirAIR* con código 11023487⁴⁸.

⁴⁸ Aldes. (s.f.).

8.4.1 Simulación del control PI

Para verificar el comportamiento dinámico del sistema de post-calentamiento de aire, se ha realizado una simulación simplificada del control PI aplicado a la batería hidrónica integrada en el conducto de impulsión. El objetivo de esta simulación es evaluar cómo responde el sistema ante variaciones en la temperatura del aire procedente del recuperador, y comprobar que la temperatura de impulsión se mantiene próxima a la consigna establecida⁴⁹.

En primer lugar, se definen los parámetros básicos de entrada de la simulación:

- Consigna de temperatura de impulsión (SP): 20,0 °C.
- Temperatura exterior inicial: -1,5 °C (caso extremo de diseño).
- Eficiencia sensible del recuperador: 90 % (según ficha técnica del Aldes InspirAIR Side 240 Classic).
- Temperatura tras recuperador (T_{hr}) en condiciones iniciales: calculada como 17,85 °C mediante el balance de energía sensible.
- Caudal de aire: 54 l/s (0,054 m³/s), equilibrado en impulsión y extracción.
- Potencia máxima de la batería a 35/30 °C: En torno a 0,42 kW, lo que equivale a un salto térmico máximo de 6,45 K.

En cuanto al control, he optado por un PI sin término derivativo, ya que en sistemas térmicos de aire de baja inercia como éste el componente D apenas aporta beneficios y puede amplificar ruidos de medida. Los parámetros iniciales del controlador han sido:

- Ganancia proporcional (K_p): 0,6.
- Tiempo integral (T_i): 120 s.

⁴⁹ Åström, K. J., & Murray, R. M. (2012).

- Tiempo de muestreo (Δt): 1 s.

Estos valores se han ajustado de forma manual buscando un compromiso entre rapidez de respuesta y estabilidad (evitar oscilaciones excesivas).

Para que la simulación refleje un comportamiento más realista, no he considerado que la temperatura de impulsión cambie de forma instantánea al abrir o cerrar la válvula. En la práctica, el aire necesita un tiempo para calentarse al pasar por la batería hidrónica, debido a la masa térmica del intercambiador y al propio flujo de aire. Para representar esta realidad, he modelado el conjunto batería–conducto como un sistema de primer orden con una constante de tiempo $\tau=8$ s. Esto significa que, cuando la batería cambia su potencia, la temperatura de salida del aire se acerca de forma progresiva a la temperatura objetivo, siguiendo una curva exponencial típica de estos sistemas, en lugar de hacerlo de golpe. Este enfoque permite que el control PI trabaje con un retardo natural similar al que tendría en la instalación real.

Por otro lado, para comprobar la robustez del control, he introducido perturbaciones en las condiciones de entrada durante la simulación:

- A los 120 segundos, la temperatura exterior aumenta, pasando de $-1,5$ °C a 0 °C. Esto provoca que la temperatura tras el recuperador aumente, reduciendo momentáneamente la necesidad de calor en la batería.
- A los 360 segundos, se simula una disminución de la eficiencia sensible del recuperador, pasando del valor máximo del 90 % al 80 %. Este cambio podría deberse, por ejemplo, a un ensuciamiento de filtros o a la formación de hielo parcial en el intercambiador. La consecuencia es que la temperatura a la salida del recuperador disminuye, aumentando la demanda de post-calentamiento.

Con estos cambios escalonados se observa cómo el controlador PI ajusta la apertura de la válvula para compensar rápidamente las variaciones, manteniendo la temperatura de impulsión cercana a la consigna sin generar oscilaciones significativas.

Para evitar que el sistema de post-calentamiento se encienda y apague de forma continua debido a pequeñas oscilaciones del control PI, he definido un criterio de activación de la demanda de calor basado en dos elementos: umbrales de apertura de válvula y tiempos mínimos de confirmación.

- Umbral de encendido: es el valor de apertura de la válvula a partir del cual considero que la batería hidráulica está solicitando una cantidad de calor significativa. En esta simulación, lo he fijado en el 50 % de apertura. Esto equivale aproximadamente al momento en el que la batería estaría entregando la mitad de su potencia máxima.
- Umbral de apagado: es el valor de apertura de la válvula por debajo del cual se considera que la potencia entregada es muy baja y puede interrumpirse la demanda. En este caso, lo he fijado en el 20 % de apertura.

La diferencia entre ambos umbrales introduce histéresis en el sistema: si la apertura está entre 20 % y 50 %, la demanda mantiene el estado anterior (encendido o apagado), evitando cambios de estado constantes.

Para complementar estos umbrales, también he definido tiempos mínimos de confirmación:

- Tiempo mínimo de encendido: segundos consecutivos que la apertura debe permanecer por encima del umbral de encendido para activar la demanda. Lo he fijado en 60 s, de forma que no se encienda por picos breves.
- Tiempo mínimo de apagado: segundos consecutivos que la apertura debe permanecer por debajo del umbral de apagado para desactivar la demanda. Lo he fijado en 180 s, asegurando que no se apague por caídas momentáneas.

En la simulación, la apertura de válvula calculada por el control PI se evalúa en cada paso de tiempo y alimenta dos contadores:

1. Contador de tiempo por encima del umbral de encendido, que se pone a cero si la apertura baja de ese valor.

2. Contador de tiempo por debajo del umbral de apagado, que se pone a cero si la apertura sube de ese valor.

El estado de demanda se actualiza en función de estos contadores: si el contador de encendido supera el tiempo mínimo de encendido, la demanda pasa a 1 (activa); si el contador de apagado supera el tiempo mínimo de apagado, la demanda pasa a 0 (inactiva).

A continuación, se muestran dos gráficos de la simulación del control PI.

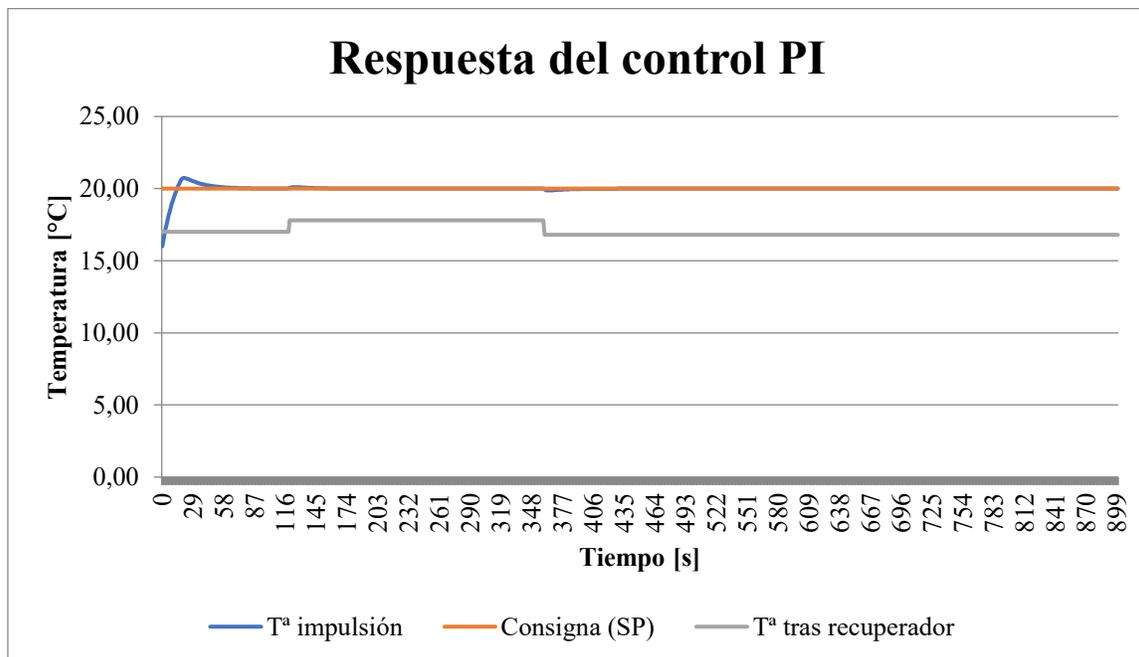


Figura 37 Respuesta de control PI

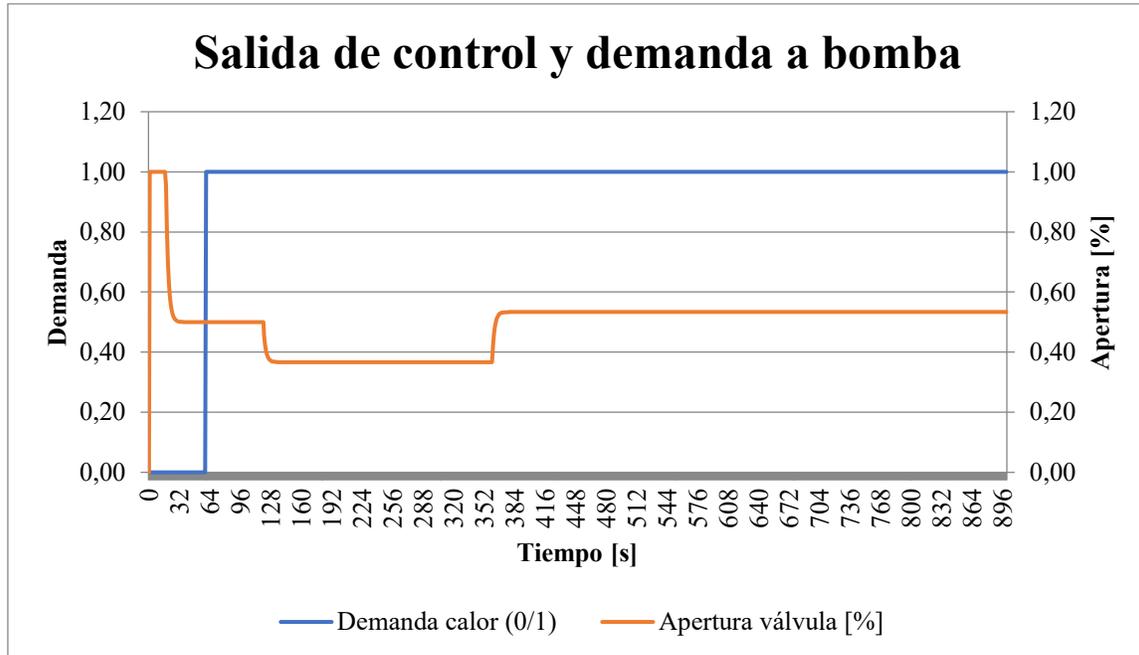


Figura 38 Gráfico de la salida del control PI

En la simulación, con umbral de encendido al 50 %, umbral de apagado al 20 % y tiempos mínimos de 60 s y 180 s respectivamente, la demanda se mantiene activa prácticamente todo el tiempo. Tras el arranque inicial, la apertura de válvula se estabiliza en torno al 50 %, justo en el umbral de encendido, por lo que la lógica no interrumpe la señal de demanda. Incluso cuando a los 120 s se introduce la perturbación más suave, la apertura desciende solo hasta aproximadamente un 39 %, sin llegar al 20 % requerido para iniciar el contador de apagado; así, el tiempo mínimo de 180 s para desconexión nunca se cumple. Posteriormente, al reducir la eficiencia a los 360 s, la apertura vuelve a incrementarse, reforzando la activación de la demanda. Este comportamiento es coherente con un ajuste pensado para priorizar la estabilidad y evitar ciclos cortos, aunque a cambio no se observen periodos con demanda nula.

Capítulo 9. Estudio de viabilidad y rentabilidad

En este capítulo se analiza la viabilidad económica de la propuesta de integración del sistema de ventilación con recuperación de calor y de la bomba de calor aerotérmica. El objetivo es determinar si la inversión inicial necesaria para la instalación de los equipos y su puesta en marcha se compensa con los ahorros energéticos conseguidos durante su vida útil. Para ello, se han estimado los costes de adquisición e instalación de cada componente, así como los gastos de operación y mantenimiento anuales. Posteriormente, se comparan los consumos energéticos de la situación actual de la vivienda con los previstos tras la implantación del nuevo sistema, aplicando los rendimientos estacionales de los equipos. Con estos datos, se realiza un análisis detallado de los flujos de caja del proyecto, calculando indicadores económicos como el periodo de retorno de la inversión (payback), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), con el fin de evaluar la rentabilidad global de la solución propuesta.

La inversión inicial contempla tanto el coste de adquisición de los equipos principales — recuperador de calor, difusores, batería de post-tratamiento, válvula, sensores, controlador PI, bomba de calor aerotérmica con unidad hidráulica asociada y depósito de inercia— como los elementos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento, tales como conductos hidráulicos y de ventilación, cableado eléctrico y protecciones. A ello se suma la mano de obra de instalación de cada subsistema, así como los permisos administrativos (proyecto técnico, legalización y tasas municipales). Sobre el coste total de construcción se ha aplicado el IVA correspondiente y se han considerado las bonificaciones y subvenciones disponibles en el marco autonómico, lo que permite reducir de forma significativa la inversión neta que debe afrontar el propietario. Tras estos ajustes, la inversión inicial asciende a unos 18.887 €, cifra que constituye la base de referencia para el análisis económico posterior.

SISTEMA	COMPONENTES	Unidades	Precio Unitario (€)	Total (€)
Ventilación	Recuperador Aldes InspirAIR 240 Classic	1	1147,11	1147,11
Ventilación	Difusores TROX SDRF-2 (22 m ³ /h)	10	41,32	413,2
Ventilación	Difusores TROX SDRF-4 (36 m ³ /h)	4	49,59	198,36
Ventilación	Conductos ventilación (PVC/aislados)	-	-	495,87
Ventilación	Mano de obra instalación ventilación	-	-	826,45
Post-tratamiento	Batería Aldes CPIL (post-heating)	1	808,26	808,26
Post-tratamiento	Válvula Siemens VD115CLC (DN15)	1	26,45	26,45
Post-tratamiento	Sonda de temperatura	1	24,79	24,79
Post-tratamiento	Controlador PI	1	123,97	123,97
Post-tratamiento	Termostato antihielo	1	66,12	66,12
Post-tratamiento	Conductos hidráulicos DN32	-	-	165,29
Post-tratamiento	Mano de obra instalación batería	-	-	247,93
Aeroterminia	Vaillant aroTHERM plus 15 + uniTOWER	1	9578,51	9578,51
Aeroterminia	Depósito de inercia 140 L	1	850	850
Aeroterminia	Cableado y protecciones eléctricas	1	123,97	123,97
Aeroterminia	Mano de obra instalación aeroterminia	-	-	1652,89
				16.749,17
TOTAL				16.749,17
IVA (21%)				3.517,33
Total Construcción				20.266,50

Figura 39 Cálculo de coste de inversión del sistema

- ICIO (Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras): tras el RD-ley 7/2025 publicado en el BOE, los ayuntamientos pueden aplicar bonificaciones de hasta el 95% en el ICIO para instalaciones de aeroterminia/geoterminia⁵⁰. Es decir, es habitual que los municipios bonifiquen casi totalmente este impuesto para renovables.
- IBI (Impuesto Bienes Inmuebles): igualmente el RD-ley 7/2025 permite bonificar hasta el 50% del IBI en edificios que instalen aeroterminia/geoterminia⁵¹. Esto se suma a las bonificaciones tradicionales, equiparando las ayudas fiscales de aeroterminia a las de placas solares.
- Subvenciones autonómicas (Asturias): en el marco del Plan de Recuperación (“Next Generation”), existe un programa gestionado por IDAE/Asturias (Orden TED/765/2020,

⁵⁰ Robledo, M. (2025, 7 de julio).

⁵¹ Robledo, M. (2025, 7 de julio).

BOE) que convoca ayudas para energía térmica renovable⁵². En él, los particulares pueden recibir:

- Ayuda base: 500 € por kW instalado (hasta 3.000 € máximo)⁵³ (para viviendas privadas, RD 1124/2021 Programa 6).
- Ayudas por municipio pequeño: +5% del porcentaje base si el municipio tiene <5.000 habitante⁵⁴.
- Límites: hasta cubrir el 45% del coste (en sector privado)⁵⁵. La orden de bases es la TED/765/2020 (RD-ley 6/2022).
- Otras deducciones fiscales: además, a nivel estatal existe la deducción IRPF por obras de eficiencia energética. La Ley de IRPF (Ley 19/2022, DA 50^a) establece deducciones del 20% al 60% sobre el coste de las obras (según mejora) en la vivienda habitual⁵⁶. Estas deducciones se aplican al presentar la declaración de la renta.

PERMISOS			
			-
Memoria Proyecto Técnico		800,00	800,00
Legalización y boletín (OCA)		500,00	500,00
IMPUESTO ICIO (4%)	4%	669,97	669,97
Total con subvención		Total Permisos	1.969,97
BONIFICACIONES			
			-
Bonificación 95% IMPUESTO ICIO	4%	669,97	- 669,97
Subvención autonómica	40%	6.699,67	- 2.679,87
Total con subvención		Total Bonificaciones	- 3.349,83

INVERSIÓN NETA 18.886,63

Figura 40 Permisos y bonificaciones

⁵² Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s. f.).

⁵³ Kosner. (s. f.).

⁵⁴ Kosner. (s. f.).

⁵⁵ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s. f.).

⁵⁶ Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). (2025, 21 de marzo).

Además de la inversión inicial, es necesario contemplar los gastos de operación y mantenimiento que generará el sistema a lo largo de su vida útil. Estos incluyen las revisiones periódicas del recuperador de calor, de la batería de post-tratamiento y de la bomba de calor aerotérmica

GASTOS OPERATIVOS ANUALES	Unidades	Precio Unitario (€)	Total (€)
Mantenimiento anual Recuperador	Mano alzada	100,00	100,00
Mantenimiento anual Batería post-tratamiento	Mano alzada	50,00	50,00
Mantenimiento anual Aerotermia	Mano alzada	180,00	180,00
IVA	21%		69,30
Total gastos anuales			399,30

Figura 41 Gastos operativos anuales

Tomando como referencia un precio base de la electricidad de 0,30 €/kWh, se obtiene que el consumo energético de la vivienda en la situación actual asciende a 6.059 € anuales, mientras que tras la implantación del sistema con recuperador de calor y bomba de calor aerotérmica el gasto se reduce a 2.392 € anuales. Esto supone un ahorro anual neto de aproximadamente 3.667 €, lo que confirma la notable disminución de la demanda de calefacción y ACS gracias a la mejora de la eficiencia. Dicho ahorro constituye la base del flujo de caja empleado en el análisis de viabilidad, sobre el cual se calculan los indicadores económicos (VAN, TIR y periodo de retorno).

CONSUMO TOTAL ACTUAL	Consumo KWh	Consumo (€)	CONSUMO TOTAL PROPUESTA	Demanda KWh	Consumo KWh	Consumo (€)
Calefacción	48390,598	4839,05	Calefacción	37986,62	4555,18	1.366,55
ACS	12204,302	1220,43	ACS	7518,53	1999,60904	599,88
			Electricidad Adicional		1418,47764	425,54
	60.595	6.059			7.973	2.392

Figura 42 Cálculo de ahorro en el consumo energético

Año	Inversión	Gasto	Ingreso	Cash Flow	Cash flow acumulado (payback)
-	18.887			- 18.887	- 18.887
1		399	3.667	3.268	- 15.618
2		399	3.667	3.268	- 12.350
3		399	3.667	3.268	- 9.082
4		399	3.667	3.268	- 5.814
5		399	3.667	3.268	- 2.546
6		399	3.667	3.268	723
7		399	3.667	3.268	3.991
8		399	3.667	3.268	7.259
9		399	3.667	3.268	10.527
10		399	3.667	3.268	13.795
11		399	3.667	3.268	17.064
12		399	3.667	3.268	20.332
13		399	3.667	3.268	23.600
14		399	3.667	3.268	26.868
15		399	3.667	3.268	30.136
16		399	3.667	3.268	33.405
17		399	3.667	3.268	36.673
18		399	3.667	3.268	23.600
19		399	3.667	3.268	26.868
20		399	3.667	3.268	30.136
21		399	3.667	3.268	33.405
22		399	3.667	3.268	36.673
23		399	3.667	3.268	39.941
24		399	3.667	3.268	43.209
25		399	3.667	3.268	46.477

Figura 43 Cálculo de rentabilidad

Una vez definidos los costes de inversión inicial, los gastos de mantenimiento y los ahorros energéticos anuales, se construye el flujo de caja (cash-flow) del proyecto a lo largo de un horizonte temporal de 25 años, que es una vida útil razonable para este tipo de instalaciones. En cada ejercicio se consideran como ingresos los ahorros conseguidos en la factura energética respecto a la situación de partida de la vivienda, mientras que los gastos incluyen el mantenimiento

anual. La diferencia entre ambos constituye el flujo neto de caja que, acumulado a lo largo de los años, permite determinar el tiempo de retorno de la inversión.

Los resultados muestran un periodo de retorno simple (payback) de aproximadamente poco más de 5 años, lo que significa que, transcurrido ese tiempo, la inversión inicial ya queda amortizada gracias a los ahorros energéticos generados. Asimismo, se calcula el Valor Actual Neto (VAN), que refleja la rentabilidad del proyecto en términos de valor presente de los flujos de caja futuros descontados a una tasa del 7 %. En este caso, el VAN asciende a unos 25.881 €, lo que confirma que la inversión no solo es recuperable, sino que genera un excedente económico considerable. Por otra parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR), que representa la rentabilidad implícita de la inversión, alcanza un 17,0 %, valor claramente superior a la rentabilidad de inversiones financieras convencionales, lo que refuerza la viabilidad económica de la propuesta.

Además de los indicadores habituales (VAN y TIR), se ha calculado el Retorno sobre la Inversión (ROI) como medida complementaria de la rentabilidad global del proyecto. El ROI se obtiene de la relación entre los beneficios netos acumulados a lo largo de la vida útil del sistema y la inversión inicial requerida. Para este estudio se ha adoptado una vida útil de 25 años, coherente con la durabilidad esperada de los equipos de ventilación y climatización en condiciones de mantenimiento adecuado. En estas circunstancias, el ROI alcanza un valor del 246 %, lo que implica que, durante su horizonte de vida útil, la inversión genera más del doble del capital desembolsado inicialmente. Este resultado refuerza la conclusión de que la propuesta es no solo técnicamente viable, sino también altamente rentable desde el punto de vista económico.

En conjunto, estos indicadores ponen de manifiesto que la solución planteada no solo mejora la eficiencia energética y el confort de la vivienda, sino que constituye también una alternativa económicamente atractiva y sostenible en el tiempo.

En definitiva, el estudio económico muestra que la solución propuesta no solo es viable desde el punto de vista energético, sino también rentable a nivel financiero. La inversión inicial se compensa en un plazo razonable gracias al importante ahorro en los costes de calefacción y ACS, y a lo largo de la vida útil del sistema se generan beneficios claros frente a las alternativas

convencionales. De esta manera, se puede concluir que la integración del recuperador de calor, la batería de post-tratamiento y la bomba de calor aerotérmica representa una opción atractiva y sostenible, capaz de garantizar confort en la vivienda al mismo tiempo que reduce de manera significativa el gasto energético anual.

No obstante, conviene señalar que toda inversión conlleva ciertos riesgos que deben ser considerados en la evaluación de la viabilidad. En este caso, los principales riesgos identificados son de carácter financiero y técnico. Entre ellos destacan la alta inversión inicial, que aunque se compensa con los ahorros energéticos puede suponer una barrera de entrada para algunos usuarios; los costes de operación y mantenimiento, que podrían incrementarse en caso de averías o revisiones imprevistas; y la posible obsolescencia tecnológica, dado el rápido avance en la eficiencia de bombas de calor y sistemas de ventilación en el mercado. Asimismo, factores externos como la variación de los precios de la energía o cambios en la normativa de subvenciones y fiscalidad podrían influir en la rentabilidad final. Por este motivo, junto al análisis de los indicadores económicos se incorpora una visión de riesgo que permite contextualizar los resultados y reforzar la validez del estudio.

Riesgo identificado	Descripción	Probabilidad	Impacto	Medidas de mitigación
Alta inversión inicial	El desembolso económico puede suponer una barrera para la adopción.	Media	Alto	Acceso a subvenciones (Next Generation, ayudas autonómicas), financiación bancaria verde.
Costes de mantenimiento	Posibles averías o revisiones más frecuentes de lo previsto.	Baja	Medio	Contratos de mantenimiento preventivo; elección de equipos con garantía extendida.
Obsolescencia tecnológica	Nuevas soluciones más eficientes pueden reducir el atractivo de la inversión.	Media	Medio	Selección de equipos de última generación con refrigerante natural (R290) y larga vida útil.
Variación del precio de la energía	Una caída de los precios de electricidad/gas reduciría los ahorros previstos.	Media	Alto	Escenarios de sensibilidad en el VAN/TIR con diferentes precios de la energía.
Cambios normativos o fiscales	Posible reducción futura de bonificaciones, subvenciones o deducciones fiscales.	Baja	Alto	Evaluar la rentabilidad sin ayudas; seguimiento de nuevas normativas.
Vida útil inferior a la prevista	Fallos prematuros en los equipos que limiten su durabilidad a < 25 años.	Baja	Alto	Selección de fabricantes con experiencia, garantías ampliadas, mantenimiento adecuado.

Tabla 5 Matriz de riesgos del proyecto

Con el fin de tener en cuenta la incertidumbre asociada a la evolución futura de los precios de la electricidad, se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre los principales indicadores económicos del proyecto (VAN y TIR). Este enfoque constituye una medida de mitigación frente al riesgo identificado de variación del coste energético, permitiendo evaluar cómo se vería afectada la rentabilidad en diferentes escenarios de mercado.

<i>Análisis de sensibilidad VAN</i>					
Coste de la energía					
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48
47.286 €	36.584 €	30.162 €	25.881 €	17.319 €	6.617 €

<i>Análisis de sensibilidad TIR</i>					
Coste de la energía					
0,10	0,20	0,26	0,30	0,38	0,48
25,7%	21,4%	18,7%	17,0%	13,3%	8,4%

Figura 44 Análisis de sensibilidad del VAN y del TIR

Los resultados obtenidos muestran que, para un precio de referencia de 0,30 €/kWh, la inversión alcanza un VAN positivo y una TIR claramente superior a la tasa de descuento empleada, lo que confirma la viabilidad económica de la propuesta. Asimismo, el análisis evidencia una relación directa entre el precio de la electricidad y la rentabilidad del proyecto: a mayor coste de la energía, mayores ahorros y mejores indicadores financieros; mientras que en escenarios de precios más bajos la rentabilidad disminuye, pero se mantiene positiva. En consecuencia, puede concluirse que el proyecto presenta una robustez significativa frente a la incertidumbre del mercado eléctrico, reforzando la validez del estudio económico.

Capítulo 10. Conclusiones y acciones futuras

El proyecto ha logrado integrar con éxito un sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor, una batería de post-tratamiento hidrónica y una bomba de calor aerotérmica en una vivienda unifamiliar existente, demostrando su viabilidad técnica. Esta solución integrada reduce de forma significativa la demanda energética de la vivienda: la introducción de la ventilación con recuperador disminuye las pérdidas de calor por ventilación en torno al 80%, y la sustitución de la caldera de gasóleo por una bomba de calor eficiente aporta energía renovable al sistema de calefacción y ACS. Como resultado, el consumo de energía final de la vivienda se ha reducido drásticamente, eliminando además la quema de combustibles fósiles in situ. En términos de confort, el sistema garantiza unas condiciones interiores adecuadas: el recuperador aporta aire limpio precalentado, la batería de post-tratamiento asegura una temperatura de impulsión confortable incluso en condiciones exteriores extremas, y la bomba de calor mantiene la temperatura de consigna interior de 20°C de manera estable. Todos los cálculos de diseño (térmicos, hidráulicos, aerodinámicos y eléctricos) y la selección de equipos han verificado que el sistema se puede implantar de forma segura y conforme a la normativa vigente, integrando eficiencia energética y habitabilidad sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad de la vivienda.

Desde el punto de vista económico, los resultados globales confirman la rentabilidad de la inversión. El consumo energético anual de la vivienda, expresado en coste, se reduce en torno a un 60%, pasando de una factura estimada de 6.059 € anuales a aproximadamente 2.392 € tras la reforma, lo que supone un ahorro neto de unos 3.667 € cada año. Este ahorro energético sustancial permite amortizar la inversión inicial, estimada en 18.887 €, en un plazo aproximado de cinco años (ligeramente superior a cinco, pero inferior a seis). A partir de ese punto, el sistema comienza a generar beneficios económicos netos para el propietario. Los indicadores financieros calculados refuerzan esta conclusión: se ha obtenido un Valor Actual Neto (VAN) positivo del orden de 25.900 €, y una Tasa Interna de Retorno (TIR) cercana al 17%, valores notablemente altos en comparación con inversiones convencionales en el sector residencial. Asimismo, el Retorno de la Inversión (ROI) acumulado a lo largo de la vida útil del sistema alcanza aproximadamente un

246%, lo que implica que en términos absolutos la mejora propuesta devolvería más del triple de la inversión inicial en ahorros durante su ciclo de vida. Incluso considerando escenarios conservadores (por ejemplo, variaciones a la baja en el precio de la energía eléctrica), el análisis de sensibilidad realizado muestra que el VAN se mantiene positivo y la TIR se mantiene por encima de tasas de descuento razonables, lo que confirma la robustez económica del proyecto. En suma, desde una perspectiva técnica y económica, la estrategia de rehabilitación energética planteada combina eficiencia energética, confort interior y rentabilidad financiera en una propuesta coherente. Además de los beneficios cuantitativos, cabe destacar que la modernización del sistema de climatización y ventilación mejora la sostenibilidad de la vivienda (reduciendo sustancialmente sus emisiones de CO₂ y mejorando su calificación energética) y sienta las bases para futuras adaptaciones a un entorno energético más limpio.

A nivel personal, el desarrollo de este proyecto ha resultado ser una experiencia extraordinariamente enriquecedora. Durante el proyecto he tenido la oportunidad de aplicar y consolidar un amplio abanico de conocimientos adquiridos a lo largo del Máster en Ingeniería Industrial, desde la termodinámica y la climatización hasta la economía y la gestión de proyectos. En particular, llevar a cabo el diseño detallado de un sistema complejo como el propuesto – abarcando cálculos térmicos, selección de equipos comerciales, integración de sistemas de control, me ha permitido comprobar de primera mano la naturaleza multidisciplinar de los proyectos de eficiencia energética.

Este proyecto también me ha enseñado la importancia de unir la perspectiva técnica con la económica a la hora de evaluar soluciones de ingeniería. Si bien tenía claro desde un principio que las mejoras en eficiencia energética debían ser técnicamente sólidas, la elaboración del plan de negocio asociado me ha hecho más consciente de cómo factores como la inversión inicial, el período de retorno, los costes de mantenimiento o los riesgos tecnológicos influyen en la viabilidad real de una propuesta. Asimismo, durante el desarrollo del TFM enfrenté desafíos prácticos que supusieron valiosas lecciones personales, como la gestión efectiva del tiempo y de los recursos disponibles, la necesidad de adaptarme a información técnica dispersa y la importancia de mantener una actitud perseverante y metódica ante problemas complejos.

Al pensar en las decisiones de diseño que tomé en este proyecto, creo que en general fueron acertadas, aunque también hubo compromisos y aprendizajes para el futuro. Decidí centrar la rehabilitación en sistemas activos eficientes (recuperador de calor y bomba de calor aerotérmica) en vez de apostar por medidas pasivas como aumentar el aislamiento. Esto me permitió conseguir grandes reducciones de consumo con una inversión rentable, aunque también hizo el sistema más complejo y dependiente de un buen mantenimiento (limpieza de filtros, revisiones, etc.). En un proyecto similar, habría que valorar también la capacidad de los usuarios para usar y mantener bien estos equipos. La batería de post-tratamiento aporta seguridad en condiciones extremas, pero añade costes y complejidad; en el futuro sería interesante estudiar alternativas que simplifiquen el sistema sin perder confort.

Otra decisión clave fue elegir la aerotermia como sistema de generación térmica. Frente a otras opciones (caldera, geotermia o solar térmica), me pareció la más equilibrada en coste, integración y eficiencia. Es verdad que depender de la electricidad supone riesgos, pero el análisis mostró que el sistema sigue siendo rentable incluso si el precio de la energía baja. Además, la tendencia es que la electricidad se haga cada vez más limpia y flexible, lo cual jugará a favor de esta tecnología.

De cara al futuro, existen varias líneas de mejora que podrían aumentar la eficiencia y la rentabilidad del sistema:

- Integración de energía fotovoltaica, de manera que parte del consumo eléctrico de la bomba de calor y los equipos auxiliares pueda ser autoabastecido, reduciendo aún más la dependencia de la red.
- Desarrollo de un control avanzado, capaz de adaptar la ventilación y la producción térmica en función de la ocupación real, las condiciones climáticas o las tarifas horarias de la electricidad.
- Validación en un caso real monitorizado, lo que permitiría contrastar los resultados teóricos con datos de operación y ajustar los modelos utilizados.

- Replicabilidad en diferentes tipologías de vivienda, tanto en unifamiliares de distinto tamaño como en edificios plurifamiliares, analizando la mejor forma de integrar la solución en cada contexto.
- Incorporación de nuevas tecnologías emergentes, como recuperadores entálpicos de mayor eficiencia, sistemas de almacenamiento térmico o bombas de calor con refrigerantes más sostenibles.
- Complemento con mejoras pasivas en la envolvente, como el refuerzo del aislamiento o la sustitución de carpinterías, lo que, combinado con el sistema propuesto, acercaría la vivienda al estándar de consumo casi nulo.

En resumen, este proyecto me ha demostrado que es posible unir eficiencia, confort y viabilidad económica en una vivienda. He aprendido a integrar la parte técnica con la económica, y a tomar decisiones con una visión crítica y práctica. A nivel personal, este proyecto me ha servido para crecer como ingeniera, porque me ha hecho aplicar lo aprendido en el máster, resolver problemas reales y darme cuenta de la importancia de encontrar siempre un equilibrio entre lo técnico, lo económico y lo humano.

Referencias

Evolución precio MWh. (s. f.). *Evolución del precio de la luz (€/MWh)*.
<https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh/evolucionprecio-luz>

TFG. (s. f.). *Trabajo de Fin de Grado: Estudio técnico-económico de instalación de autoconsumo solar*.
<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/76864/1/TFGAriasSitges%2CCandela.pdf>

Pacto Mundial de la ONU España. (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*.
<https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/>

Repsol. (s.f.). *Aeroterminia: qué es, cómo funciona y sus ventajas*.
<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/aeroterminia/index.cshtml>

Arnabat, I. (2019, 16 de mayo). *Aeroterminia para ACS y calefacción: Todo lo que debes saber (Infografía)*. Caloryfrio. <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/aeroterminia/aeroterminia-acsc-calefaccion-todo-lo-que-debes-saber-infografia.html>

Preciogas. (2025, 13 de enero). *¿Cuánto cuesta una instalación de aeroterminia en 2025?*. Preciogas. <https://preciogas.com/instalaciones/aeroterminia>

Toshiba Aire. (s.f.). *Aeroterminia calefacción y aire acondicionado*. <https://www.toshiba-aire.es/aeroterminia-calefaccion-aire-acondicionado>

Junkers Bosch. (s.f.). *¿La aeroterminia es el mejor sistema de calefacción en climas fríos?*. Junkers Bosch. <https://www.junkers-bosch.es/conocimiento/calefaccion/mejor-sistema-de-calefaccion-para-climas-frios/>

Vaeron. (s.f.). *¿Qué es el SCOP y el COP en aeroterminia?*. Vaeron. <https://vaeron.es/que-es-el-scop-y-el-cop-en-aeroterminia/>

SFE Solar. (2025, 3 de abril). *Instalación fotovoltaica de autoconsumo conectada a red.*
<https://www.sfe-solar.com/noticias/autoconsumo/instalacion-fotovoltaica-conectada-a-red/>

Repsol. (s.f.). *¿Qué es un contador bidireccional?*
<https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-es-contador-bidireccional/>

Atlas Green Energy. (2024, 20 de julio). *Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red.*
<https://atlas-greenenergy.com/es/esquema-instalacion-fotovoltaica-conectada-red/>

Zigor. (2024, 14 de octubre). *Inversores centrales o string: ¿Cuál es la mejor opción para mi proyecto “Utility Scale”?*
<https://zigor.com/solar/inversores-centrales-string-utility-scale/>

Cambio Energético. (2019, 7 de noviembre). *Micro inversores vs. optimizadores de potencia.*
<https://www.cambioenergetico.com/blog/micro-inversores-vs-optimizadores-de-potencia/>

SolarReviews. (2024, 6 de febrero). *Pros y contras de los microinversores vs. inversores de cadena.*
<https://www.solarreviews.com/es/blog/pros-y-contras-de-inversores-monofasicos-vs-microinversores>

Cambio Energético. (s.f.). *Tipos de paneles solares: ¿Cuál me conviene para mi instalación?*
<https://www.cambioenergetico.com/blog/tipos-de-paneles-solares-fotovoltaicos/>

SolarReviews. (2023, 3 de noviembre). *Tipos de paneles solares: ¿Cuál es la mejor opción?*
<https://www.solarreviews.com/es/blog/pros-y-contras-de-paneles-solares-monocristalinos-vs-policristalinos>

Cambio Energético. (2018, 8 de junio). *¿Paneles solares térmicos o aerotermia con autoconsumo fotovoltaico?*
<https://www.cambioenergetico.com/blog/paneles-solares-termicos-vs-aerotermia/>

Casas Pasivas Josman. (2018, 8 de junio). *Recuperadores de calor.*
<https://casaspasivasjosman.es/2018/06/08/recuperadores-de-calor/>

Caloryfrio. (2024, 15 de enero). *Ventilación de doble flujo: ¿qué es y cómo funciona?*.

<https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/ventilacion-doble-flujo-que-es-como-funciona.html>

Tecna. (2023, 10 de marzo). *Recuperador de calor: Qué es, funcionamiento y aspectos técnicos.*

<https://tecna.es/recuperador-de-calor-funcionamiento-ventajas/>

Tecna. (s.f.). *Recuperador de calor: Qué es, funcionamiento y aspectos técnicos.* Tecna.

<https://tecna.es/recuperador-de-calor-funcionamiento-ventajas/>

Caloryfrio. (2024, 15 de enero). *Ventilación de doble flujo: ¿qué es y cómo funciona?*. Caloryfrio.

<https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/ventilacion-doble-flujo-que-es-como-funciona.html>

Enertres. (s.f.). *Enertres Confort 90/25V*. <https://enertres.com/producto/enertres-confort-90-25v/>

Casas Pasivas Josman. (2018, 8 de junio). *Recuperadores de calor.*

<https://casaspasivasjosman.es/2018/06/08/recuperadores-de-calor/>

Soler & Palau. (2020, 28 de septiembre). *Ventilación con recuperador de calor. ¿Cómo funciona?*

¿Qué beneficios tiene?. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilacion-recuperador-calor/>

WeatherSpark. (2024). *Datos históricos meteorológicos de 2024 en Oviedo, España.*

<https://es.weatherspark.com/h/y/34984/2024/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2024-en-Oviedo-Espa%C3%B1a#Figures-Temperature>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2009). *Guía técnica: Condiciones climáticas exteriores de proyecto.* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12_Guia_tecnica_condiciones_climaticas_exteriores_de_proyecto_e4e5b769.pdf

Siber Zone, S.L.U. (2024, mayo 16). *Siber Ventilación Inteligente.* Siber Zone.

<https://www.siberzone.es/>

Aldes. (2023). InspirAIR Side 240 Classic – Ficha técnica (Ref. 11023310). Recuperado de https://assets.aldes.es/assets/productRefDocs/Aldes_ES_pdf_v2/ES-Espana-Aldes-InspirAIR-Side-240-Classic-Derecha-11023310.pdf

Soler & Palau. (s.f.). *Ventilación mecánica controlada en vivienda unifamiliar con recuperación de calor: Caso práctico*. Recuperado el 24 de julio de 2025, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/vmc-unifamiliar-recuperacion-calor-caso-practico/>

Eurovent Certification. (s.f.). *Cómo seleccionar una unidad de tratamiento de aire*. Recuperado el 24 de julio de 2025, de <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/how-to-select-an-air-handling-unit?universe=air-quality-and-ventilation>

Veinsa. (s.f.). *Conductos rectangulares y accesorios para HVAC*. Recuperado el 24 de julio de 2025, de <https://veinsa.com/producto/conductos-rectangulares-y-accesorios-para-hvac/>

TROX España. (s.f.). *Difusores de peldaño SDRF*. Recuperado el 24 de julio de 2025, de <https://www.trox.es/difusores-de-pelda%C3%B1o/sdrf-824028d67036d55e>

Vaillant. (s.f.). *Bomba de calor Vaillant aroTHERM plus – Catálogo técnico*. Congreso Edificios Energía Casi Nula. Recuperado de <https://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/wp-content/uploads/VAILLANT-aroTHERM-plus.pdf>

IDAE & AFEC. (2023). *La bomba de calor en la rehabilitación energética de edificios: Guía 25*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/Guias_IDAE_La_Bomba_de_calor_2023_V11.pdf

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2002). *Instrucción técnica complementaria ITC-BT-47. Instalaciones generadoras de baja tensión* [PDF]. https://directo-electro.es/files/reglamentobajatension/ITC_BT_47.pdf

Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2002). *Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias ITC-BT 01 a 51* (Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto).

Boletín Oficial del Estado, núm. 224, de 18 de septiembre de 2002, páginas 34397 a 34528.

<https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/08/02/842/con>

Aldes. (s.f.). *Manuale di installazione InspirAIR Side* [Archivo PDF]. Recuperado de

<https://assets.aldes.fr/assets/docsIT/manuale-di-installazione-inspirair-side-multilingue.pdf>

Centro Técnico Europeo (CTEEP). (19 de julio de 2021). *Definición del coeficiente kv*.

Recuperado de <https://www.cteep.com/instalaciones-termicasrite/definicion-del-coeficiente-kv/>

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2012). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press. <https://fbsbook.org>

Robledo, M. (2025, 7 de julio). *Nuevas bonificaciones al IBI e ICIO impulsan la aerotermia, una reivindicación de Agremia. e-ficiencia.*

<https://e-ficiencia.com/agremia-nuevas-bonificaciones-ibi-ico-aerotermia/>

Kosner. (s. f.). *Subvenciones y ayudas energías renovables Asturias 20222023*. Recuperado de

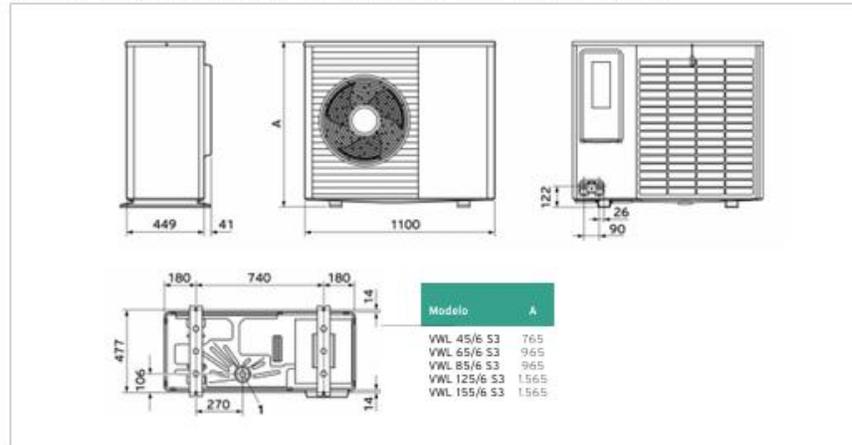
<https://www.kosner.es/subvenciones-y-ayudas-energias-renovables-asturias-2022-2023-2/afoncasa.org+4kosner.es+4kosner.es+4>

ANEXO I: Ficha técnica VAILLANT-aroTherm plus

 Bombas de calor

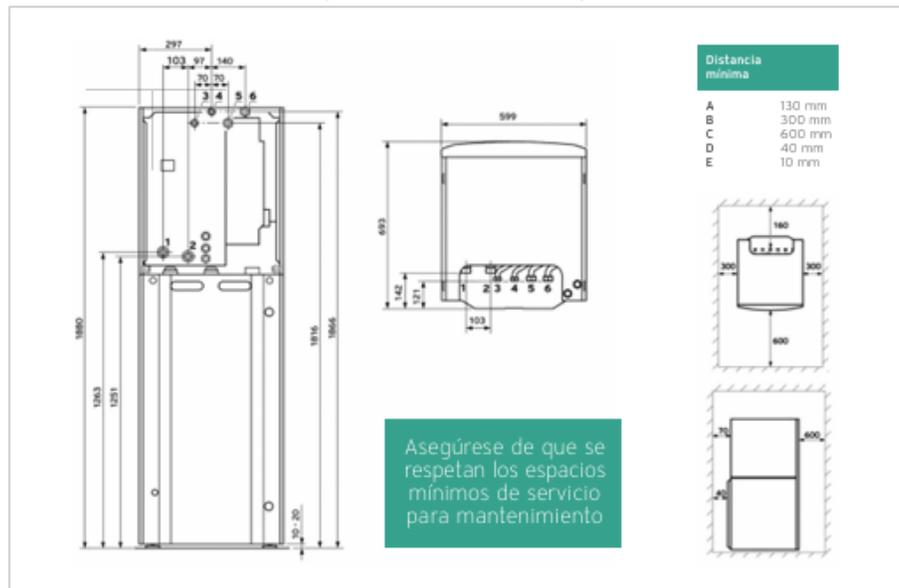
aroTHERM plus

Dimensiones, conexiones y espacio mínimo de montaje y servicio



uniTOWER

Dimensiones, conexiones y espacio mínimo de montaje y servicio



aroTHERM plus

Datos técnicos

Características	Ud	aroTHERM plus 4	aroTHERM plus 6	aroTHERM plus 8	aroTHERM plus 12	aroTHERM plus 12T	aroTHERM plus 15	aroTHERM plus 15T
Alimentación eléctrica UE		230V/50Hz				400V/50Hz	230V/50Hz	400V/50Hz
Eficiencia Energética Calef. 35 °C/35 °C Rango A+++ - B		A+++ / A++						
η_{ca} Calefacción 35 °C	%	180	186	187	200	200	187	186
PCA (Potencial Calentamiento Atmosférico)	EN 51720:4	3						
CO ₂ , equivalente	Por máquina t	0,0018	0,0027		0,0039			
Rango de trabajo min - máx	Calefacción	-25 +43						
	ACS	-20 +43						
	Refrigeración	+15 +46						
Potencia Calefacción min - máx PERMANENTE	A7/W35	2,2-5,5	3,1-7,8	2,9-10,1	5,5-14,0		5,5-18,1	
	A7/W45	2,0-5,5	2,7-7,5	2,5-9,6	5,4-13,5		5,5-17,4	
	A7/W55	1,8-5,3	2,2-7,5	2,3-9,4	4,8-13,1		4,8-17,1	
COP ¹	A7/W35	4,80	4,79		5,38			
	A7/W45	3,56	3,55		4,10			
	A7/W55	2,80	2,93		3,11			
Potencia Refrigeración min - máx PERMANENTE	A35/W7	1,8-5,0	2,5-6,3	2,5-7,7	4,4-10,0		4,4-12,8	
	A35/W1B	2,4-5,6	3,6-7,1	3,6-9,6	6,0-13,4		6,0-17,3	
EER ¹	A35/W7	3,37	3,46		3,52			
	A35/W1B	4,29	4,21		4,58			
Temperatura máxima sin resistencia eléctrica de apoyo	Calefacción	75						
	ACS	70						
Presión sonora Ud. Exterior a 3m, directo (2) / A7/W35	modo normal	36	37		40		43	
	modo noche	28		33				
Rendimiento en ACS²								
Eficiencia Energética ACS Rango A+ - F		A+						
η_{act} ACS	Clima cálido	% 190		193				
COP ACS EN 16147 (A14)		4,41		4,43				
Perfil de carga		L	XL					
Eficiencia Energética ACS Rango A+ - F		A+						
η_{act} ACS	Clima medio	% 171		163				
COP ACS EN 16147 (A7)		3,99		3,76				
Perfil de carga		L	XL					
Eficiencia Energética ACS Rango A+ - F		A+						
η_{act} ACS	Clima frío	% 167		149				
COP ACS EN 16147 (A2)		3,77		3,41				
Perfil de carga		L	XL					



(1) VDE 265757-TL2-B certificado S2, datos a EN 14501
(2) Datos referidos a combinación con termo hidráulica

Características		Ud	aroTHERM plus 4	aroTHERM plus 6	aroTHERM plus 8	aroTHERM plus 12	aroTHERM plus 12T	aroTHERM plus 15	aroTHERM plus 15T
Rendimiento en calefacción									
Eficiencia estacional Calefacción etaS	Clima cálido W35	%	220	229	228	256		245	
	Clima medio W35		180	186	187	200		187	
	Clima frío W35		152	162	159	168			
Calefacción SCOP EN 14825	Clima cálido W35		5,57	5,81	5,78	6,48		6,19	
	Clima medio W35		4,56	4,71	4,75	5,07		4,74	
	Clima frío W35		3,88	4,13	4,05	4,27		4,28	
Unidad Exterior			VWL 45/6 230V 53	VWL 65/6 230V 53	VWL 85/6 230V 53	VWL 125/6 230V 53	VWL 125/6 400V 53	VWL 155/6 230V 53	VWL 155/6 400V 53
Peso neto		kg	114	128		194	210	194	210
Refrigerante			R290						
Carga de refrigerante		kg	0,6	0,9		1,3			
Dimensiones sin embalaje	All(Anch)/Prof	mm	765/1100/450		965/1100/450		1.565/1100/450		
Caudal bomba de calefacción		l/h	780	1050	1300	2065		2500	
Presión disponible		̑Pa	58	50	40	55		38	
Caudal mínimo		l/h	400	540		995			
Caudal máximo de ventilación		m ³ /h	2300	3000		6000			
Conexiones hidráulicas		"	G 1 1/4						
Corriente máxima		A	14,3	15,0		23,3	15,0	23,3	15,0
Interruptor protección recomendado	Curva C	A	16	16		25	16A trif. 3P+N	25	16A trif. 3P+N
Potencia sonora EN 12102	A7W35	dB(A)	51	50	58		61		
	Modo silencioso		46		51				
	ErP A7/W55		52	57		60	61		
Unidad interior - torre hidráulica			VIH DW 190/6						
Alimentación eléctrica			230V / 50 Hz						
Dimensiones sin embalaje	All(Anch)/Prof	mm	1.880/595/693						
Peso neto		kg	143						
Volumen equivalente agua a 40 °C	Acum. 70 °C entrada 10 °C	l	370						
Volumen acumulación		l	185						
Tiempo de calentamiento a temperatura nominal	EN 16147	min	192	125	<125	80	80	<80	<80
Máx. presión circuito calef.		bar	3						
Potencia sonora EN 12102	A7W35	dB(A)	<30						
Conexiones hidráulicas	Bomba de calor	"	G 1 1/4						
	Circuito calefacción		G 1						
Unidad interior - módulo hidráulico			MEH97/6						
Alimentación eléctrica			230-400V / 50 Hz						
Dimensiones sin embalaje	All(Anch)/Prof	mm	720/440/350						
Peso neto		kg	20						
Máx. presión circuito calef.		bar	3						
Potencia sonora EN 12102	A7W35	dB(A)	<29						
Conexiones hidráulicas	Bomba de calor	"	G 1 1/4						
	Circuito calefacción		G 1						

ANEXO II: Ficha técnica radiador EUROPA C

EUROPA C

Radiador de Aluminio

PRESTACIONES

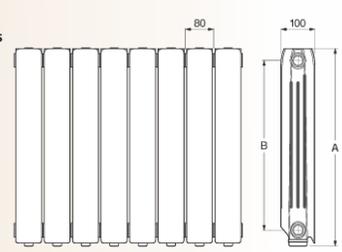
- Agradable estética**
Su diseño plano y sin aberturas configura una estética moderna que hace innecesario el uso de cubreradiadores, que obligan a redimensionar la instalación.
- Máxima duración**
La aleación especial utilizada en su fabricación resistente a la corrosión y una fabricación controlada, los hacen tan duraderos como su vivienda.
- Integración en instalaciones de baja temperatura**
El gran poder de transmisión térmica del aluminio hace posible una elevada emisión térmica, que junto a la amplia gama de alturas disponibles permiten adaptarse de forma sumamente sencilla a instalaciones de baja temperatura, consiguiendo mejores sensaciones de confort térmico y mayores ahorros energéticos.
- Estanquidad total**
Nuestro sistema exclusivo de junta elástica entre elementos asegura una estanquidad indefinida. Todos los elementos son probados, formando baterías, a una vez y media la presión de servicio, es decir, a 9 kg/cm²
- Perfecto acabado**
Se suministran pintados individualmente con resinas epoxi polimerizadas, que le proporcionan un acabado de gran belleza y duración, montados en baterías de 2 a 12 elementos y protegidos por una gruesa funda de plástico retráctil y protectores laterales de cartón.



Garantía 10 años



ESTANQUIDAD TOTAL
SISTEMA DE JUNTA ELÁSTICA



Especialmente indicado para trabajar en instalaciones de baja temperatura, con ΔT 30°C.
Datos técnicos en tabla

No aislar el radiador completamente de la instalación, salvo que esté equipado con purga automática.
No aislar la instalación completa en caso de instalaciones centralizadas si no existen elementos de seguridad.

DATOS TÉCNICOS EUROPA C						
CARACTERÍSTICAS			EUROPA 450 C	EUROPA 600 C	EUROPA 700 C	EUROPA 800 C
Emisión térmica UNE EN 442	$\Delta T = 50^\circ C$	W	89,2	119,8	137,1	158,0
		kcal/h	76,7	103,0	117,9	135,8
	$\Delta T = 60^\circ C$	W	112,7	152,3	174,3	200,9
		kcal/h	96,9	131,0	149,8	172,8
	Emisión baja temperatura $\Delta T = 30^\circ C$	W	46,5	61,07	70	80,5
		kcal/h	39,96	52,52	60,20	69,23
Exponente n			1,27784	1,31869	1,31598	1,32052
Km			0,601947	0,688627	0,796525	0,901564
Contenido agua		(litros)	0,31	0,39	0,45	0,50
Peso		(kg)	1,04	1,34	1,57	1,85
Dimensiones	A	(mm)	431	581	681	781
	B	(mm)	350	500	600	700
Conexiones		(Ø)	1"	1"	1"	1"

CAL 26/12

DISTRIBUIDO POR:

Centro de Atención al DISTRIBUIDOR

madrid@ferrol.es

902 400 113

Centro de Atención profesional@ferrol.es

902 48 10 10

Centro de atención y recepción de reservas usuario@ferrol.es

902 197 397

100 9001 BUREAU VERITAS Certification





MÁS INFORMACIÓN: www.ferrol.es - Tfno.: 91 661 23 04 - marketing@ferrol.es

ANEXO III: Ficha técnica recuperador de calor Aldes InspirAIR 240 Classic

Grupo de purificación de aire y de ventilación doble flujo

11023310

InspirAIR® Side 240 Classic Derecha

Composición de los kits

InspirAIR® Side;1
Kit de fijación;1
Conector D160;0
Teclado de mando integrado Classic;1
Sifón;1
Filtro de polvo;1
Filtro de polen;1
Módem para la aplicación Aldes Connect®;0

Accesorios

Denominación	Código artículo
Caja de distribución InspirAIR® Side 240	11023323
Trampilla de acabado InspirAIR® Side	11023321
Cuna de fijación InspirAIR® Side	11023322
Cubreconducto InspirAIR® Side 240	11023324
Colector pasatecho para InspirAIR® Side 240	11023338
Cubreconducto 500 mm InspirAIR® Side 240	11023398
Cubreconducto acabado InspirAIR® Side 240	11023426
Batería de precalentamiento 1,5 kW InspirAIR®	11023225
Telemando 4 velocidades alámbrico	11023334
Telemando 4 velocidades alámbrico	11023065

Consumibles

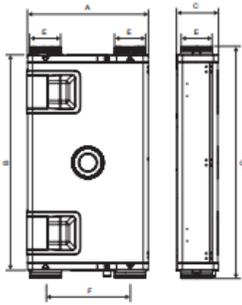
Denominación	Código artículo
Filtro polvo InspirAIR® Side 240	11023325
Filtro partículas finas InspirAIR® Side 240	11023326
Filtro bacterias InspirAIR® Side 240	11023331
Filtro polen InspirAIR® Side 240	11023340
Filtro COV InspirAIR® Side 240	11023438

Datos generales

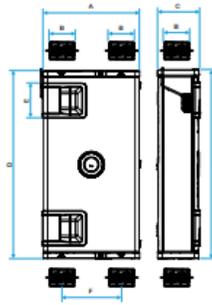
Código artículo	Filtros disponibles	Tipo de intercambiador	Tipo de motor
11023310	> polen: - Grueso 65 %,> partículas: - ePM10 50 % , > partículas finas: - ePM1.0 85 % , - ePM2.5 65 %.> bacterias: - ePM2.5 95 % , - ePM1 80 %> COV: - ePM10 85 % , - ePM2.5 65 %.	Sensible	EC

Datos dimensionales

Código artículo	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	Peso (kg)
11023310	600	160	250	1150	215	365	30



InspirAIR® Home SC 150 Classic



InspirAIR® Home SC 240 Classic

Datos aerúlicos

Código artículo	Caudal a velocidad máx (m ³ /h)
11023310	240

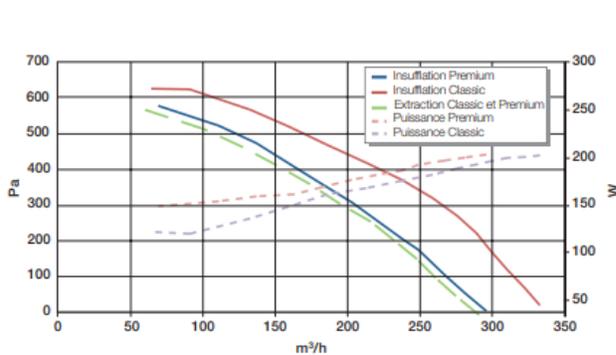
Datos técnicos

Código artículo	Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	Potencia máx.	Intensidad máx. (A)
11023310	230	50	183	1,75

Datos reglamentarios

Código artículo	Clase energética ventilación – Clima templado
11023310	A

Curvas



> Condiciones de ensayo:
- Aire exterior = aire seco a 5 °C, HR <20 %.
- Aire interior = aire seco a 25 °C, HR <20 %. (EN13141-7 y EN308)

Con filtro de polen

ANEXO IV: Ficha técnica Batería postcalentamiento InspirAIR

Batería de postcalentamiento InspirAIR®

11023487

Batería postcalentamiento externa 300W InspirAIR® Top



Batería postcalentamiento InspirAIR® Top

Descripción producto

Este modelo BCA Bus es una batería eléctrica que permite el calentamiento del aire nuevo después de la VMC doble flujo InspirAIR® Top. Es una solución de calefacción por aire de apoyo que permite calentar el aire antes de impulsarlo en los locales secos para el confort del usuario. Este accesorio está controlado por el InspirAIR® Top.

Campos de aplicación

Hábitat residencial colectivo, Hábitat residencial individual, Obra nueva, Rehabilitación

Montaje

- montaje como un simple accesorio de red, en interior únicamente,
- las BCA BUS se instalan horizontalmente o verticalmente,
- la posición «caja hacia abajo» no está permitida,
- el conducto aguas arriba de la BCA BUS debe ser de un material no inflamable de un largo de al menos 50 cm para proteger la resistencia del depósito de materia inflamable,
- se recomienda fuertemente utilizar un conducto metálico entre la BCA Bus y el doble flujo: Alflex M1 o M0, galva rígido...

Características principales

- cuello de acero galvanizado con juntas,
- resistencia de tubo conectada a una caja de conexión exterior,
- circuito de acero inoxidable AISI 321L,
- caja IP40.

Datos dimensionales

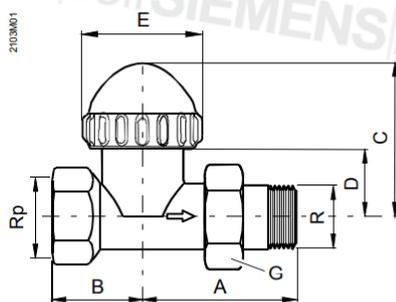
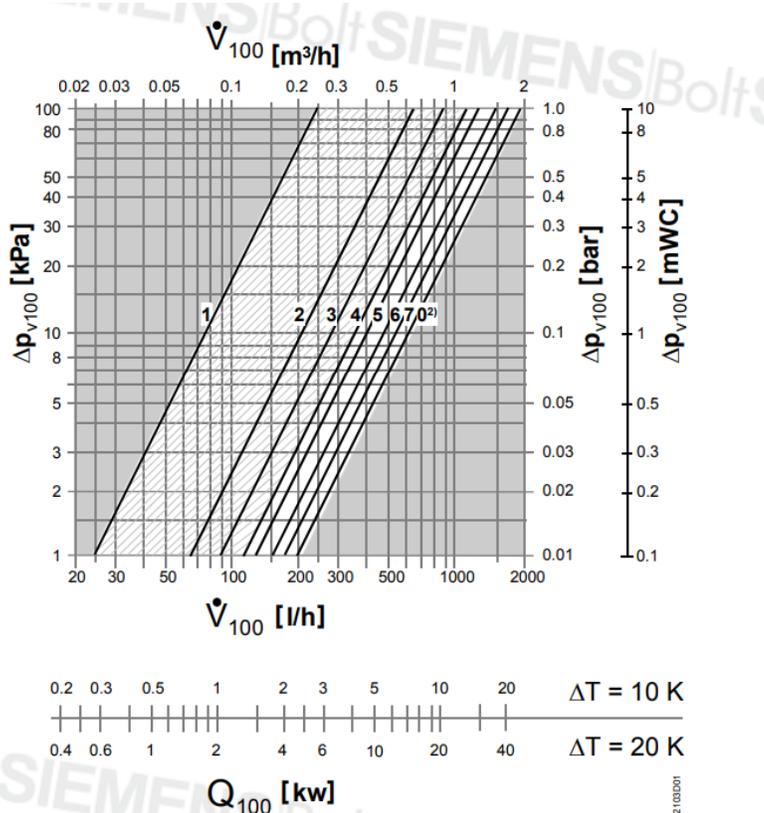
Código artículo	A (mm)	B (mm)	Ø (mm)	Peso (kg)
11023487	300	75	160	2,5

Datos técnicos

Código artículo	Potencia máxima	Alimentación eléctrica	Potencia (kW)
11023487	300	Monofásica	0,3

ANEXO V: Características válvula de control VD115CLC

VD115CLC



Type	DN	Dimensions [mm]				Thread [inch]			Weight [kg]	
		A	B	C	D	E	Rp	R		G
VD115CLC	15	61	33	46.5	24.5	35	1/2	1/2	3/4	0.28
VD120CLC	20	65	40				3/4	3/4	1	0.33
VD125CLC	25	68	35				1	1	1	0.42

ANEXO VI: Simulación del control PI

t [s]	T_hr [°C]	SP [°C]	Error [°C]	P	I	Apertura u	T_objetivo [°C]	T_out [°C]	Demanda (0/1)	contador_on [s]	contador_off [s]
0	17,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,00	16,00	0,00	0,00	0,00
1	17,00	20,00	4,00	3,60	0,23	1,00	23,00	16,41	0,00	1,00	0,00
2	17,00	20,00	3,59	3,23	0,43	1,00	23,00	16,80	0,00	2,00	0,00
3	17,00	20,00	3,20	2,88	0,61	1,00	23,00	17,16	0,00	3,00	0,00
4	17,00	20,00	2,84	2,55	0,77	1,00	23,00	17,51	0,00	4,00	0,00
5	17,00	20,00	2,49	2,24	0,91	1,00	23,00	17,83	0,00	5,00	0,00
6	17,00	20,00	2,17	1,95	1,03	1,00	23,00	18,13	0,00	6,00	0,00
7	17,00	20,00	1,87	1,68	1,13	1,00	23,00	18,42	0,00	7,00	0,00
8	17,00	20,00	1,58	1,42	1,22	1,00	23,00	18,69	0,00	8,00	0,00
9	17,00	20,00	1,31	1,18	1,30	1,00	23,00	18,94	0,00	9,00	0,00
10	17,00	20,00	1,06	0,95	1,36	1,00	23,00	19,18	0,00	10,00	0,00
11	17,00	20,00	0,82	0,74	1,40	1,00	23,00	19,41	0,00	11,00	0,00
12	17,00	20,00	0,59	0,53	1,43	1,00	23,00	19,62	0,00	12,00	0,00
13	17,00	20,00	0,38	0,34	1,46	1,00	23,00	19,82	0,00	13,00	0,00
14	17,00	20,00	0,18	0,16	1,47	1,00	23,00	20,00	0,00	14,00	0,00
15	17,00	20,00	0,00	0,00	1,47	1,00	23,00	20,18	0,00	15,00	0,00
16	17,00	20,00	-0,18	-0,16	1,46	1,00	23,00	20,35	0,00	16,00	0,00
17	17,00	20,00	-0,35	-0,31	1,44	1,00	23,00	20,50	0,00	17,00	0,00
18	17,00	20,00	-0,50	-0,45	1,41	0,96	22,74	20,63	0,00	18,00	0,00
19	17,00	20,00	-0,63	-0,57	1,37	0,80	21,81	20,70	0,00	19,00	0,00
20	17,00	20,00	-0,70	-0,63	1,33	0,70	21,20	20,73	0,00	20,00	0,00
21	17,00	20,00	-0,73	-0,66	1,29	0,63	20,80	20,74	0,00	21,00	0,00
22	17,00	20,00	-0,74	-0,66	1,25	0,59	20,53	20,72	0,00	22,00	0,00
23	17,00	20,00	-0,72	-0,65	1,21	0,56	20,35	20,70	0,00	23,00	0,00
24	17,00	20,00	-0,70	-0,63	1,17	0,54	20,23	20,67	0,00	24,00	0,00
25	17,00	20,00	-0,67	-0,61	1,13	0,53	20,15	20,64	0,00	25,00	0,00
26	17,00	20,00	-0,64	-0,58	1,10	0,52	20,10	20,61	0,00	26,00	0,00
27	17,00	20,00	-0,61	-0,55	1,06	0,51	20,07	20,58	0,00	27,00	0,00
28	17,00	20,00	-0,58	-0,52	1,03	0,51	20,04	20,55	0,00	28,00	0,00
29	17,00	20,00	-0,55	-0,49	1,00	0,50	20,03	20,52	0,00	29,00	0,00
30	17,00	20,00	-0,52	-0,47	0,97	0,50	20,02	20,49	0,00	30,00	0,00
31	17,00	20,00	-0,49	-0,44	0,94	0,50	20,01	20,46	0,00	31,00	0,00
32	17,00	20,00	-0,46	-0,41	0,92	0,50	20,01	20,43	0,00	32,00	0,00
33	17,00	20,00	-0,43	-0,39	0,89	0,50	20,01	20,41	0,00	33,00	0,00