



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

**MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN
ELÉCTRICA**

Título del proyecto:

**DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO AUTÓNOMO,
RENOVABLE Y EFICIENTE PARA CALEFACCIÓN
(DAREC)**

Ignacio Gómez Eguílaz

Tutores: Javier Marcos Álvarez

Javier Barricarte Rivas

Pamplona, 01/11/2015

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas	8
Resumen.....	9
Palabras Clave.....	9
1. Justificación del desarrollo del DAREC.....	10
1.1. Introducción	10
1.1.1. Antecedentes y necesidad del proyecto	10
1.1.2. Productos precedentes.....	15
1.1.3. Aplicación de la justificación a un caso concreto, Navarra.....	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivos generales del proyecto	18
1.2.2. Objetivos técnicos específicos	18
1.3. Riesgo tecnológico	19
1.4. Innovaciones tecnológicas del proyecto y tecnología a aplicar	22
1.4.1. Grado de novedad del proyecto	22
1.4.2. Empresas competidoras más significativas.....	23
1.4.3. Tecnologías más significativas	23
1.4.4. Protección de los resultados del proyecto.....	24
1.5. Mercado potencial	24
1.5.1. Posibles aplicaciones del producto	24
1.5.2. Cliente Potenciales.....	25
1.5.3. Estrategia de venta del producto.....	25
2. Planing y contextualización del proyecto	27
2.1. Plan de trabajo y metodología.....	27
2.1.1. Actividades a realizar.....	27
2.1.2. Cronograma de actividades del proyecto.....	27
2.1.3. Descripción del plan o metodología	28
2.2. Contextualización del TFM.....	30
3. Estado del arte sobre radiadores para calefacción doméstica y ventiladores.....	32
3.1. Estado del arte sobre radiadores.....	32
3.2. Estado del arte sobre ventiladores.....	35
4. Modelo teórico de la emisión de calor de un radiador.....	38
4.1. Justificación teórica.....	38
4.2. Relación entre la emisión convectiva y radiante.....	39
4.3. Modelado de radiadores por ordenador.....	41
4.3.1. QFIN 3.0	41

4.3.2. Otros softwares	44
5. Envoltente I.....	46
5.1. Introducción y necesidades	46
5.2. Antecedentes de la competencia	48
5.3. Primer diseño	49
5.4. Segundo diseño	50
6. Ventiladores I.....	52
6.1. Ventiladores considerados y digitalización de las curvas	52
6.2. Leyes de los ventiladores	53
6.3. Aplicación a los ventiladores elegidos.....	55
6.4. Criba de ventiladores por pesos ponderados.....	56
6.5. Segunda selección de ventiladores.....	58
7. Procedimiento para hallar el punto de trabajo	61
7.1. Curva de carga del ventilador	61
7.2. Curva de carga de la instalación.....	61
7.3. Puntos de funcionamiento hidráulicos	62
7.4. Consideraciones térmicas.....	63
8. Ensayo de caudal sobre prototipo real	65
8.1. Importancia del diseño y elección de los componentes	65
8.2. Objetivos de los ensayos	65
8.3. Preparación de los ensayos.....	66
8.3.1. Equipos empleados	66
8.3.2. Medición de flujo libre	67
8.3.3. Diferentes tipos de rejillas	68
8.4. Desarrollo de los ensayos.....	70
8.4.1. Comparación en horizontal.....	70
8.4.2. Cambio de orientación a vertical	71
8.4.3. Mediciones de los 3 ventiladores a 3 tensiones	71
8.5. Comparación resultados teóricos y experimentales	73
8.6. Análisis de alternativas	74
8.7. Conclusiones	75
9. Envoltente II.....	76
9.1. Conclusiones extraídas a raíz de los ensayos.....	76
9.2. Tercer diseño	77
10. Ventiladores II	79
10.1. Conclusiones extraídas a raíz de los ensayos	79
10.2. Selección final de ventiladores.....	79

11.	Electrónica	82
11.1.	Alimentación fotovoltaica	82
11.1.1.	Requisitos y características	82
11.1.2.	Solución obtenida.....	82
11.1.3.	Diseño, dimensionado y elección del sistema de generación eléctrica renovable y almacenamiento.	85
11.2.	Alimentación termoeléctrica	90
11.2.1.	Breve introducción a la termoelectricidad	90
11.2.2.	Importancia de la resistencia externa o de carga.....	91
11.2.3.	Dimensionamiento de la instalación termoeléctrica	93
11.2.4.	Conclusiones sobre la alimentación termoeléctrica	94
12.	Aspectos estéticos	95
13.	Pruebas térmicas	96
13.1.	Objetivo y requisitos.....	96
13.2.	Definición de las mismas.....	96
13.2.1.	Antecedentes	96
13.2.2.	Solución propuesta	96
13.3.	Preparación de las pruebas	97
13.3.1.	Equipos necesarios	97
13.3.2.	Explicación de los dos tipos de prueba	97
13.4.	Modelo de prueba A; Radiador eléctrico.....	97
13.4.1.	Esquema de la prueba.....	98
13.4.2.	Orden de dispositivos.....	98
13.4.3.	Desarrollo de las pruebas tipo A; Radiador eléctrico.....	98
13.4.4.	Análisis de los datos de las pruebas tipo A.....	101
13.5.	Modelo de prueba B; Radiador de calefacción individual	105
13.5.1.	Esquema de la prueba.....	105
13.5.2.	Orden de pruebas.....	105
13.5.3.	Desarrollo de las pruebas tipo B; Radiador de calefacción.....	105
13.5.4.	Análisis de los datos de las pruebas tipo B	107
13.6.	Conclusiones.....	110
14.	Balance económico	111
14.1.	Material de la envolvente y proceso de fabricación	111
14.2.	Ventiladores.....	111
14.3.	Electrónica.....	112
14.4.	Coste total del DAREC	112
15.	Conclusiones finales	114

16. Líneas de futuro	117
17. Referencias bibliográficas.....	118
17.1. Bibliografía.....	118
17.2. Weblografía	118
Anexo A: Cálculo de las resistencias térmicas	119
Anexo B: Definición y características de los equipos empleados	122
Anexo C: Datos de los ensayos de caudal	126
Anexo D: Datos de las pruebas térmicas modelo A	128
Anexo E: Datos de las pruebas térmicas modelo B	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Compromiso Europeo para el año 2020	11
Figura 2. Etiqueta de eficiencia energética marcada por la Unión Europea.....	11
Figura 3. Curva característica del comportamiento de un radiador	14
Figura 4. Potencia calorífica de una vivienda.....	15
Figura 5. Distribución del consumo energético medio en un hogar de Navarra	16
Figura 6. Reparto porcentual del consumo energético residencial.....	17
Figura 7. Distribución de temperaturas en un local para convección natural (izq., 20 min) y forzada (dcha., 12 min)	20
Figura 8. Croquis inicial del dispositivo	20
Figura 9. Distribución real de la temperatura en un radiador de hierro fundido.	21
Figura 10. Ahorro en los consumos	22
Figura 11. Radiadores de chapa de acero.	33
Figura 12. Radiadores de aluminio.	33
Figura 13. Radiadores de hierro fundido.	34
Figura 14. Radiadores toalleros	34
Figura 15. Radiadores de diseño moderno.....	35
Figura 16. Curvas características para distintos ventiladores según su modo de trabajo	36
Figura 17. Ventilador axial (izq.) y dirección del flujo al atravesarlo (dcha.).....	37
Figura 18. Circuito térmico equivalente del radiador	38
Figura 19. Relación del flujo de calor con la diferencia de temperaturas para diferentes exponentes n	40
Figura 20. Radiadores PCCP 450 (izq.) y ADRA (dcha.)	41
Figura 21. Radiadores PC450 (arriba izq.) y ADRA (arriba dcha.) en QFIN3 y PC450 en la realidad (abajo)	42
Figura 22. Radiador PC 450 simulado con 800W y en la realidad.....	42
Figura 23. Resistencia térmica del radiador y curva de caída de carga frente al caudal	43
Figura 24. Radiador PCCP 450 real (izq.) y en CATIA (dcha.).....	44
Figura 25. Software QFIN 5.0 mostrando el PCCP450.....	45
Figura 26. Flujo de aire dentro de una habitación con radiador clásico	46
Figura 27. Flujo de aire en una habitación tras instalar el DAREC.....	46
Figura 28. Radfan Classic, vista 3D (arriba) y de planta (abajo).....	48
Figura 29. Primer diseño de la envolvente, vista 3D lateral y frontal	49
Figura 30. Primer diseño de la envolvente, despiece lateral y frontal	49
Figura 31. Segundo diseño de la envolvente, vista 3D lateral y frontal	51
Figura 32. Segundo diseño de la envolvente, despiece lateral y frontal	51
Figura 33. Los 3 colores diferentes, negro y gris en el perfil (izq.) y blanco en la vista de frente (dcha.)	51
Figura 34. Curva característica ΔP vs Q de un ventilador; catálogo (izq.), digitalizada (ctro..) y en SI (dcha.)	53
Figura 35. Velocidad de giro [RPM] y potencia eléctrica consumida [W] frente a tensión de alimentación [V]	54
Figura 36. Relaciones de caudal, presión, potencia y nivel sonoro en función de la velocidad de giro.....	54
Figura 37. Curvas de ΔP vs Q a diferentes velocidades para un mismo ventilador	55
Figura 38. Representación de las variables a comparar de los ventiladores.....	56
Figura 39. Comparación de curvas ΔP vs Q para todos los ventiladores (izq.) y para los dos elegidos (dcha.).....	58
Figura 40. Curvas de ΔP vs Q para los 3 ventiladores a ensayar.....	59

Figura 41. Características de las 3 curvas de ΔP vs Q para los ventiladores ME70151VX 60	
Figura 42. Procedimiento para hallar el punto de trabajo.....	61
Figura 43. Ejemplo teórico de una curva de pérdidas de carga	62
Figura 44. Curva de carga frente a curva de ventilador para hallar puntos funcionamiento reales	63
Figura 45. Anemómetro Kanomax 6813: Imagen y características principales	66
Figura 46. Túneles de viento para los ventiladores de 70; vista 3D (izq.) y para 60; ajuste (ctro.) y vista 3D (dcha.).....	67
Figura 47. Instalación del banco de ensayos empleado	67
Figura 48. Medida del caudal en flujo libre.....	68
Figura 49. Salida de aire original (arriba), detalle del seccionamiento inferior (medio) y cambio a aletas lisas (abajo).	69
Figura 50. Ventilador de 60 dentro del túnel de viento, a 12[V] colocado en el DAREC y sin rejilla	70
Figura 51. Medida de caudales en posición horizontal para el Radfan (izq.) y el DAREC (dcha.)	70
Figura 52. Puntos de funcionamiento del DAREC para varios ventiladores a varias tensiones, con y sin rejillas.	73
Figura 53. Ventilador de 60 con protección circular; frontal (izq.) y colocado en el DAREC (dcha.)	74
Figura 54. Puntos de funcionamiento del DAREC, añadiendo la curva del sistema con las protecciones circulares.....	75
Figura 55. Tercer diseño de la envolvente y prototipo completo DAREC; varias vistas	77
Figura 56. Tercer diseño del DAREC, construido y en un entorno de funcionamiento real	77
Figura 57. Comparación entre los 5 ventiladores finales de las 3 características principales	80
Figura 58. Puntos de funcionamiento del DAREC, con las 3 curvas del sistema y los 2 ventiladores silenciosos elegidos	81
Figura 59. Interruptor térmico normalmente abierto en función de la temperatura aplicada en su extremo.	83
Figura 60. Diagrama de flujo del control del sistema de ventilación	84
Figura 61. Curvas I-V y P-V de un módulo solar fotovoltaico.....	85
Figura 62. Batería Li-Polymer 3'7V y 2800mAh.....	87
Figura 63. Esquema principal con los componentes más importantes de la tarjeta electrónica.	88
Figura 64. Circuito e indicadores LED para conocer el estado del módulo fotovoltaico....	90
Figura 65. Esquema de funcionamiento de un generador termoeléctrico.....	91
Figura 66. Circuito eléctrico equivalente de un módulo termoeléctrico.....	91
Figura 67. Potencia extraída de una instalación de MTE en función de la resistencia externa de carga	92
Figura 68. Gráfica que relaciona la tensión de trabajo de un MTE con el calor que lo atraviesa y el salto térmico real.....	93
Figura 69. Gráfica que relaciona la corriente de un MTE con el salto térmico y la tensión de trabajo.....	94
Figura 70. Logo representativo de la eficiencia y la conciencia medioambiental para el DAREC	95
Figura 71. Habitación empleada para las pruebas térmicas con la estructura de soporte para las sondas	99

Figura 72. Localización espacial de las sondas vistas desde la puerta (izq.) y desde la otra esquina del mismo lado (dcha.) para el modelo de pruebas B.....	99
Figura 73. Radiadores eléctricos de aceite con el DAREC encima y la fuente de alimentación empleada	100
Figura 74. Ensayo 1 sin DAREC (izq.) y ensayos 2 y 3 con DAREC 60 a 10 y 5 [V] (ctro. y dcha.).....	101
Figura 75. Ensayos sin DAREC (izq.) y con DAREC 80 a 5 [V] (dcha.) Arriba el instante inicial y abajo el final.....	102
Figura 76. Proceso de búsqueda de las sondas 2 sondas más estable.....	104
Figura 77. Localización espacial de las sondas vistas desde la puerta (izq) y desde la otra esquina del mismo lado (dcha.) para el modelo de pruebas B.....	106
Figura 78. Radiador de calefacción convencional para el modelo de pruebas B	106
Figura 79. Evolución de las sondas de temperatura durante 3 días en el modelo de pruebas B.....	107
Figura 80. Zoom del ensayo correspondiente al día 21/Octubre; con calefacción y SIN DAREC	108
Figura 81. Zoom del ensayo correspondiente al día 22/Octubre; con calefacción y CON DAREC	108
Figura 82. Detalle de las sondas de temperatura dentro de la habitación en el ensayo sin DAREC	109
Figura 83. Ecuación de transmisión de calor por radiación para un objeto pequeño en una cavidad grande	119
Figura 84. Expresiones para el cálculo del Nusselt en convección natural	120
Figura 85. Hoja de características del tacómetro Testo 470 según el propio fabricante ...	122
Figura 86. Hoja de características del anemómetro Kanomax 6813 según el propio fabricante	123
Figura 87. Imagen del equipo empleado como adquisidor de datos.....	124
Figura 88. Imagen del equipo empleado como adquisidor de datos.....	125
Figura 89. Intervalo común de subida de temperatura para los 5 ensayos mostrado en la sonda 10	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma del proyecto	28
Tabla 2. Selección inicial de ventiladores con sus características principales	52
Tabla 3. Resultado de ventiladores con todos los pesos ponderados iguales	57
Tabla 4. Resultado de ventiladores al ponderar según el confort del usuario	57
Tabla 5. Puntos de funcionamiento y características asociadas.....	62
Tabla 6. Puntos de funcionamiento teóricos y experimentales y diferencias porcentuales .	73
Tabla 7. Valores de ruido, caudal y consumo para los 5 ventiladores finales	80
Tabla 8. Explicación de las temperaturas ficticias para el modelo de pruebas A.....	103
Tabla 9. Resultado de ventiladores con todos los pesos ponderados iguales	111
Tabla 10. Coste de los ventiladores elegidos	111
Tabla 11. Lista de los conceptos del coste electrónico	112
Tabla 12. Lista de los conceptos del coste electrónico	113
Tabla 13. Datos de caudales para los dispositivos en posición horizontal	126
Tabla 14. Datos de caudales para el DAREC con los ventiladores en posición horizontal y vertical	126
Tabla 15. Datos correspondientes al ensayo de caudal para 3 ventiladores a 3 tensiones diferentes.....	127
Tabla 16. Diferencia máxima, mínima y media entre las temperaturas ficticias durante los 5 ensayos.....	128
Tabla 17. Diferencia máxima, mínima y media entre las temperaturas ficticias durante los 5 ensayos.....	129
Tabla 18. Explicación de las temperaturas ficticias para el modelo de pruebas B	130
Tabla 19. Temperaturas media superior e inferior para el modelo de prueba B y diferencia media de temperaturas	130

RESUMEN

El presente documento recoge el proceso completo de diseño de un Dispositivo Autónomo Renovable y Eficiente para Calefacción, DAREC. Debido a las necesidades energéticas que precisamos y al nivel de confort que tenemos en nuestros hogares, la calefacción asume un peso clave en la factura energética situándose aproximadamente en un 60% del gasto total. Por ello se hace necesario el desarrollo de un dispositivo que contribuya a una calefacción más eficiente, que homogenice la temperatura dentro de la habitación y que transmita el calor a través del aire con mayor rapidez. Se desarrollarán todos los soportes teóricos necesarios, se afrontarán cada uno de los apartados en relación al producto final y de manera iterativa se irá mejorando el diseño hasta dar con el definitivo. Todo ello con un claro objetivo comercial y es que el producto sea económicamente viable y trasladable a producción.

PALABRAS CLAVE

Calefacción, eficiencia, renovable, ahorro, diseño.

1. JUSTIFICACIÓN DEL DESARROLLO DEL DAREC

1.1. Introducción

1.1.1. Antecedentes y necesidad del proyecto

La eficiencia en la generación de calor juega un papel fundamental en la vida cotidiana a nivel mundial, especialmente en aquellas regiones con unas condiciones climáticas extremas. El consumo de energía térmica, principalmente en los sistemas de refrigeración, es especialmente importante, ya que son los mayores consumidores de energía dentro de los edificios, llegando a suponer hasta el 50% de la factura energética consumida principalmente por los sectores residenciales y servicios.

En concreto, el sector residencial consume, aproximadamente, la cuarta parte de toda la energía demandada, estimándose un potencial de ahorro de entre el 20% y el 40%. Es por ello que resultan de mucho interés los sistemas que ayuden a disminuir dicho consumo y ser más eficientes a la hora de consumir este tipo de energía. En primer lugar, y aunque no es parte de una instalación de calefacción, es indispensable que el edificio este correctamente aislado y preparado para perder la menor cantidad posible de calor.

Siguiendo en este contexto, cada vez existen mayores normativas provenientes desde Europa en cuanto a eficiencia energética y mayor compromiso con el medio ambiente se refiere. No obstante, cada vez la normativa es más estricta en cuanto a exigencia de rendimientos y emisiones. Necesidad de cumplir con el denominado Plan 20/20/20 que, como resumen, es el compromiso a nivel europeo que para el año 2020 existan:

- Una reducción de los gases de efecto invernadero en un 20%
- Un incremento de la cuota de energías renovables dentro del consumo energético en un 20%
- Y un incremento de la eficiencia energética en un 20%



Figura 1. Compromiso Europeo para el año 2020

Esto ha llevado a una serie de normativa tanto de nivel Europeo (ErP) como nacional (RITE, CTE, etc.), en la que se marca de forma clara y precisa una exigencia elevada de rendimientos al igual que la obligatoriedad del uso de energías renovables.

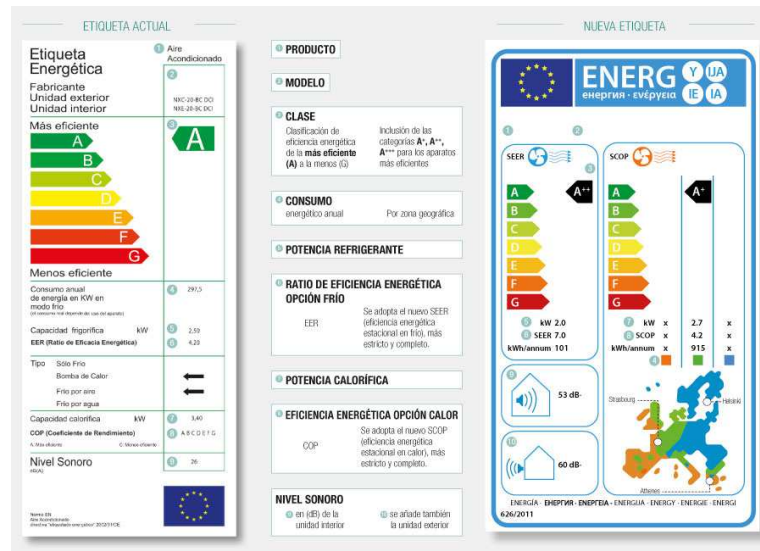


Figura 2. Etiqueta de eficiencia energética marcada por la Unión Europea

De nuevo la normativa ha sido un factor fundamental al forzar el uso, por ejemplo, de la energía solar. Junto con una mayor concienciación de toda la sociedad, debido a que, por un lado, nos hemos dado cuenta que al ritmo actual de emisiones de partículas contaminantes a la atmósfera tendríamos un grave problema en un espacio breve de tiempo, y, por otro, hemos visto que el actual gasto generado en combustible podría disminuirse de forma significativa con las nuevas tecnologías, y en épocas de crisis el ahorro en todas las parcelas es muy importante. Aquí a ayudando mucho que desde la administración central y autonómica haya existido un verdadero esfuerzo tanto normativo como de subvenciones y planes “renove” para encauzar las instalaciones de algunos

productos con una mayor eficiencia energética y una menor emisión de partículas contaminantes.

La eficiencia de los sistemas como el de calefacción, depende en gran medida del cuidado con el que hayan sido dimensionados, instalados y utilizados este tipo de instalaciones. En cuanto a las medidas de ahorro que se pueden tener en cuenta a la hora de reducir el consumo de energía térmica convencional, es posible distinguir principalmente tres tipos: las propias de la instalación del sistema de refrigeración, el apoyo de la generación de calor mediante fuentes alternativas renovables, y el uso de dispositivos externos que mejoren la eficiencia.

En cuanto al primer bloque, deben emplearse en la instalación calderas eficientes, con rendimientos elevados y perfectamente aislados todos los circuitos de refrigeración, como calderas de baja temperatura de condensación. También es importante el tamaño de la caldera: cuanto mayor sea, mejor rendimiento tiene, luego las calefacciones centrales colectivas funcionan mucho más eficientemente. Otro factor importante es la gestión en la activación/apagado del caudal de agua caliente proveniente de la caldera, donde los termostatos programables juegan un papel fundamental. También influye el mantenimiento (puesta a punto) de la caldera; donde es mucho más barato poner a punto una caldera grande que muchas pequeñas, por lo que las grandes suelen estar mejor mantenidas y puestas a punto, en comparación con las instalaciones pequeñas.

En cuanto al segundo bloque, existe cada vez más apoyo a las instalaciones de calefacción convencional mediante energías alternativas renovables que virtualmente son inagotables a escala humana, como por ejemplo la energía térmica solar, geotérmica o biomasa. Esto conlleva a un ahorro en la energía primaria convencional (combustibles fósiles) con todo lo que ello supone desde el punto de vista de impacto medioambiental e inestabilidad en el coste de la materia prima.

Por último, en el tercer bloque es donde se englobaría el dispositivo que se pretende desarrollar en este proyecto. En aquellos dispositivos externos a la instalación del sistema de calefacción se refiere pero que directa o indirectamente ayudan a la reducción y, por tanto, al ahorro del consumo en energía primaria convencional para generar calor. Gracias a este proyecto se va a desarrollar un dispositivo autónomo renovable que va a permitir la reducción del tiempo de calentamiento de un local con un coste de inversión bajo. Además se logrará una homogenización de la temperatura del local, permitiendo reducir las pérdidas globales del proceso y lograr un mayor confort.

Una de las muchas ventajas que este dispositivo presenta es su gran flexibilidad y sencillez, desde el punto de vista de instalación, gracias a su compatibilidad con la mayoría de la amplia gama de instalaciones de calefacción existentes actualmente en el mercado. Debido a que de las tres partes en las que se puede dividir una instalación de calefacción actual: sistema de producción de calor, sistema de reparto y sistema de emisión; únicamente depende en cierta medida de este último sistema, del sistema de emisión de la instalación.

El sistema de producción de calor comprende al tipo de generación, pudiendo ser una caldera de combustible fósil, resistencias eléctricas, aprovechamiento de energía calorífica renovable o residual, etc. El sistema de reparto hace referencia a los conductos por los que circula un calorportador, normalmente agua o aire. Y el sistema de emisión consiste en los elementos físicos terminales por los cuales se produce la transferencia de calor, como pueden ser los radiadores, parámetros radiantes, rejillas de impulsión de aire, etc.

Este dispositivo estaría orientado en un primer lugar para ajustarse de una mejor manera a los terminales del sistema de emisión como radiadores, independientemente de la tipología de éstos (radiadores de chapa, radiadores de aluminio, radiadores de hierro fundido, radiadores de diseño, etc.). Estos sistema de emisión son los más extendido en las instalaciones de calefacción, los cuales transmiten al ambiente el calor producido en la caldera a través de su superficie de intercambio, al circular un fluido caliente por el interior de los mismos. Esto se debe fundamentalmente a que los radiadores son elementos muy adaptables tanto en espacio como por las diferentes condiciones ambientales.

Por tanto, el dispositivo que se pretende desarrollar en este proyecto podría ayudar a los radiadores a ser más eficientes, pudiendo ser utilizados en la mayoría de las instalaciones de calefacción convencionales, tanto en el sector residencial como el de servicios (hospitales, colegios, comercios, hoteles, etc.).

Por otro lado, como la transferencia de calor que se produce en un radiador se traduce tanto por radiación como por convección, otra de las ventajas de este dispositivo es aunar las ventajas de un convector convencional puro (convección pura) con las de un radiador (radiación+convección), permitiendo modificar la proporción de calor emitida entre radiación y convección, y, por tanto, la curva característica de un radiador, marcada por el exponente del mismo. A mayor exponente, mayor es la parte de convección, significando que a menor salto térmico menor es el calor por unidad transferido. En cambio, a menor

exponente, mayor es la parte de radiación y mayor la transferencia de calor unitaria transferida.

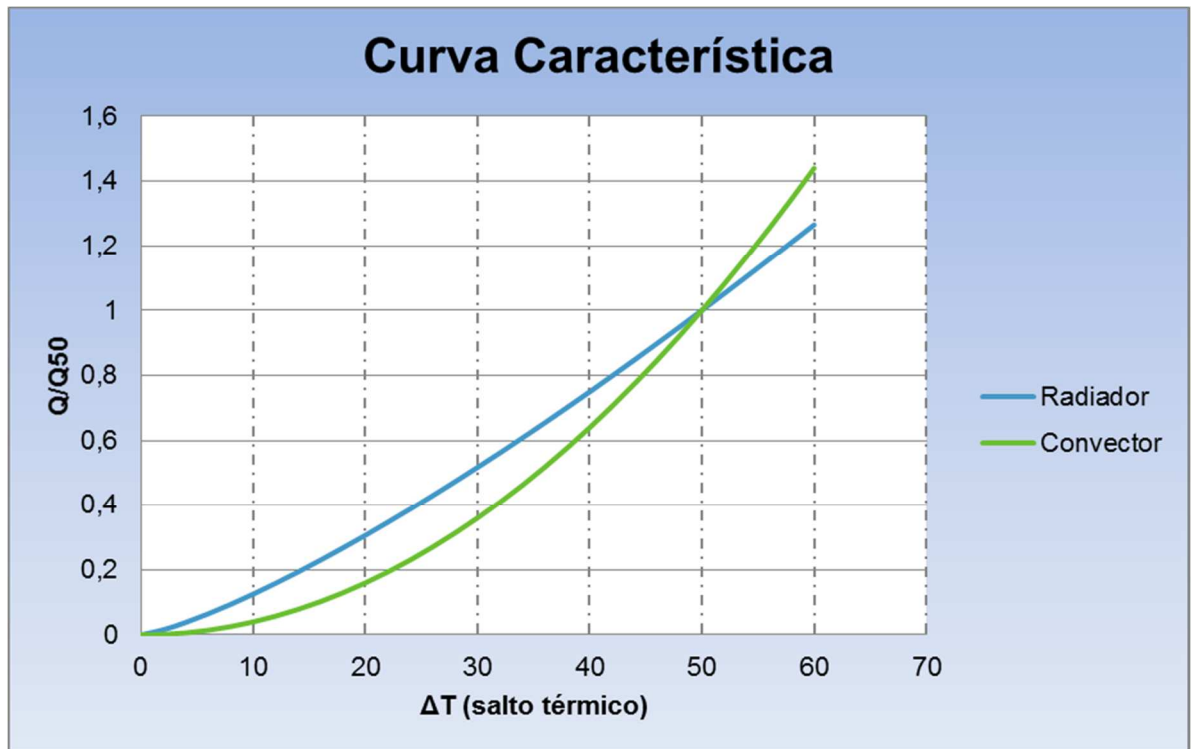


Figura 3. Curva característica del comportamiento de un radiador

Dicho de otra forma, los radiadores con más aperturas y elementos aleteados proporcionan mayor calor en forma de convección (aire caliente) y los radiadores más lisos y con mayores superficies generalmente tienen mayor proporción de radiación. Los radiadores con mayor porcentaje de radiación mantienen mejor la emisión cuando trabajan a baja temperatura, al contrario que los que emiten más por convección, que bajan más su rendimiento. Por otro lado, los radiadores con más convección aumentan en mayor medida el rendimiento cuando se trabajan con mayor salto térmico, a diferencia de los que emiten más por radiación que aumentan su rendimiento de manera más suave.

Es por ello que este dispositivo pretende fusionar, como se ha comentado anteriormente, las ventajas de cada tipo de transferencia de calor, aumentando el grado de convección pero manteniendo prácticamente el grado de radiación.

Por último, otro aspecto importante a tener muy en cuenta es la transferencia de calor que se origina entre el radiador y los elementos colindantes situados entre el interior y el exterior de un local, como son las paredes y ventanas. Esta transferencia de calor se traduce en las pérdidas por conducción a través de las paredes y ventanas con el exterior, siendo especialmente importantes en una convección natural de los radiadores de un local

debido a que el gradiente de temperaturas originado en estos elementos es muy grande. Además, fruto de estas pérdidas aparece un efecto de anti-confort del local ya que la distribución de temperaturas en el interior del local no es homogénea.

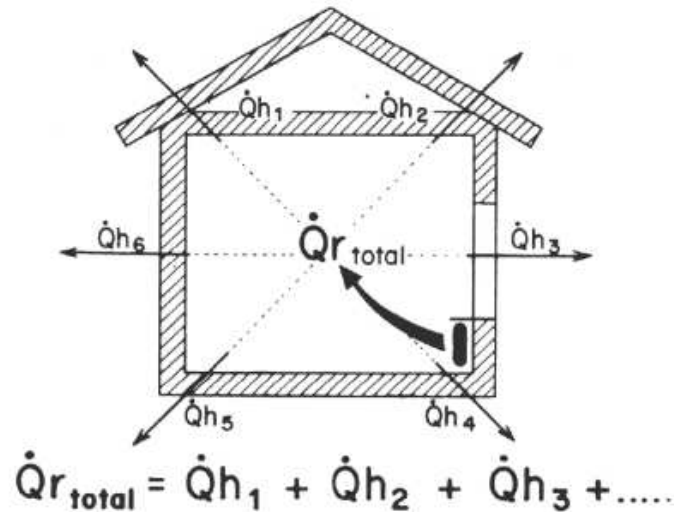


Figura 4. Potencia calorífica de una vivienda

El dispositivo que se pretende llevar a cabo en este proyecto pretende disminuir estas pérdidas, haciendo especial hincapié en \dot{Q}_{h3} y \dot{Q}_{h4} , al disminuir la transferencia de calor en dichas zonas colindantes con el exterior, homogenizando la temperatura del local y obteniendo un mayor confort. Por tanto, maximizando la parte convectiva de transferencia de calor del radiador con el ambiente del local sin perder prácticamente parte radiante.

Como conclusión, cabría señalar que las ventajas señaladas, unidas a las perspectivas de crecimiento del sector, que además podrían verse incrementadas gracias al propio proyecto, hacen de esta actuación una gran oportunidad para que Artidis se pueda situar como líder en un área tan estratégica como son sistemas más eficientes, y además renovables, en instalaciones de calefacción.

1.1.2. Productos precedentes

Actualmente, a nivel nacional no se ha encontrado ninguna empresa que desarrolle una solución similar a la que Artidis va a desarrollar en este proyecto. Es decir, va a ser la primera empresa en España que desarrolle un dispositivo autónomo renovable que permita reducir los tiempos de calentamiento de un local y homogenizar la temperatura de un local minimizando las pérdidas globales del proceso.

A nivel internacional, existe alguna empresa que ha desarrollado alguna solución similar. No obstante, dicha solución requiere alimentación de la red de suministro con el

rendimiento global (<15%) e impacto medioambiental que esto supone, además de ser una solución no optimizada y poco flexible. También, es un dispositivo altamente caro, alrededor de 60€. En cambio, Artidis en este proyecto pretende desarrollar un sistema que suponga la obtención de una solución renovable, autónoma, automática y de muchísima mayor flexibilidad, que conlleve un gran ahorro económico al disminuir el coste en materiales y transporte.

Obtener un dispositivo a un precio más competitivo, autónomo y flexible es muy importante en un mercado de eficiencia energética renovable para sistemas de calefacción, donde a día de hoy uno de los parámetros más importantes es el ratio €/kWh.

1.1.3. Aplicación de la justificación a un caso concreto, Navarra

En la siguiente figura se muestra la distribución del consumo de energía en los hogares navarros por tipo de actividad o uso, y por tanto sobre qué se debe hacer hincapié a la hora de obtener mayores ahorros energéticos. Los siguientes datos se han obtenido del documento *“Ahorro y uso eficiente de la electricidad”*, enmarcado en una serie de publicaciones del Gobierno de Navarra para dar relevancia a la eficiencia energética.

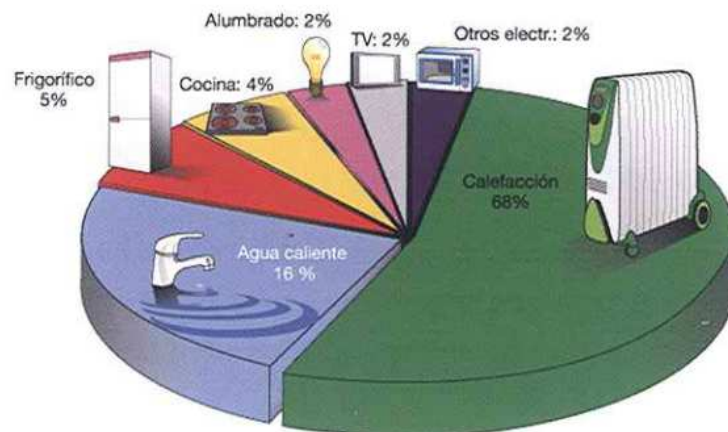


Figura 5. Distribución del consumo energético medio en un hogar de Navarra

Podemos ver que en **Navarra el 68% del consumo energético de los hogares se destina a la calefacción**, es por tanto y con mucha diferencia, la principal causa del consumo en la vivienda. Por tanto, el mercado potencial en este sector es muy grande. A continuación se muestra la el reparto del consumo energético en los hogares de Navarra y de España, dentro de los cuales destacan 2 categorías por encima del resto; calefacción y agua caliente.

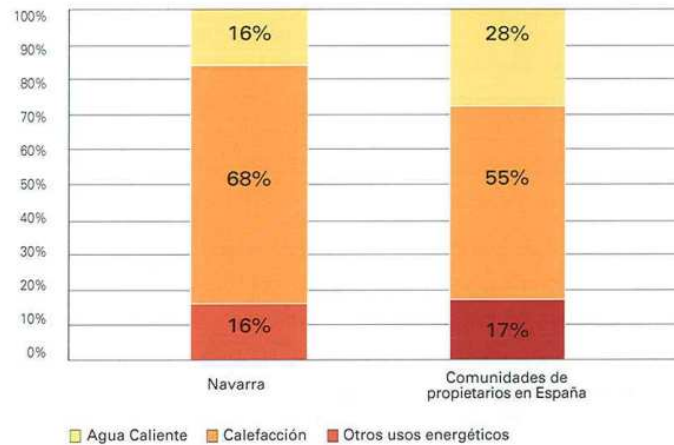


Figura 6. Reparto porcentual del consumo energético residencial

Todos los sistemas de calefacción tienen ventajas e inconvenientes, donde se diferencian principalmente dos tipos de instalaciones: caldera central o individual. En aquellos casos de calderas de calefacción centralizadas, los precios del combustible y gastos de mantenimiento son menores que en las instalaciones individuales. En cambio, en las instalaciones individuales de calefacción se proporciona mayor control y autonomía de gestión a los propios usuarios, posibilitando el ahorro y la eficiencia energética, ajustando el encendido y las temperaturas a las propias necesidades.

En Navarra, aproximadamente el 70% de los hogares tienen sistemas individualizados de calefacción. El dispositivo que se está desarrollando obtiene mejoras de ahorro en ambas instalaciones ya que se centra en homogenizar la temperatura de la habitación (disminuir gradientes y pérdidas en cuanto a transferencia de calor se refiere con el exterior), mejorando el confort y disminuyendo el tiempo de encendido del sistema de calefacción porque la temperatura de consigna se alcanza en un menor tiempo. Es por ello, que en una instalación de calefacción central se cerrarían las llaves cortando el acceso de agua caliente al interior del radiador y, por tanto, reduciendo el consumo variable de agua caliente de la vivienda. Mientras que en una instalación de calefacción individual se apagaría la caldera reduciendo su consumo directamente.

Es por todo ello, que el dispositivo que se está desarrollando en este proyecto se ha puesto especial interés en llevar a cabo un exhaustivo análisis de todas las partes críticas de la que consta, con el fin de poder obtener un producto tecnológicamente optimizado y económicamente competitivo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales del proyecto

El **objetivo general** del proyecto es desarrollar un **novedoso dispositivo autónomo renovable** para radiador que permita **aumentar la transmisión de calor por convección de manera más eficiente**, reduciendo de forma **considerable el tiempo de calentamiento** de un local, con una **homogenización de la temperatura (mayor confort)** del local y una **minimización de las pérdidas globales** del proceso.

En este proyecto se fomentan **dos sectores estratégicos del Plan de Desarrollo Económico de Navarra**, por un lado la integración de **energía renovable**, en concreto energía solar fotovoltaica, en la vida cotidiana y, por otro lado, el desarrollo de tecnologías que fomenten la **eficiencia energética** y la concienciación ciudadana sobre **el ahorro de energía**.

1.2.2. Objetivos técnicos específicos

Para poder desarrollar el proyecto con éxito, será necesario alcanzar los siguientes **objetivos técnicos específicos**:

- Lograr reducir **alrededor de un 40 % el tiempo** de calentamiento de un local estándar, dependiendo de forma proporcional tanto de la zona geográfica como de la superficie (m²) del local.
- Dotar al dispositivo de una **autonomía propia**, independiente de la red de suministro, incorporando un cargador portátil de almacenamiento (pilas recargables) a través de una **célula solar fotovoltaica**. De esta manera se posibilita su funcionamiento en cualquier radiador de cualquier local durante cualquier hora del día, con un **funcionamiento ininterrumpido de más de 12h**.
- Dotar al dispositivo de un **sistema automático** de funcionamiento, capaz de activarse y desactivarse en función de la temperatura del radiador.
- Incorporar un **sistema de ventilación** altamente **silencioso**, con capacidad de caudal de aire caliente eficiente.
- **Desarrollar** una solución de dispositivo **altamente económica**, integrando los elementos mecánicos y eléctricos bajo una envolvente compacta de tamaño reducido, **con un coste por unidad inferior a 30€**. Además, se le dotará de un novedoso sistema flexible que se pueda adaptar a cualquier tipología de radiador (aumentando la flexibilidad de la instalación), con un diseño estético agradable y muy ergonómico.
- **Reducir las pérdidas globales** del proceso de calentamiento **alrededor de un 35%**, en función de la situación del radiador, **homogenizando** la temperatura

del local y **reduciendo la transferencia de calor** con el exterior a través de los cristales.

- Estudio de la posibilidad de **incorporar un sistema** basado en el proceso **termoeléctrico** del llamado efecto Seebeck (efecto inverso al efecto Peltier), donde la generación eléctrica proveniente de la energía solar fotovoltaica pueda ser sustituida por la generación eléctrica proveniente del propio calor del radiador.
- **Minimizar el impacto medioambiental** gracias a la disminución de las emisiones de CO₂ tras la utilización de fuentes de generación renovables.
- **Reducir el coste de la energía global (ratio €/kWh)** en este tipo de instalaciones al reducir el tiempo de encendido del sistema de calefacción, sobre todo en aquellas instalaciones de calefacción centralizada.
- **Posicionar a la empresa** como **pionera** en este tipo de **sistemas autónomos renovables**, con el fin de poder unir la eficiencia renovable y la ergonomía en un único producto.

Para alcanzar dichos objetivos, Artidis plantea la ejecución de los principales **objetivos operativos**:

- Definir, diseñar y desarrollar un novedoso sistema de refrigeración basado en energía solar fotovoltaica, desde el punto de vista del hardware mecánico, que será el encargado de maximizar la transferencia de calor de la instalación de calefacción (radiadores) con el ambiente de un local de forma óptima, rápida y homogénea, minimizando las pérdidas globales del proceso.
- Desarrollar un sistema autónomo y automático, desde el punto de vista eléctrico, que permitan alimentar al sistema de ventilación a través de energía renovable en cualquier lugar y momento del día, gracias a un pequeño almacenamiento. Además, deberá ser un sistema automático de activación y apagado en función de la temperatura del radiador.
- Definir y diseñar un plan de exhaustivas pruebas que permita validar la solución a nivel de aplicación real.

1.3. Riesgo tecnológico

ARTIDIS INGENIERIA INDUSTRIAL va a desarrollar por medio de este proyecto de I+D, un novedoso dispositivo autónomo renovable para radiador que permita disminuir el tiempo de calentamiento de un local. De esta forma se va a lograr reducir una minimización de las pérdidas globales del proceso con una homogenización de la temperatura del local, un mayor confort y un mayor respeto por el medio ambiente.

El objetivo es lograr una transmisión de calor máxima entre el radiador y el ambiente, provocando un gradiente de temperatura menor en la zona de los elementos que separan el interior del local con el exterior, como son las paredes y ventanas colindantes, con el fin de reducir las pérdidas globales del proceso.

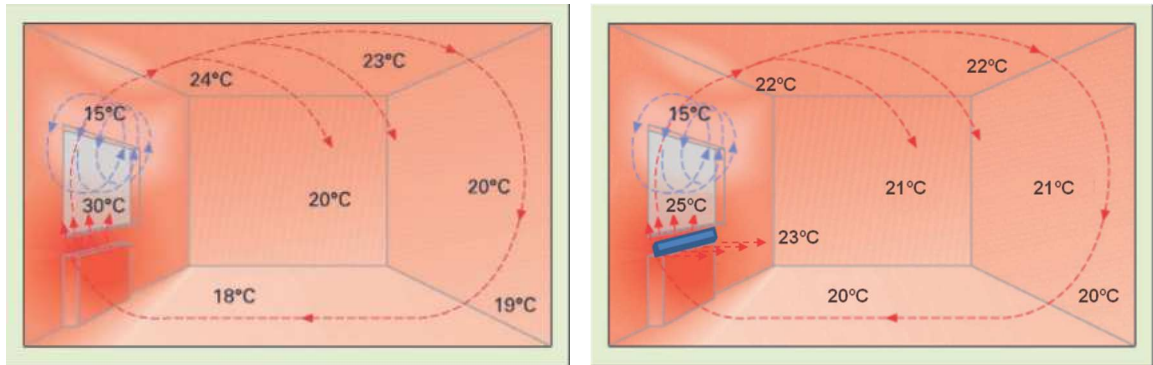
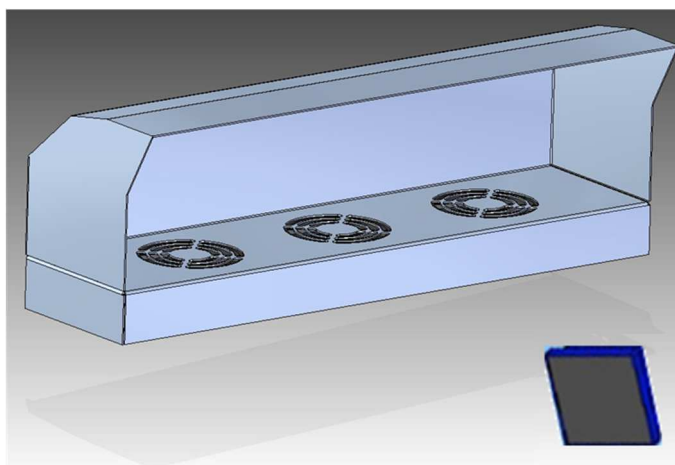


Figura 7. Distribución de temperaturas en un local para convección natural (izq., 20 min) y forzada (dcha., 12 min)

No obstante, para ello van a ser necesarias fundamentalmente varias partes. Por un lado, el desarrollo de un dispositivo autónomo y automático, abastecido con energía solar fotovoltaica y un pequeño almacenamiento, con el fin de que pueda funcionar bajo cualquier condición, en cualquier radiador y en cualquier espacio de tiempo, de forma automática en función de la temperatura del radiador. Por otro lado, el diseño estético, es decir, que sea agradable, ergonómico, flexible y moderno, sin perder de vista el coste económico.



Dispositivo de ventilación
(Ventilador + circuito eléctrico + sensor de T^a + protecciones)

Cargador portátil renovable
(Célula fotovoltaica + pilas + protecciones)

Figura 8. Croquis inicial del dispositivo

La idea es incorporar este dispositivo en la zona superior o inferior de cualquier radiador, en función de los resultados obtenidos de este proyecto, viendo cual es la mejor forma de maximizar la transferencia de calor por convección forzada del radiador. En un

primer momento, el dispositivo desarrollado debe servir para cualquier radiador, siendo totalmente flexible para cualquier tipo de instalación.

Esta aceleración de la convección natural del radiador habrá que ver bajo qué condiciones se da su mayor optimización, ya sea inyectando aire a temperatura ambiente por la zona inferior del radiador, evacuando el aire caliente del interior del radiador a través de la zona superior, o ambas en función de la tipología del radiador. Dependiendo de la tipología del radiador, la distribución de temperaturas será diferente, y por tanto, la evacuación del calor.

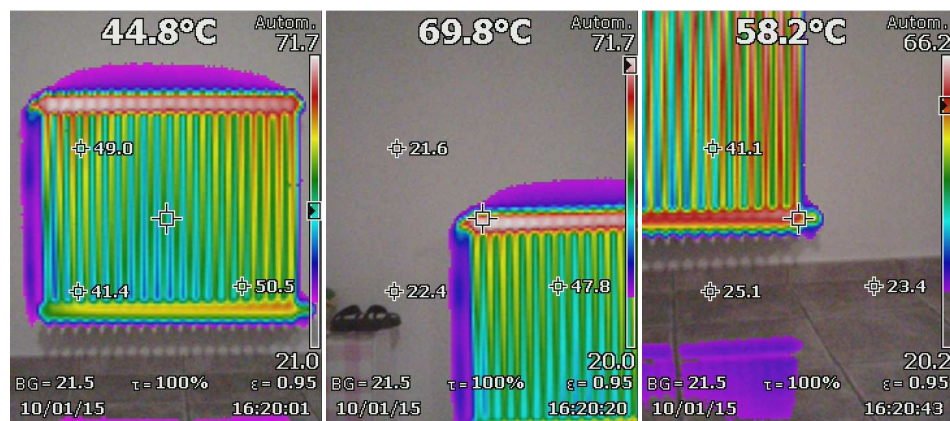


Figura 9. Distribución real de la temperatura en un radiador de hierro fundido.

Por otro lado, la sociedad está evolucionando de forma rápida, acostumbrándose cada vez más a unos estándares de confort cada vez más altos. Esto implica que la instalación de calefacción tiene que satisfacer las necesidades de confort de los usuarios cada vez más exigentes, no sólo consiguiendo una temperatura de confort, sino haciéndolo en un tiempo mínimo, con un consumo bajo y con un aporte estético importante. Es aquí donde el dispositivo que se pretende desarrollar en este proyecto cumple con todas los requerimientos exigidos por los usuarios.

Cabe destacar que los ahorros energéticos variarán considerablemente de una casa a otra debido a las diferentes necesidades de calefacción, la temperatura exterior, el aislamiento de edificios, las temperaturas ambiente preferidas, la tecnología de la caldera de calefacción y eficiencias, tamaño de las habitaciones, etc. Sin embargo, en el peor de los casos se sigue produciendo un ahorro energético y un mayor confort en comparación, en esa misma situación, con el escenario de partida (sin la colocación de este dispositivo).

El objetivo es que en el mejor de los casos, cuando mayor ahorro se produce, que equivale a una instalación compuesta por una caldera de condensación, unos radiadores

de baja temperatura y una válvula termostática, se consiga un mayor ahorro cuantificable con la colocación de este dispositivo en los radiadores.

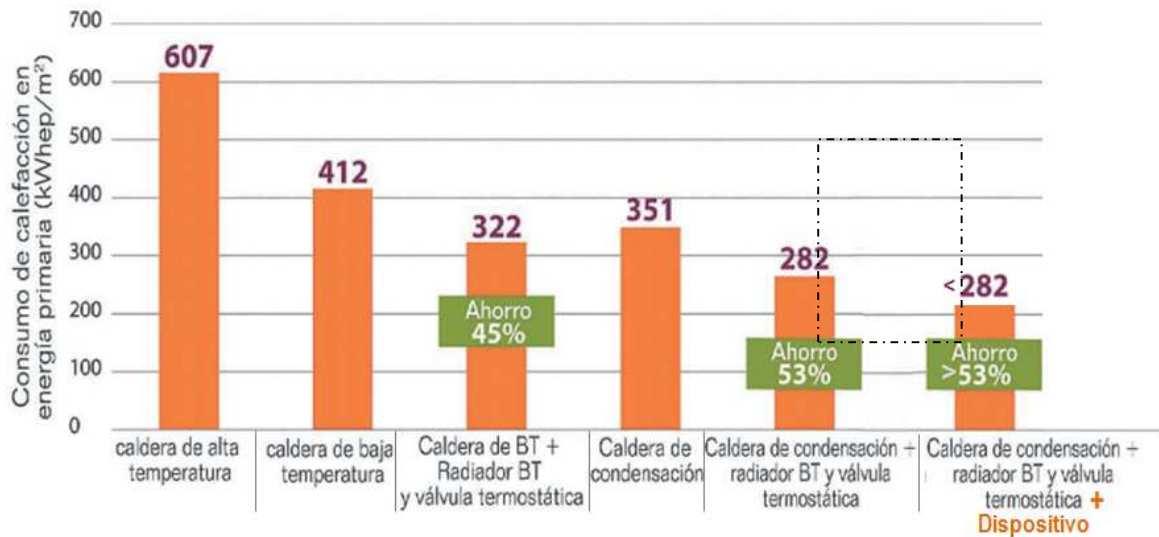


Figura 10. Ahorro en los consumos

Por último, se llevara a cabo un estudio termoeléctrico con la idea de desarrollar un sistema eléctrico originado con la propia temperatura del radiador, denominado efecto Seebeck, para alimentar al sistema del ventilador, aportándole al dispositivo un apoyo auxiliar al sistema de generación renovable con almacenamiento.

1.4. Innovaciones tecnológicas del proyecto y tecnología a aplicar

1.4.1. Grado de novedad del proyecto

El proyecto en sí mismo supone una gran innovación por el reto tecnológico que conlleva desarrollar un dispositivo capaz de reducir los tiempos de calentamiento de un local, disminuyendo las pérdidas globales del proceso y homogenizando la temperatura del local con una mayor sensación de confort. Por ello, el proyecto de I+D que aquí se desarrolla, va a conllevar un gran número de innovaciones tecnológicas:

- Lograr reducir alrededor de un 40 % el tiempo de calentamiento de un local estándar.
- Dotar al dispositivo de una autonomía propia y un sistema de activación y apagado automático.
- Incorporar un sistema de ventilación altamente silencioso.
- Desarrollar una solución de dispositivo altamente económica, con un coste por unidad inferior a 30€.
- Reducir las pérdidas globales del proceso de calentamiento alrededor de un 35%, en función de la situación del radiador.

Además de estos retos tecnológicos, hay que añadir que el hecho de que se va a dar la posibilidad de poder incorporar un sistema basado en el proceso termoeléctrico del llamado efecto Seebeck, capaz de alimentar a al sistema de ventiladores mediante la propia temperatura del radiador, dando un apoyo al sistema portátil de generación fotovoltaica con sistema de almacenamiento.

1.4.2. Empresas competidoras más significativas

La principal competencia en relación al producto que se pretende desarrollar en este proyecto de I+D, es la empresa que tiene una solución similar pero alimentada desde la red de suministro con el coste económico y energético que ello conlleva, sin dimensionar correctamente el sistema de ventilación ni la envolvente de plástico, sin un sistema autónomo y a un coste elevado, que hace que el equipo sea mucho menos competitivo. La empresa se llama Booter TM.

1.4.3. Tecnologías más significativas

Algunas de las tecnologías más significativas que se van a desarrollar a lo largo del proyecto son:

- Sistema de generación renovable portátil con almacenamiento. Este sistema de generación se basa en una célula solar fotovoltaica con un diodo anti-retorno de corriente para proteger a la célula cuando la tensión del sistema de almacenamiento es superior a la generada por dicha célula. Además, incorpora un pequeño estabilizador de tensión que asegura que la tensión de salida sea lo más constante posible con el fin de garantizar una carga estable del sistema de almacenamiento formado por pilas recargables, alargando su vida útil. La célula fotovoltaica lleva incorporada también dos ventosas con el fin de poder colocarla en cualquier ventana para proceder a la carga renovable de las pilas recargables. Todos estos elementos, se integran bajo una misma envolvente de plástico con dos terminales de salida, transformándolo en un cargador renovable portátil, fácil de transportar y colocar en cualquier sitio.
- Sistema de generación alternativo. Este sistema de generación eléctrica se basa en el efecto Seebeck, que consiste en generar una corriente eléctrica sometiendo la unión de 2 metales diferentes a una diferencia de temperaturas. Por tanto, se pretende aprovechar el propio calor del radiador para generar la tensión necesaria para alimentar el sistema de ventilación, dotando al dispositivo de un sistema de generación alternativo. El inconveniente es que la eficiencia de este proceso es muy baja, necesitando un salto térmico importante para generar varios voltios de tensión.

- Envolvente compacta, robusta. El objetivo es desarrollar un envolvente compacta y robusta, con un diseño innovador y ergonómico, con el fin de albergar a todos los elementos que componen al dispositivo (sistema de ventilación, circuito eléctrico, sensor térmico, imanes, etc.). Además, debe poseer cierta aerodinámica con el fin de ayudar al sistema de ventilación a evacuar el mayor porcentaje de calor proveniente del radiador en forma de convección, en dirección perpendicular al mismo (hacia la parte frontal, interior del local). También incorpora unos imanes para que su colocación y sujeción en función del tipo de radiador sea más flexible y sencilla.
- Sistema eléctrico automático. Este sistema se compone básicamente de un circuito de sensado térmico, compuesto por una pt100 o similar, que en función de la temperatura del radiador active/desactive el sistema de ventilación a través del circuito eléctrico.

1.4.4. Protección de los resultados del proyecto

Artidis piensa patentar el dispositivo final que resulte del proyecto. En concreto, la idea de desarrollar un sistema autónomo renovable para maximizar la transferencia de calor por convección forzada de un radiador, utilizando un sistema de energía solar fotovoltaica y/o un sistema termoeléctrico.

1.5. Mercado potencial

1.5.1. Posibles aplicaciones del producto

La principal aplicación o ventaja que va a ofrecer el dispositivo que se va a desarrollar a lo largo del proyecto al usuario final va a ser la minimización del tiempo de calentamiento de un local, con una disminución de las pérdidas globales del proceso, y por tanto, un ahorro económico en el gasto de calefacción.

Lograr un máximo confort, homogenizando la temperatura del local en un tiempo mínimo, a un coste muy reducido ya que el dispositivo es muy económico, va a suponer una mejora la eficiencia del proceso reduciendo el porcentaje €/kWh en el sistema de calefacción, lo que hoy en día es muy importante debido a la competitividad existente.

Asimismo, el hecho de que Artidis sea capaz de realizar este dispositivo bajo una envolvente compacta, robusta, de fácil instalación y totalmente flexible a cualquier tipo de radiador, va a permitir a los usuarios obtener un ahorro aún mayor.

Además, cabe destacar que el dispositivo que se va a desarrollar a través de este proyecto de I+D va a posibilitar la incorporación de un sistema de generación complementario y/o alternativo al sistema de generación renovable, cuya inclusión permitiría aprovechar el propio calor del radiador para generar la convección forzada a través del sistema de ventilación y maximizar así la transferencia de calor del radiador con el ambiente.

Por último al homogenizar así la temperatura del local, no sólo se gana en confort sino que también se van a reducir en gran medida las pérdidas globales del sistema de calefacción, al reducir el gradiente de temperaturas en aquellas zonas colindantes con el exterior, como son paredes y ventanas cercanas al radiador. Como ventaja desde el punto de vista medioambiental, se van a reducir las emisiones de CO₂ emitidas al ambiente al ser totalmente renovable la generación eléctrica del dispositivo y al aumentar la eficiencia del proceso, contribuyendo en gran medida a las consignas y normativas procedentes desde Europa. Esta ventaja también se puede traducir en un ahorro económico ya que cada vez con más los países que imponen sanciones por las emisiones de CO₂.

1.5.2. Cliente Potenciales

El dispositivo que se pretende desarrollar va dirigido a cualquier persona física que tenga una instalación de calefacción cuyos emisores sean radiadores, independientemente de su tipología. Además, puede resultar muy interesante para instaladores de sistemas de calefacción, haciendo sus instalaciones más eficientes. Incluso para fabricantes de radiadores que puedan integrar una solución similar en la fabricación de los mismos.

1.5.3. Estrategia de venta del producto

Artidis abordará tanto el mercado nacional como el internacional a través de la red comercial propia de la empresa o a través de las nuevas tecnologías de venta que existen en internet.

El lanzamiento del dispositivo final se realizará tras su correcta validación en el sector industrial en situación real de funcionamiento.

Además, se intentará proporcionar el dispositivo resultante del presente proyecto de desarrollo a alguna feria anual nacional, ya sea de eficiencia energética (Fenercom), renovable (Genera) o del sector de calefacción (Fegeca).

2. PLANING Y CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO

En este segundo apartado se pretende citar los pasos que se siguieron durante el desarrollo del proyecto, reflejados en mayor o menor medida durante los apartados siguientes del documento. Además de estos pasos, se incluirán puntos explicativos a nivel teórico que permitan una lectura de este trabajo más completa y comprensible, como por ejemplo el procedimiento para hallar los puntos de funcionamiento.

2.1. Plan de trabajo y metodología

2.1.1. Actividades a realizar

Las actividades desempeñadas durante el desarrollo del dispositivo fueron las siguientes:

- Estado del arte
- Justificación de la necesidad de desarrollo del DAREC
- Estudio de los tipos de radiadores
- Determinación del alcance del proyecto, acotando prestaciones y requisitos
- Realizar modelo teórico de radiadores
- Modelado por ordenador de radiadores
- Análisis inicial de ventiladores y selección de un grupo reducido para ensayar
- Ensayo de ventiladores en la carcasa para determinar el mejor modelo a emplear en el dispositivo final
- Ensayo del prototipo cuasi definitivo en cámara climática para determinar las mejoras producidas por el dispositivo
- Estudio y desarrollo de las fuentes de alimentación renovables
- Desarrollo en paralelo de la electrónica necesaria para gestionar el dispositivo
- Informe final sobre el rendimiento del DAREC, balance económico y perspectivas comerciales

2.1.2. Cronograma de actividades del proyecto

Una vez se tuvieron todas estas etapas definidas, el siguiente paso fue ajustarlas dentro de un marco temporal que rigiera todo el proyecto y sirviera como herramienta para comprobar el cumplimiento de las fases en el tiempo.

A continuación se muestra el **cronograma** con la planificación temporal de ejecución del proyecto que va desde el **2 de febrero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2015**.

Tabla 1. Cronograma del proyecto

ACTIVIDADES	2015											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
I. ESTUDIO DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS												
Análisis del estado del arte												
Estudio de especificaciones y requerimientos												
II. ESTUDIO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA HARDWARE DEL DISPOSITIVO												
Estudio y diseño de la envolvente												
Diseño y caracterización del sistema de ventilación												
Diseño y caracterización del sistema eléctrico de activación automática												
Diseño, dimensionado y elección del sistema de generación eléctrica renovable y almacenamiento												
Estudio de otras alternativas de generación eléctrica												
III. DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y VALIDACIÓN												
Desarrollo de prototipos iniciales y rediseño												
Desarrollo del prototipo final y validación												
Pruebas de validación en campo												

2.1.3. Descripción del plan o metodología

El proyecto se desglosa en tres actividades principales:

I. ESTUDIO DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS

- Análisis del estado del arte y requerimientos del sistema: Se realizará un estudio de las diferentes tipologías más comunes de radiadores, analizando el espectro de temperaturas de cada uno de ellos y sus dimensiones. Además, en función de la tipología de radiador se analizará las diferentes soluciones de ventiladores.
- Estudio de especificaciones y requerimientos: Se realizará un estudio de mercado, analizando los productos existentes y las necesidades de los países en los que se quiere implantar la solución, definiendo los parámetros más característicos del equipo a

desarrollar como: potencia, rango de tensión de entrada, caudales, ruido, etc. en función de los resultados del estado del arte.

II. ESTUDIO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA HARDWARE DEL DISPOSITIVO

- Estudio y diseño de la envolvente: El dispositivo se encargará de acelerar la transferencia de calor entre el sistema de calefacción y el ambiente, situándolo encima o debajo del sistema de calefacción (radiador). Por ello, será necesario llevar a cabo un estudio detallado de la envolvente del dispositivo, un desarrollo 3D con una estética agradable, ergonómica, sencilla, etc. Con todo ello, será necesario llevar a cabo un desarrollo hardware que integre los elementos bajo una envolvente compacta y robusta. Definiendo a su vez el tipo de material a utilizar y su flexibilidad.
- Diseño y caracterización del sistema de ventilación: En función del estado del arte y de las especificaciones del dispositivo, se llevará a cabo la elección más adecuada del tipo de ventilación (tamaño, caudal, potencia, tensión, etc.).
- Diseño y caracterización del circuito eléctrico de activación automática y regulación de caudal: Será necesario diseñar un circuito eléctrico que active o desactive de forma automática el caudal de aire en función de la temperatura del radiador analizada en el estado del arte.
- Diseño, dimensionado y elección del sistema de generación eléctrica renovable y almacenamiento: Se llevará a cabo el dimensionado del sistema de generación renovable basado en una placa fotovoltaica que carga unas pilas recargables, en función de las tensiones exigidas por el sistema de ventilación. Además, este sistema se debe diseñar de tal forma que posea protecciones y estabilizadores de tensión con el fin de alargar la vida útil del sistema de almacenamiento. También, debe de ser un sistema de generación renovable portátil capaz de captar la energía solar procedente de cualquier ventana o espacio abierto.
- Estudio de otras alternativas de generación eléctrica: Se llevará a cabo un estudio de un sistema de generación termoeléctrica alternativa basado en el llamado efecto Seebeck, con el fin de generar la tensión correspondiente para la alimentación del sistema de ventilación a través de la propia temperatura del radiador.

III. DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y VALIDACIÓN

- Desarrollo de prototipos iniciales y rediseño: En paralelo con los resultados obtenidos en las actividades anteriores, se llevarán a cabo sobre los prototipos iniciales pruebas ante condiciones adversas de cara a comprobar el correcto funcionamiento de todos los elementos. En función de los resultados obtenidos en el estudio del efecto Seebeck, se

llevará a cabo un prototipo con este sistema pudiendo comparar sus resultados con los prototipos de generación eléctrica renovable. En base a los resultados que desprendan estas pruebas se realizará un rediseño de las diferentes partes del sistema, incluyendo las modificaciones y mejoras que sean necesarias.

- Desarrollo del prototipo final y validación: Una vez validado el correcto funcionamiento de los prototipos iniciales, se desarrollará el prototipo final al que también se someterá a alguna prueba de cara a validar su comportamiento. Estas pruebas se intentarán reproducir en un radiador situado en una cámara climática si es posible en función de su disponibilidad.
- Pruebas de validación en campo: El objetivo de esta tarea es validar el funcionamiento del prototipo final desarrollado sobre varios radiadores de diferentes habitaciones. Para ello se llevará a cabo un plan de pruebas de cara a comprobar el funcionamiento del dispositivo desde diferentes puntos de vista. Analizando espectro de temperaturas, homogenización, tiempos de respuesta para alcanzar la temperatura de consigna, etc. para diferentes situaciones:
 - Extracción del aire caliente del radiador, situando el dispositivo en la parte superior.
 - Inyección del aire frío sobre el radiador con el fin de refrigerarlo, situando el dispositivo en la parte superior.
 - Inyección del aire sobre el radiador a través de la parte superior con el fin de homogenizar la temperatura del radiador.
 - Comparativa de resultados con el escenario base, definido como sistema de calefacción sin ningún dispositivo.

2.2. Contextualización del TFM

Este documento que se presenta como Trabajo Fin de Master (TFM en adelante) recoge como ya se ha dicho el proceso de diseño del DAREC: Dispositivo Autónomo, Renovable y Eficiente para Calefacción.

ARTIDIS así como otros colaboradores comenzaron el desarrollo del diseño y el alumno que presenta este trabajo, Ignacio Gómez Eguílaz, se incorporó en una fase posterior. Dada la complejidad que supone el desarrollo de cualquier producto moderno por tiempo, medios, coste económico y necesidad de conocimiento multidisciplinar, es necesario especificar las tareas realizadas dentro del proyecto.

Las **funciones generales** que se le asignaron dentro del citado grupo abarcaban de manera parcial o completa las siguientes actividades:

- Realizar modelo teórico de radiadores
- Modelado por ordenador de radiadores
- Análisis inicial de ventiladores y selección de un grupo reducido para ensayar
- Ensayo de ventiladores en la carcasa para determinar el mejor modelo a emplear en el dispositivo final
- Participar de manera activa dando feedback al resto del equipo sobre posibles mejoras dentro del producto
- Definición y diseño de las pruebas del prototipo cuasi definitivo para determinar las mejoras producidas por el dispositivo
- Estudio y desarrollo de las fuentes de alimentación renovables
- Informe final sobre el rendimiento del DAREC, balance económico y perspectivas comerciales

Y las **específicas**:

- Modelado de radiadores tanto teórico como por simulación
- Selección del ventilador como resultado de un estudio tanto analítico como experimental
- Participar de manera activa dentro del proyecto
- Colaborar con el diseño de las pruebas térmicas finales así como con su desarrollo
- Estudio de la fuente termoeléctrica
- Tratamiento de los datos obtenidos en las pruebas térmicas
- Informe final sobre el rendimiento del DAREC, balance económico y perspectivas comerciales

Dado que el proceso de diseño de un producto es algo complejo y dinámico, a lo largo del desarrollo del mismo y en función de los resultados que se han ido obteniendo, dichas funciones han sufrido variaciones o focalizaciones en partes concretas según se ha considerado pertinente dentro del equipo de diseño.

Desde el inicio de la participación en este proyecto se acordó que supondría gran parte del TFM que iba a realizar el alumno, característica por la cual queda sometido a un tratamiento de confidencialidad por formar parte de dicha investigación.

3. ESTADO DEL ARTE SOBRE RADIADORES PARA CALEFACCIÓN DOMÉSTICA Y VENTILADORES

Para comenzar, se realizará un estudio de las diferentes tipologías más comunes de radiadores, analizando el espectro de temperaturas de cada uno de ellos y sus dimensiones. Además, en función de la tipología de radiador se analizará las diferentes soluciones de ventiladores.

3.1. Estado del arte sobre radiadores

A lo largo de esta primera tarea, se ha realizado un análisis de las principales tipologías de radiadores que existen en el mercado, clasificándolos según sus características técnicas. Éstos se pueden dividir en:

- Radiadores de chapa
- Radiadores de aluminio
- Radiadores de hierro fundido
- Radiadores de diseño
- Radiadores convectores bimetálicos

Estos sistema de emisión (radiadores) son los más extendido en las instalaciones de calefacción, y su funcionamiento se basa en transmitir el calor a las paredes y al ambiente que previamente han obtenido de un fluido calentado mediante caldera. El éxito fundamental en cuanto a la utilización de estos dispositivos se refiere, se debe fundamentalmente a que los radiadores son elementos muy adaptables tanto en dimensiones como por las diferentes condiciones de trabajo.

Recordar de cara a la clasificación de radiadores, que como ya se dijo en el apartado 1.1.1, es el exponente “*n*” quien recoge cuanta parte de calor se transmite mediante radiación y convección para un salto térmico determinado.

Comentaremos brevemente las clases de radiadores ya citados:

Radiadores de chapa

Están formados principalmente por paneles de chapa de acero, con aletas traseras y posibilidad de combinar estructuras dobles. Los frontales pueden ser lisos o acanalados, con exponentes de la curva característica entre 1.30 y 1.32, y cuyas potencias caloríficas están certificadas por la norma EN 442. En general tienen buena relación radiación-convección, con una muy alta velocidad de respuesta. Existe actualmente una amplia gama de paneles estándar de este tipo.



Figura 11. Radiadores de chapa de acero.

Radiadores de aluminio

Están formados principalmente por elementos de aluminio, con dos posibles profundidades y de 3 a 5 alturas disponibles. Los frontales pueden ser abiertos o cerrados, con exponentes de la curva característica entre 1.30 y 1.34, y cuyas potencias caloríficas están certificadas por la norma EN 442. En general tienen buena relación radiación-convección, con una muy alta velocidad de respuesta. El mercado presenta también una amplia gama de paneles estándar de este tipo.

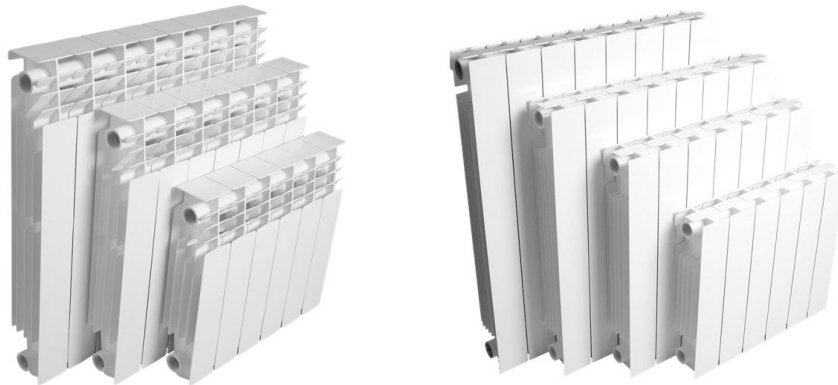


Figura 12. Radiadores de aluminio.

Radiadores de hierro fundido

Están formados principalmente por elementos de hierro fundido, con tres posibles profundidades y de 3 a 5 alturas disponibles. Los frontales pueden ser retro o frontal moderno, con exponentes de la curva característica entre 1.26 y 1.31, y cuyas potencias caloríficas están certificadas por la norma EN 442. En general tienen buena relación radiación-convección, con una velocidad de respuesta media.



Figura 13. Radiadores de hierro fundido.

Radiadores de diseño

Existen dos grandes grupos, por un lado los toalleros y por otro lado los radiadores modernos. En cuanto a los toalleros, están formados principalmente por tubos de acero soldados, con multitud de diseños, de 3 a 4 anchuras y de 4 a 5 alturas disponibles. Los exponentes de la curva característica oscilan entre 1.23 y 1.28, y cuyas potencias caloríficas están certificadas por la norma EN 442. En general tienen buena relación radiación-convección, con una muy alta velocidad de respuesta. Existe actualmente una amplia gama de diferentes diseños de este tipo.



Figura 14. Radiadores toalleros

En cuanto a los radiadores modernos, también están formados por tubos de acero soldados, con multitud de diseños y fabricaciones a medida, con alturas y longitudes hasta los 6 metros. Los exponentes de la curva característica oscilan entre 1.20 y 1.32, y cuyas potencias caloríficas están certificadas por la norma EN 442. En general tienen buena relación radiación-convección, con una muy alta velocidad de respuesta. Existe actualmente una multitud gama de este tipo de radiadores a gusto del consumidor.



Figura 15. Radiadores de diseño moderno

Una vez analizados los diferentes tipos de radiadores que existen actualmente en el mercado, y con el fin de poder analizar las especificaciones técnicas del dispositivo a desarrollar para que se pueda adaptar a la mayoría de dichos radiadores, otro elemento fundamental a analizar son los tipos de ventiladores que existen en el mercado. Los ventiladores serán un elemento prioritario para el desarrollo del dispositivo ya que se fundamentan en aumentar el grado de convección del radiador manteniendo el grado de radiación del mismo, es decir, sin modificar su diseño. Por tanto, habrá que ver qué tipo de ventiladores es más adecuado para la mayoría de radiadores analizados anteriormente.

3.2. Estado del arte sobre ventiladores

Un ventilador es una máquina hidráulica destinadas a aporta una cantidad de energía al fluido que lo atraviese, en nuestro caso el aire. Los parámetros principales para caracterizar a un ventilador son:

- Caudal volumétrico
- Consumo del ventilador
- Potencia efectiva
- Rendimiento del ventilador
- Incremento de la presión estática
- Ruido, dimensiones y modo de arrastre

Existen varias clasificaciones de los ventiladores; por diferencia de presión estática, por el sistema de accionamiento y por el modo de trabajo, siendo esta última la más empleada. De acuerdo al catálogo técnico de salvador escoda podemos distinguir, según su modo de trabajo, los siguientes ventiladores:

- Axiales
- Centrífugos
- Tangenciales
- Heliocentrífugos

La Figura 16 sintetiza las características de los ventiladores mostrando las curvas “caída de presión vs caudal” para cada uno de ellos. **Para nuestro proyecto** y dado que el sistema con el que se va a trabajar se comprobará que efectivamente tiene una curva de carga muy plana, **nos interesa trabajar con ventiladores axiales**, cuyo caudal es mayor a cambio de aportar menos presión, la cual sin embargo será suficiente para nuestro sistema.

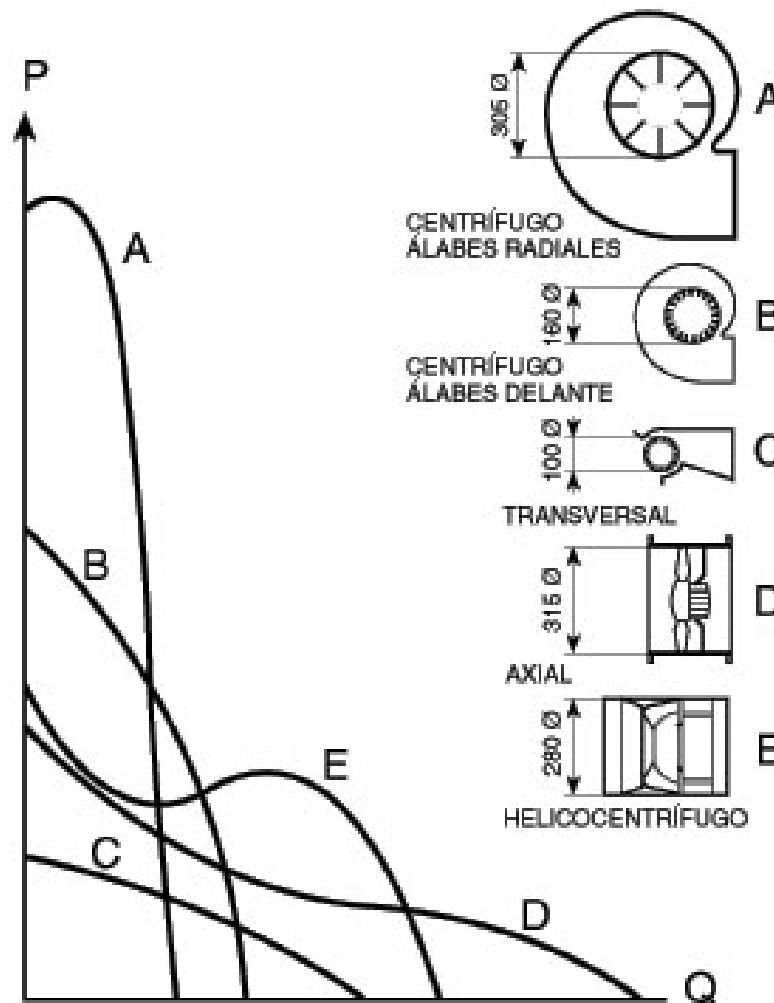


Figura 16. Curvas características para distintos ventiladores según su modo de trabajo

Ventiladores axiales

En los ventiladores axiales el movimiento del flujo es a través del rotor, con álabes o palas de distintas formas, que succionan aire para luego impulsarlo siguiendo siempre el eje del ventilador, razón por la cual son llamados axiales.

Se usan para mover grandes cantidades de aire en espacios abiertos porque la resistencia al flujo es muy baja, y debido a esto, la principal aplicación de los ventiladores

axiales se encuentra en el campo de la ventilación general, por lo que se los conoce con el nombre de extractores o inyectores de aire.

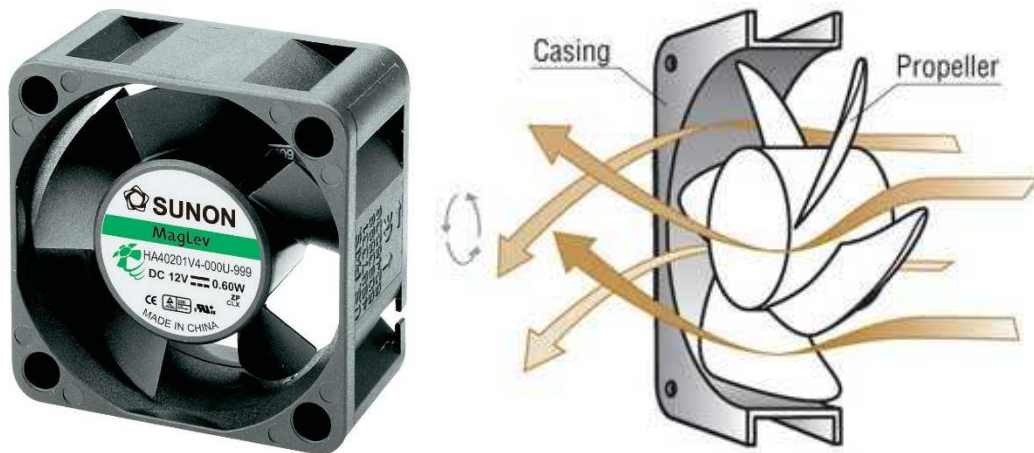


Figura 17. Ventilador axial (izq.) y dirección del flujo al atravesarlo (dcha.)

Por tanto, conociendo la tipología de radiadores y ventiladores, se han podido definir los requerimientos necesarios que sirven de partida para poder diseñar un dispositivo que se amolde lo mejor posible a la mayoría de radiadores y cuyas características hidráulicas sean adecuadas.

4. MODELO TEÓRICO DE LA EMISIÓN DE CALOR DE UN RADIADOR

4.1. Justificación teórica

Una vez presentadas las elevadas necesidades energéticas de calefacción actuales, queda justificada por el impacto total cualquier medida de ahorro, por pequeña que pueda ser, y ahí es donde entra en escena el DAREC. Para sustentar de manera teórica el efecto del dispositivo comenzaremos en primer lugar por realizar el balance total de la transferencia de calor de un radiador, teniendo en cuenta la radiación, la convección externa y la convección interna.

$$\dot{Q}_{convección} = h \cdot A \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{conv}} [W] \quad \rightarrow \quad R_{convección} = R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$\dot{Q}_{radiación} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4) = \frac{T_s - T_a}{R_{rad}} = \frac{\Delta T}{R_{rad}} [W] \rightarrow$$

$$R_{radiación} = R_{rad} = \frac{T_s - T_a}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4)} = \frac{1}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a)} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Siendo T_s la temperatura media de la superficie del radiador y T_a la temperatura media del ambiente, ambas en Kelvin. A es el área al que aplique el fenómeno en cuestión, h es el coeficiente de convección, ΔT es la diferencia de temperatura entre el radiador y el ambiente (por tanto indiferente si se calcula mediante $^{\circ}C$ o K), ε es el coeficiente de emisividad de la superficie radiante y σ es la constante de Stefan Boltzman cuyo valor se cifra en $5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ Así pues el modelo del radiador quedaría determinado por el siguiente modelo:

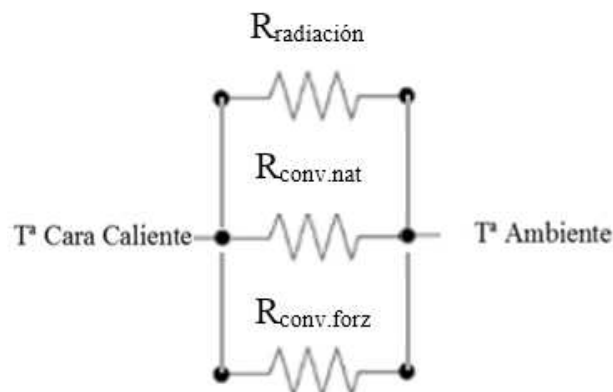


Figura 18. Circuito térmico equivalente del radiador

En nuestro caso, para la R_{rad} todos los parámetros son conocidos. La constante de Stefan Boltzman, la emisividad que viene dada por la pintura empleada en el exterior del

radiador, el área es la externa del radiador que ve directamente al ambiente y las temperaturas se definen según cada caso para la simulación. Para la convección exterior, calcularemos el coeficiente de convección h según los modelos teóricos para convección natural y el área correspondiente será la de la superficie exterior del radiador.

El quid de la cuestión se centra en la convección interior del radiador, ya que es aquí donde se reflejará el efecto del dispositivo. Como ya se ha comentado, cuando el dispositivo esté encendido y colocado correctamente en el radiador, forzará un flujo de aire por el interior del mismo que aumentará el coeficiente de convección interno, lo cual incrementa la transferencia de calor del radiador al ambiente. Una vez sepamos todos los valores de las resistencias, el flujo total de calor se calcula mediante la resistencia térmica total (R_{th}) tal y como se detalla a continuación:

$$\dot{Q}_{total} = \frac{\Delta T}{R_{th}} [W] \quad \text{con} \quad R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_{conv.nat}} + \frac{1}{R_{conv.forz}} + \frac{1}{R_{radiación}}} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$R_{th} = \frac{1}{(h_{nat} \cdot A_{nat} + h_{forz} \cdot A_{forz} + \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_{ex} \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a))} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Dada la geometría de un radiador concreto, tanto las áreas externas como internas son conocidas, y por ende solamente queda determinar las respectivas $h_{externa}$ y $h_{interna}$. En concreto y para el modelo PCCP 450 con una longitud de 600 [mm] y un salto térmico de 40 °C tenemos los siguientes valores (calculados en el anexo 1):

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_{conv.ext}} + \frac{1}{R_{conv.int}} + \frac{1}{R_{radiación}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,343} + \frac{1}{0,115} + \frac{1}{0,219}} = 0,0619 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Para un salto térmico de 40 °C el flujo de calor sería de:

$$\dot{Q}_{total} = \frac{40}{0,0619} = 646 [W]$$

Una primera conclusión es que de esos 646 [W], casi la mitad se transmiten gracias a la convección interna, y por tanto esta resistencia es la que más peso tiene a la hora de calcular la resistencia térmica total equivalente. Además se observa que aproximadamente el 70% del calor transferido por el radiador es mediante fenómenos de convección, asumiendo el fenómeno radiante solamente un 30% de la transmisión de calor.

4.2. Relación entre la emisión convectiva y radiante

Entendiendo ΔT como el salto térmico existente entre la temperatura media de la superficie del radiador y el ambiente, se calcula de manera general el calor transferido basándose en la siguiente fórmula:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{50} \cdot \left(\frac{\Delta T}{50}\right)^n$$

Donde \dot{Q}_{50} es el calor transmitido por el radiador para un salto térmico de 50 °C y n es el exponente de la curva característica del emisor. n refleja el carácter del radiador en cuanto a si la transmisión de calor se da en mayor medida por convección o por radiación, y se sitúa en un valor que suele ceñirse al rango 1,2 – 1,4. Cuanta más transmisión se dé por convección mayor será el exponente n del radiador.

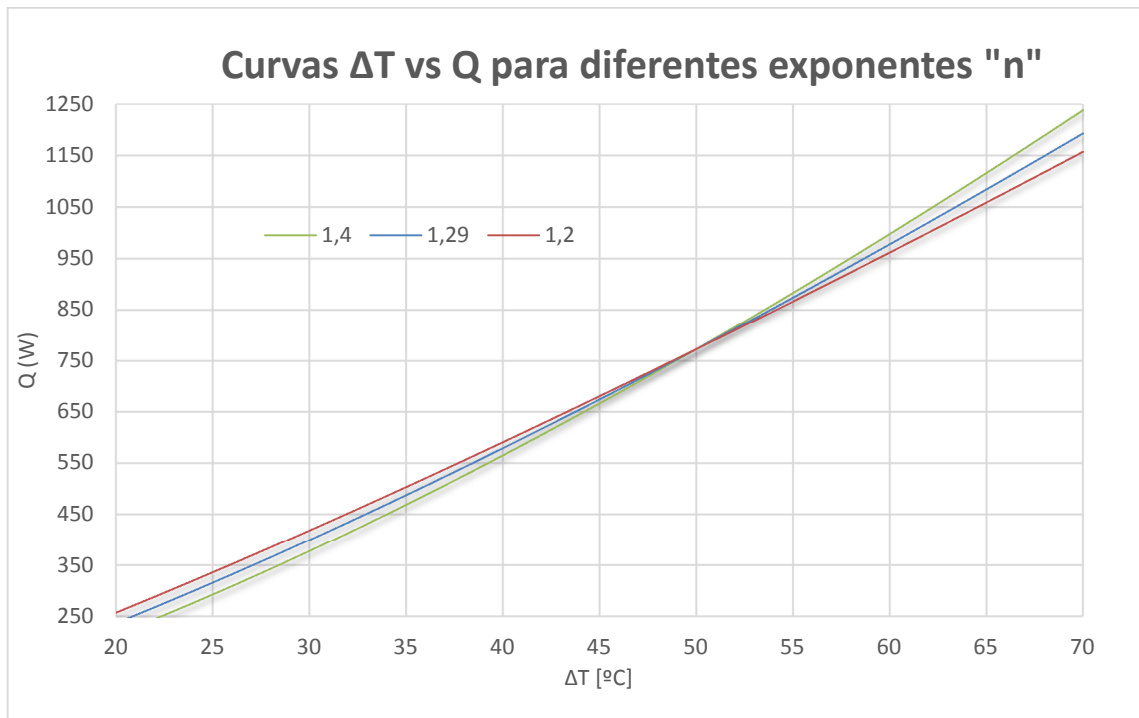


Figura 19. Relación del flujo de calor con la diferencia de temperaturas para diferentes exponentes n

Por otro lado hay que decir que para cualquier radiador, a medida que aumenta el salto térmico, funciona mejor la parte convectiva, mientras que para bajas diferencias de temperatura, la parte más eficiente es la radiante. Este hecho combinado con el de los diferentes exponentes n lo podemos observar en la Figura 19. Las curvas de mayor exponente (mayor convección) emiten mayor \dot{Q} para el mismo salto térmico. Sin embargo a menores saltos de temperatura los que mayor flujo de calor emiten son los radiadores de carácter más radiante.

Una vez explicados estas características, recordamos que el dispositivo pretende añadir parte convectiva al forzar el flujo de aire en el interior del radiador de manera que acelere la transmisión de calor, lo cual supone una reducción en el tiempo de calentamiento del habitáculo que se traduce en reducción de emisiones y de consumo de combustible al estar funcionando durante menos tiempo.

4.3. Modelado de radiadores por ordenador

Tras el planteamiento teórico se procedió a realizar el modelado de los radiadores por ordenador, como parte del procedimiento de elección de ventiladores, ya que una vez realizado un análisis teórico que nos permitiera conocer la influencia del flujo de aire de cara a efectos de calefacción, se presentaba la duda de en qué punto de funcionamiento hidráulico funcionaría el ventilador.

Para calcularlo de manera teórica era necesario obtener la curva de pérdidas de carga frente a caudal de los radiadores a estudiar y por ello procedimos a una simulación por software de elementos finitos. Los modelos reales elegidos fueron el PC y PCCP 450, así como el ADRA 450 tanto -11 como -22. La Figura 20 muestra ambos modelos en la realidad.



Figura 20. Radiadores PCCP 450 (izq.) y ADRA (dcha.)

4.3.1. QFIN 3.0

Inicialmente se empleó el programa QFIN3 para simularlo. La principal ventaja de este software, al igual que su mayor hándicap, es su extremada sencillez. El programa permite reducir a la mínima expresión una simulación por CFD que de normal conlleva una complejidad sustancial. Sin embargo esto conlleva una asunción de simplificaciones que condicionan el resultado final obtenido.

El primer problema radica en que por la estructura de construcción del programa no pueden hacerse bloques que no sean de forma secuencial y pegados a los anteriores.

Limita mucho el diseño en 3D propiamente dicho y no permite la creación de bloques independientes, de modo y manera que se imposibilitan las geometrías complejas y solamente podemos simular un PC450. Se muestra todo ello en la Figura 21.

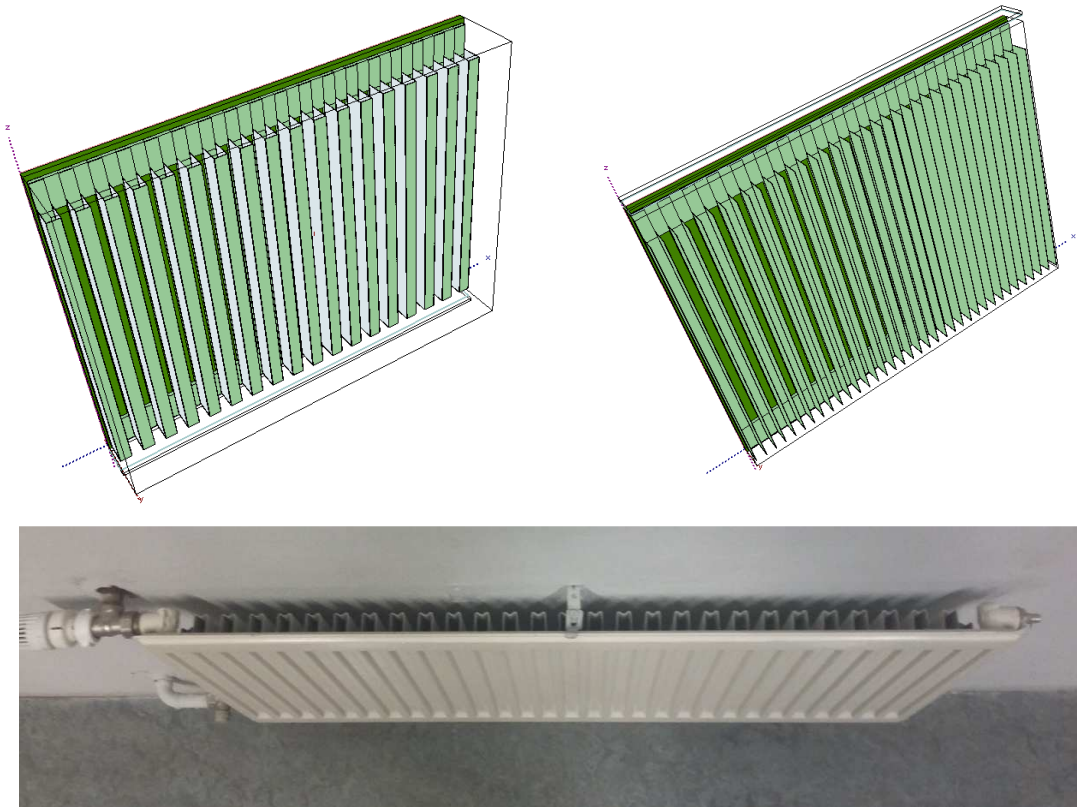


Figura 21. Radiadores PC450 (arriba izq.) y ADRA (arriba dcha.) en QFIN3 y PC450 en la realidad (abajo)

Una vez definida la geometría, se muestra en la Figura 22 la distribución de temperaturas suponiendo un $Q=800$ [W] para dicha superficie:

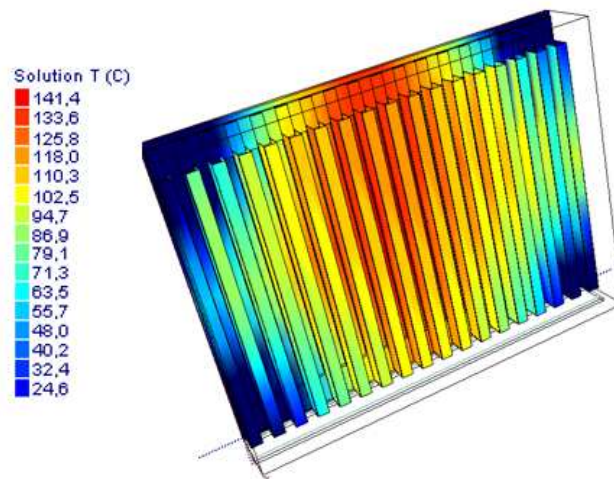


Figura 22. Radiador PC 450 simulado con 800W y en la realidad

A pesar de las limitaciones comentadas, y tras intentar realizar la simulación mediante otros softwares que se comentarán después, los resultados más completos que podemos obtener son las curvas de carga y de resistencia térmica de los radiadores PC450 y el ADRA 11 mediante el modelado en QFIN3. Comenzamos con el PC450 para ilustrar el

procedimiento, y si se tercia necesario obtendremos las mismas curvas para el ADRA más adelante. A la hora de elegir los parámetros de simulación se definieron:

- Aire ambiente a 25°C
- Sí se considera la radiación
- Rango de caudal a simular de 0,1 a 5,1 [l/s] en intervalos de 0,2
- Potencia térmica de 800 [W]
- Potencia térmica uniformemente repartida por la superficie trasera lisa del radiador

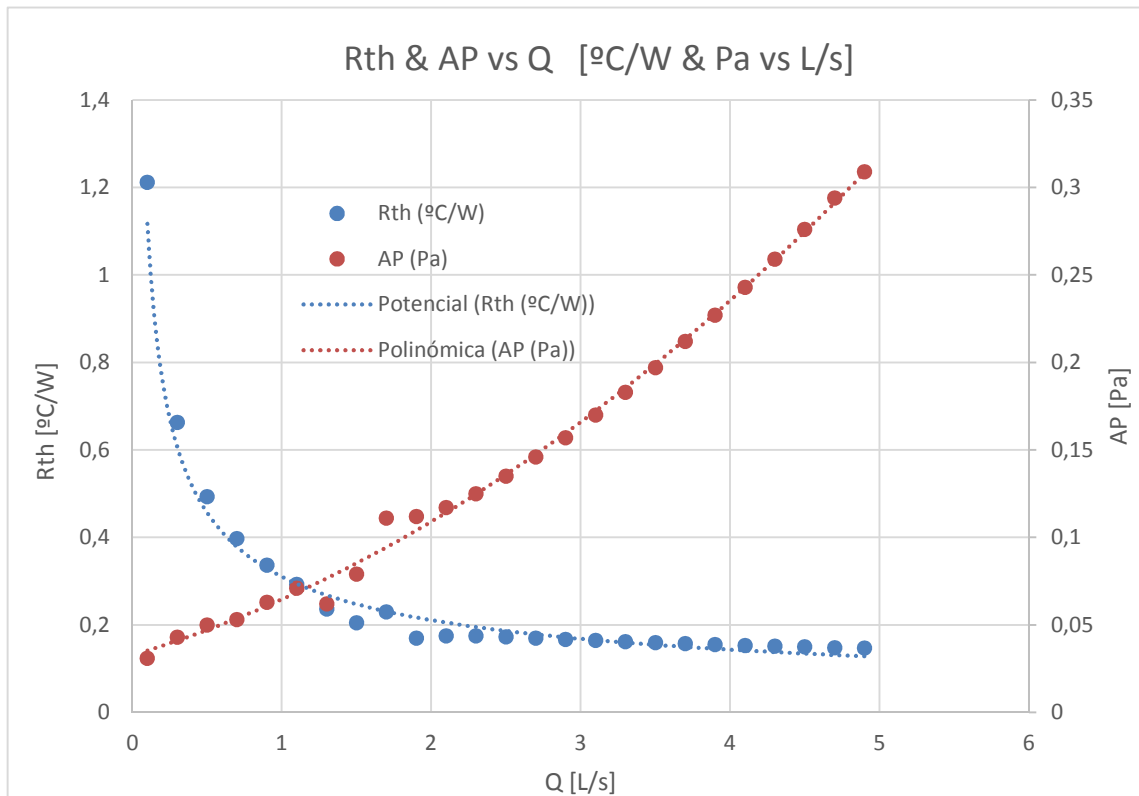


Figura 23. Resistencia térmica del radiador y curva de caída de carga frente al caudal

La forma de ambas curvas es la esperada, una polinómica de grado 2 para la curva de pérdida de carga de la instalación, y una exponencial decreciente para la resistencia térmica total equivalente. Se puede comprobar que las líneas de tendencia reflejan lo que se acaba de decir, y además el valor de R^2 es muy bueno en ambos casos.

Sin embargo, y de la misma que afirmamos que las curvas obtenidas tienen la forma esperada, hay que ser críticos con los valores numéricos. Las cifras de la Rth (resistencia térmica) obtenidos son bastante superiores a los esperados. Suponemos que las discrepancias son achacables a la sencillez del programa, que en detrimento y más si cabe para una geometría grande no aporta buenos resultados numéricos. Respecto al tamaño del mallado, se han probado diferentes mallas y el resultado no varía significativamente.

4.3.2. Otros softwares

Ante las limitaciones que se han comentado, pasamos a valorar la simulación del radiador mediante otros programas.

CATIA V5R18

CATIA es uno de tantos programas cuyo principal objetivo es el diseño CAD, de manera que se trata de un programa más potente para el 3D y los resultados son mucho mejores en lo que se refiere al modelado del radiador. La Figura 24 muestra el modelo final del PCCP 450 y puede apreciarse el alto grado de similitud entre ambos. Posteriormente este modelo se exportó en formato IGS y STEP para poder introducirlo en COMSOL o en otra versión más avanzada de QFIN, la 5.3.



Figura 24. Radiador PCCP 450 real (izq.) y en CATIA (dcha.)

COMSOL

COMSOL es un programa potente y complejo para la simulación entre otras cosas de dinámica de fluidos y transmisión de calor. Dada la falta de formación y de manejo de dicho programa, se realizó el diseño del elemento en CATIA para poder importarlo a continuación. Se intentó realizar en COMSOL el proyecto, pero no progresó por dos motivos. El primero es que a pesar de dar un mensaje de “satisfactorio” al realizar la importación del modelo desde CATIA, el programa no muestra la geometría. El segundo motivo es que se estima que el tiempo necesario a dedicar para poder realizar la simulación en dicho software sobrepasa el alcance de este proyecto y alteraría todo el cronograma.

QFIN 5.0

Ante los problemas detectados y en búsqueda de soluciones alternativas estuvimos buscando información y soporte de QFIN. La siguiente versión a la que pudimos tener acceso fue la 5.3, de la cual solicitamos usuario y contraseña para poder probarla y se nos concedió. En comparación con la versión QFIN3 el programa tiene mucha mejor apariencia

y sobre todo, **funcionalidad**, ya que de hecho nos permitió importar el PCCP 450 realizado en CATIA que posee un alto nivel de detalle.

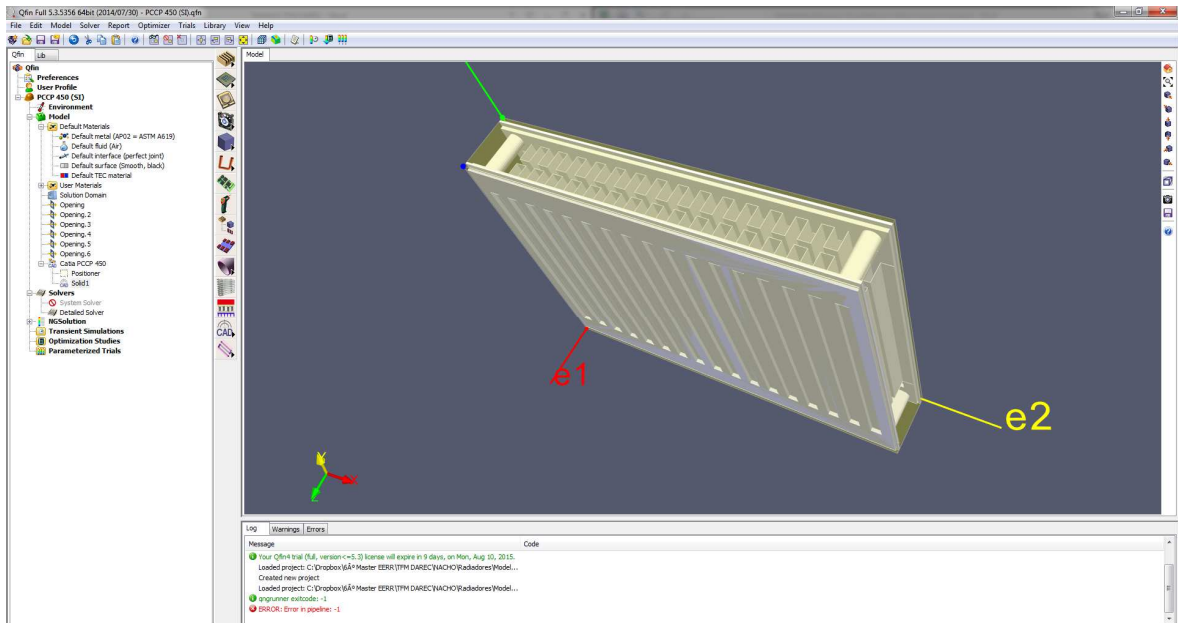


Figura 25. Software QFIN 5.0 mostrando el PCCP450

Sin embargo hasta ahora no se ha podido realizar un avance mayor porque el programa da fallo al solicitar la operación de mallado. Nos pusimos en contacto con el fabricante del software pero no conseguimos avanzar por lo que decidimos dejar apartada esta vía y pasar a las pruebas experimentales.

Por ello hemos de concluir que no se continúa por la vía de simulación de radiadores en ordenador, y que a pesar de estar el modelo 3D avanzado y haber supuesto un trabajo considerable, la dedicación necesaria para poder obtener resultados buenos y fiables se estima excesiva para el marco de este trabajo. No obstante como vía de futuro o posible mejora si el producto sufriera una revisión, las bases están sentadas.

5. ENVOLVENTE I

5.1. Introducción y necesidades

Como se viene diciendo desde el principio del documento, una de las grandes mejoras que aporta el dispositivo es evitar el gran flujo de calor que se dirige hacia la ventana y provoca el denominado efecto frío. Para evitar esto, el dispositivo debe redirigir el flujo de aire que en condiciones normales tiende a ser vertical en el radiador y a producir un flujo circulatorio dentro de la habitación, como se muestra en la figura inferior.

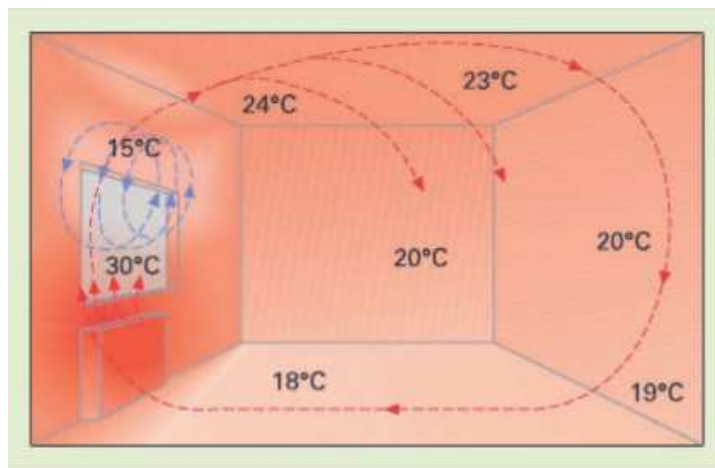


Figura 26. Flujo de aire dentro de una habitación con radiador clásico

La envolvente, o carcasa, del DAREC debe tener una forma tal que redirija el flujo hacia una dirección prácticamente horizontal de manera que se obtengan dos ventajas, como refleja la Figura 27:

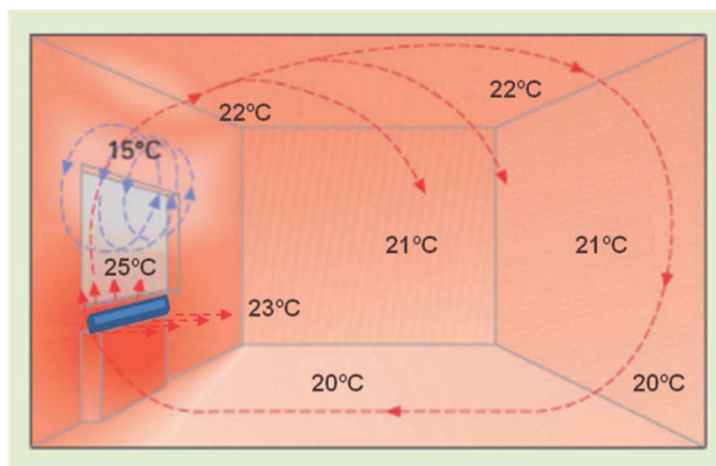


Figura 27. Flujo de aire en una habitación tras instalar el DAREC

- Enviar el aire hacia el centro de la habitación, lo que homogeniza la temperatura de la habitación y mejora el confort.

- Evitar que parte del flujo de aire más caliente pase delante de la ventana, lo que conlleva una reducción de las pérdidas hacia el exterior, algo muy deseable.

Además de los requisitos térmicos existen otras necesidades que cumplir y que se plasman en requerimientos mecánicos, de seguridad, hidráulicos, estéticos y por supuesto, económicos.

- **Mecánicos**

- Rigidez del dispositivo en sí mismo, de manera que sea durable y fiable en el tiempo.
- Albergar los soportes para los ventiladores así como para la electrónica.
- Realizar el contacto con el radiador.

- **De seguridad**

- Evitar cualquier tipo de bordes o aristas cortantes, tanto internos como externos, que pudieran causar daño a un usuario.
- Introducir las protecciones necesarias para cumplir la normativa sobre ventiladores y evitar accidentes al tocar las aspas en movimiento de manera accidental o intencionada.
- Evitar si es posible un calentamiento excesivo de la carcasa que pueda causar quemaduras, si bien este el menos preocupante ya que por razonamiento lógico el radiador estará más caliente que el DAREC. Además no puede pretenderse que un dispositivo empleado para calefacción no alcance una temperatura alta cuando intrínsecamente este es su modo de funcionar.
- Dado que es un dispositivo que funciona mediante electricidad hay que cumplir la normativa en cuanto a aislamiento de tensión, que evite acumulación de electricidad estática o posibles derivaciones de corriente al usuario.
- De cara a establecer los requisitos de seguridad se ha considerado que el dispositivo pueda ser usado tanto de manera correcta como negligente, para que si por ejemplo, un niño tocara el DAREC de cualquier manera, momento del funcionamiento o modo de alimentación no sufriera ningún daño.

- **Hidráulicos**

- Tener una forma de manera que cause las menores pérdidas hidráulicas al aire que circula en su interior.
- Evitar en la medida de lo posible, en las secciones de entrada o salida, aletas y formas que provoquen caídas de presión localizadas.
- El objetivo de reducir las caídas de presión, tanto localizadas como de conducción, radica en que a menor caída de presión un ventilador da más caudal para las mismas condiciones de funcionamiento.

- **Estéticos**

- El dispositivo debe ser armonioso y visualmente agradable en lo referente a la forma de la envolvente, ya que hoy en día además de hacer un producto que funcione tiene que ser bonito para que comercialmente funcione.
- Una vez decidida la forma exterior deberá prestarse atención a su acabado, dotándolo de un tacto agradable (rugosidad adecuada) y de una combinación de colores que aúne atractivo y elegancia.

- **Económicos**

- Todos los requisitos anteriores no sirven de nada si finalmente el coste del producto lo hace inviable económicamente.
- Además de ello un objetivo del DAREC es comercializarlo a un precio sustancialmente inferior a un modelo que existe en la competencia, lo que obliga a medir el coste monetario de cada decisión de diseño.

5.2. Antecedentes de la competencia

Dentro del estudio del estado de arte y de la competencia, nos encontramos con el producto “*Radfan Classic*”, de origen británico y que se muestra en la Figura 28. Podemos observar como cumple algunos de los requisitos que hemos mencionado anteriormente.



Figura 28. *Radfan Classic*, vista 3D (arriba) y de planta (abajo)

5.3. Primer diseño

Tras un largo esfuerzo de diseño y una serie de alternativas se definió el primer diseño de envolvente, ya funcional, y que se muestra a continuación:



Figura 29. Primer diseño de la envolvente, vista 3D lateral y frontal



Figura 30. Primer diseño de la envolvente, despiece lateral y frontal

A pesar de ser como se ha dicho, una carcasa funcional, todavía tenía un gran margen de mejora como demostramos posteriormente.

5.4. Segundo diseño

A raíz de un estudio crítico y un proceso de mejora continua, se consideró que podía mejorarse el primer diseño por las siguientes razones, enmarcadas dentro de los grupos de requisitos:

- **Térmicos**
 - Una menor distancia o radio de curvatura facilita la salida más horizontal del flujo.
- **Mecánicos**
 - Aumentar la rigidez empleando una curvatura exterior uniforme que evita los pliegues no deseados que podían producirse con el primer diseño.
 - Además se modificó la parte posterior para asegurar un mejor contacto con el radiador
- **De seguridad**
 - Reducir las aristas presentes en el primer diseño que podían resultar dañinas tanto en la carcasa como en la unión entre ambas piezas.
 - Introducir rejillas en la parte de salida y añadir unas secciones más pequeñas en la entrada evitar accidentes al tocar las aspas en movimiento.
- **Hidráulicos**
 - En este punto realizamos un compromiso de diseño ya que si bien la curvatura de la parte exterior favorece el flujo de aire, la modificación por razones de seguridad en la entrada y salida conlleva aumentar las pérdidas localizadas.
- **Estéticos**
 - Emplear 3 combinaciones de colores que cumplan con los requisitos de elegancia y atractivo, emplear formas curvas que son más armoniosas para la vista, emplear unas proporciones más estéticas para el perfil del DAREC y añadir una textura agradable a la parte curvada posterior. Dichas combinaciones se observan en la Figura 33.
- **Económicos**
 - Se estableció una fabricación a partir de material metálico y no plástico debido a que además de soportar mejor el paso del tiempo y ser más rígido, tiene una fabricación más económica que el empleo de moldes para materiales poliméricos.
 - Se definió un radio de curvatura que casase con un proceso de fabricación económicamente viable y que además satisficiera las mejoras anteriormente explicadas.

Tras aplicar al primer diseño las mejoras que acabamos de citar obtenemos el segundo diseño, que se incluye en las siguientes figuras.



Figura 31. Segundo diseño de la envolvente, vista 3D lateral y frontal



Figura 32. Segundo diseño de la envolvente, despiece lateral y frontal



Figura 33. Los 3 colores diferentes, negro y gris en el perfil (izq.) y blanco en la vista de frente (dcha.)

6. VENTILADORES I

Tras haber estudiado los primeros prototipos de envolvente y los radiadores, se procede a explicar el análisis realizado sobre un conjunto inicial de ventiladores, como parte del procedimiento de elección del ventilador final.

Partimos del catálogo completo y actualizado de SUNON, un buen fabricante de ventiladores, que se caracteriza por tener una muy amplia gama de ventiladores además de ser un fabricante con el que trabajan los distribuidores contactados, y del que por tanto tendremos una fácil suministro.

6.1. Ventiladores considerados y digitalización de las curvas

Comenzamos realizando una selección de varios modelos. Antes de continuar, explicar brevemente que la nomenclatura obedece al siguiente esquema:

AA BB CC D E F - ...: Las dos primeras letras indican la serie, los siguientes 4 números son para indicar el diámetro y el espesor del ventilador en milímetros y con 2 cifras para cada concepto. El siguiente número indica la tensión nominal (0=5 [V], 1=12 [V]), la letra posterior es para indicar el tipo de cojinete y finalmente el número previo al guion se utiliza para señalar el tipo de velocidad del ventilador (ultra rápido, rápido, medio, lento...)

Tabla 2. Selección inicial de ventiladores con sus características principales

SUNON	Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow		Noise	Dimensions	Price	Q/W
TIPO	Vdc	mA	W	RPM	CFM (pie3/min)	m3/h	dB (A)	mm	€	m3/h/W
HA40101V4-000U-999	12	65	0,8	4500	5,3	9,0047	18,2	40x40x10	3,18	11,255875
MB60101V1-000U-A99	12	120	1,44	4000	16	27,184	28,5	60x60x10	3,7	18,8777778
ME50101V1-000U-A99	12	110	1,32	5500	13,8	23,4462	31	50x50x10	2,71	17,7622727
HA60151V4-000U-999	12	52	0,6	2500	10,8	18,3492	14,5	60x60x15	3,31	30,582
MB70101V3-000U-A99	12	60	0,72	2100	14,5	24,6355	20,5	70x70x10	NA	34,2159722
MEDIA	12	81,4	0,976	3720	12,08	20,52392	22,54	-	3,225	22,5387795

Explicar que el parámetro Q/W representa el ratio caudal frente a potencia consumida y da una idea sobre la capacidad de convertir la potencia consumida en caudal, especialmente útil en nuestro caso ya que en las pruebas comprobamos como prácticamente trabajábamos en flujo libre, esto es, máximo caudal posible del ventilador.

Dentro del catálogo mencionado, todos ellos presentan su curva característica ΔP vs Q (caída de presión frente a caudal) en forma de imagen. Procedimos a digitalizar cada una de ellas como se muestra a continuación y posteriormente las convertimos a unidades del sistema internacional (SI en adelante):

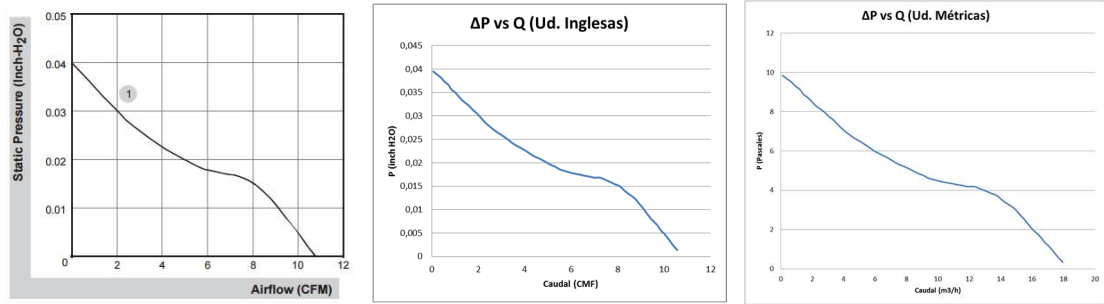


Figura 34. Curva característica ΔP vs Q de un ventilador; catálogo (izq.), digitalizada (ctro..) y en SI (dcha.)

Realizamos dicho procedimiento con todos los ventiladores elegidos de manera que pudiéramos representar todas las curvas en una única gráfica, poder comparar entre sí a varios de ellos, o extrapolar las condiciones de trabajo a otras que no fuesen las nominales.

6.2. Leyes de los ventiladores

El siguiente paso, una vez acotada la elección de ventiladores, es pensar en los posibles puntos de funcionamiento que se pueden dar así como en cual resulta de mayor utilidad. Para ello contamos con una serie de variables íntimamente relacionadas.

En primer lugar tenemos la curva ΔP vs Q que es la que marcará, al cortarse con la curva de carga de la instalación, el punto de funcionamiento real. Cada una de las curvas ΔP vs Q se corresponde con una velocidad de giro dada, de manera que estas curvas varían en función de la velocidad a la que gire el ventilador.

Por otro lado tenemos la variable tensión de alimentación del ventilador, en función de la cual obtendremos la potencia eléctrica consumida y la velocidad de giro del ventilador. Resumiendo:

$$\text{Curva } (\Delta P \text{ vs } Q) = f(\text{rpm}) = f(\text{tensión})$$

$$P_{\text{Potencia eléctrica}} = f(\text{tensión})$$

La Figura 35 muestra estas características medidas para dos de los ventiladores. Las mediciones de velocidad se realizaron con un tacómetro óptico calibrado y de alta precisión, modelo Testo T470. En dicha figura podemos observar a la izquierda cómo evoluciona la velocidad de giro de dos ventiladores frente a la tensión de alimentación. Al obtener una línea de tendencia que nos dé una expresión matemática para la relación “velocidad de giro – tensión” obtenemos sendas parábolas que además de tener un coeficiente de correlación prácticamente perfecto, siguen la trayectoria de puntos sin apenas desviarse. Se especifica esto porque un ajuste lineal también daba un coeficiente de correlación cercano a uno, pero a la hora de calcular qué tensión necesitaríamos emplear para alcanzar una determinada velocidad, el valor de la recta llegaba a desviarse hasta en un 5%.

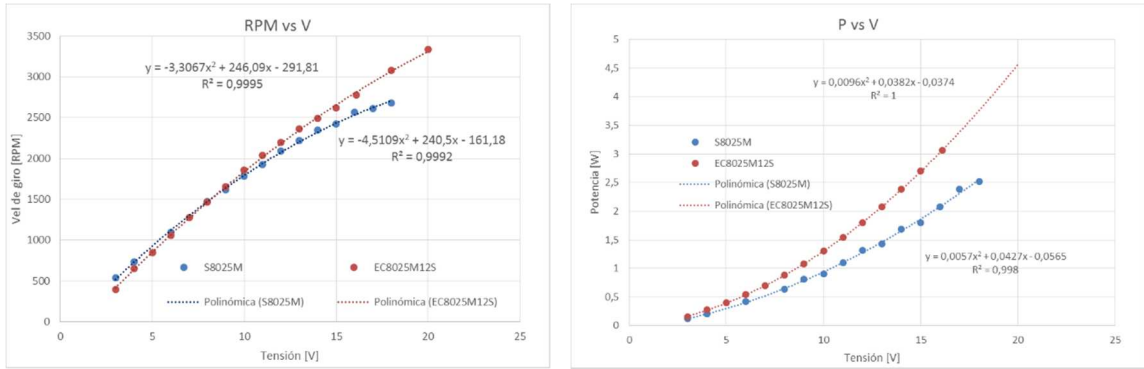


Figura 35. Velocidad de giro [RPM] y potencia eléctrica consumida [W] frente a tensión de alimentación [V]

Por tanto y una vez obtengamos esta parábola para nuestro ventilador pretendido podremos determinar en función de la tensión aplicada, a qué velocidad se encuentra girando el ventilador. A la derecha vemos la curva de potencia en función de la tensión aplicada y comprobamos que efectivamente la expresión que rige el comportamiento de forma perfecta es una función polinómica de grado 2, una parábola. Sustituyendo:

$$\text{Curva } (\Delta P \text{ vs } Q) = a \cdot (\text{tensión}) + b$$

$$\text{Potencia eléctrica} = c \cdot (\text{tensión}^2) + d \cdot (\text{tensión}) + e$$

Conocer estas dos relaciones es especialmente importante para tener siempre presente que la potencia evoluciona con el cuadrado de la tensión y en función de ello tomar las decisiones adecuadas respecto al consumo y a la alimentación necesaria.

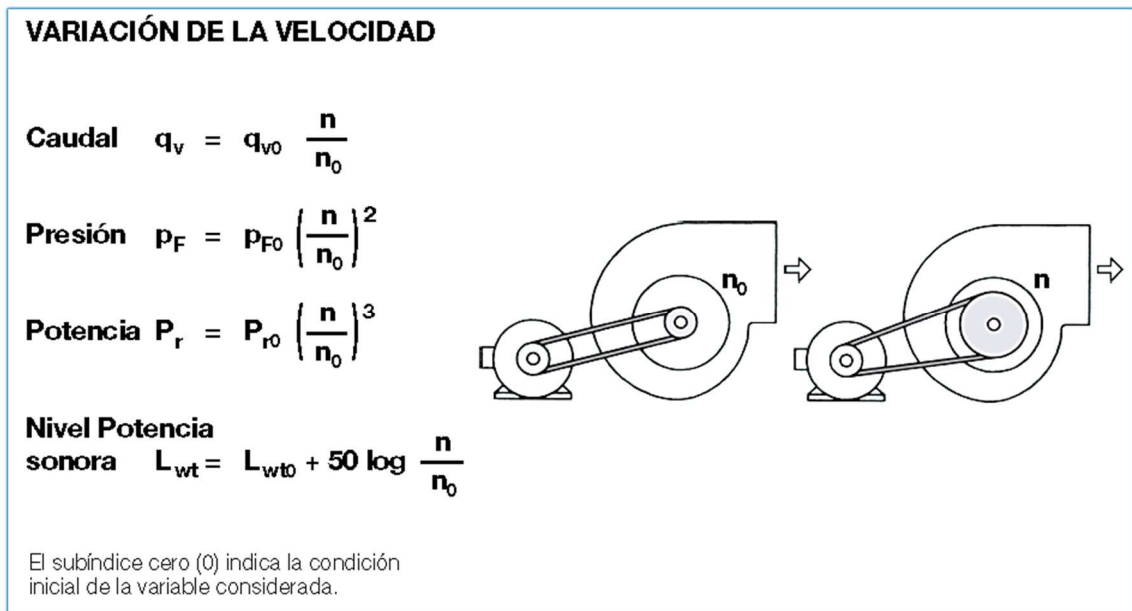


Figura 36. Relaciones de caudal, presión, potencia y nivel sonoro en función de la velocidad de giro

La Figura 36, extraída del catálogo técnico de Salvador Escobar, ilustra la influencia del cambio de velocidad sobre el resto de variables como caudal o presión según las leyes de dinámica de fluidos para bombas y ventiladores.

6.3. Aplicación a los ventiladores elegidos

Siendo n la velocidad actual, x cualquier variable a la nueva velocidad n , n_0 la velocidad inicial y x_0 cualquier variable a la velocidad de giro inicial. Aplicado dichas leyes a la curva digitalizada del SUNON HA60151V4, cuya elección se justifica en el punto siguiente, obtenemos las curvas de caída de presión frente a caudal para dos velocidades diferentes a las que suministra el fabricante.

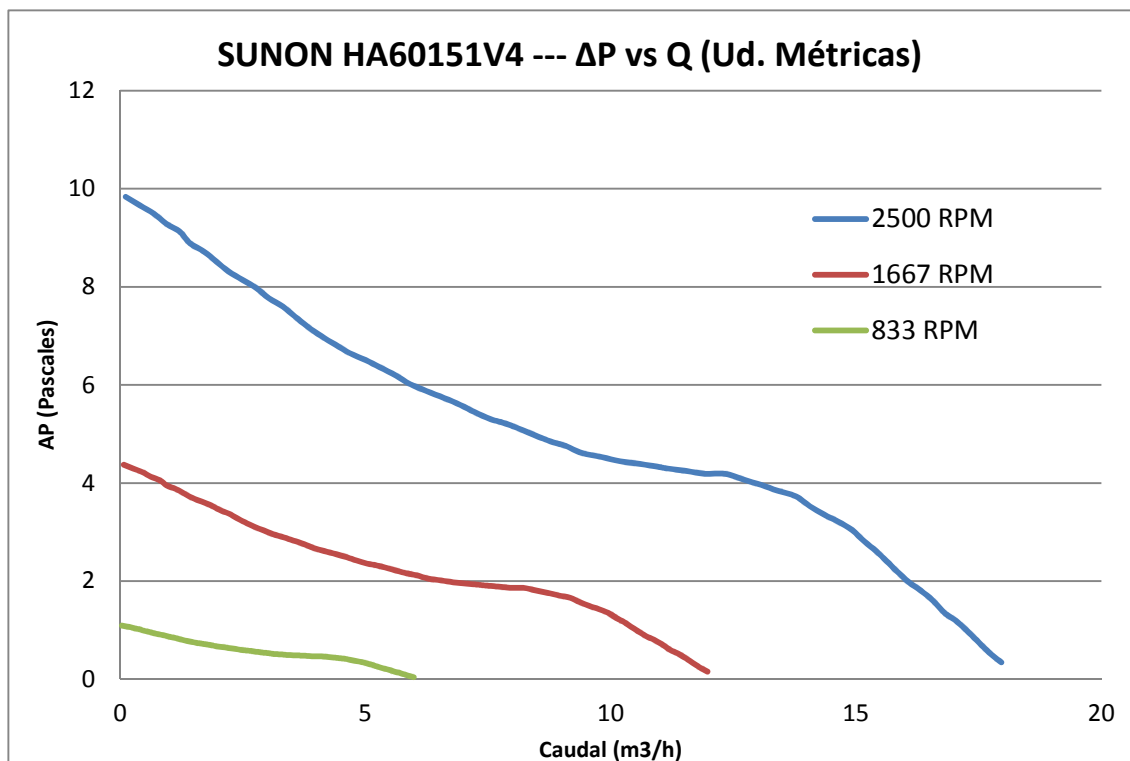


Figura 37. Curvas de ΔP vs Q a diferentes velocidades para un mismo ventilador

Las curvas se han obtenido con el siguiente razonamiento:

- Sea un punto inicial a n_0 con un caudal q_0 y una caída de presión p_0
- El nuevo punto a la velocidad de giro n tendrá un caudal $q = q_0 * \frac{n}{n_0}$ y una caída de

$$\text{presión } p = p_0 * \left(\frac{n}{n_0}\right)^2$$

Dado que el ruido emitido a velocidad nominal para los ventiladores finales es realmente bajo, aproximadamente 15 dB, no hemos estimado necesario realizar una gráfica del nivel sonoro emitido frente a la velocidad de giro.

6.4. Criba de ventiladores por pesos ponderados

Todos los ventiladores seleccionados tenían en común una tensión nominal de alimentación de 12 [V]. Para compararlos entre sí y elegir la mejor opción tomamos en cuenta algunas de las variables de la tabla inicial:

- Consumo de potencia
- Caudal máximo
- Ruido
- Relación caudal/potencia consumida

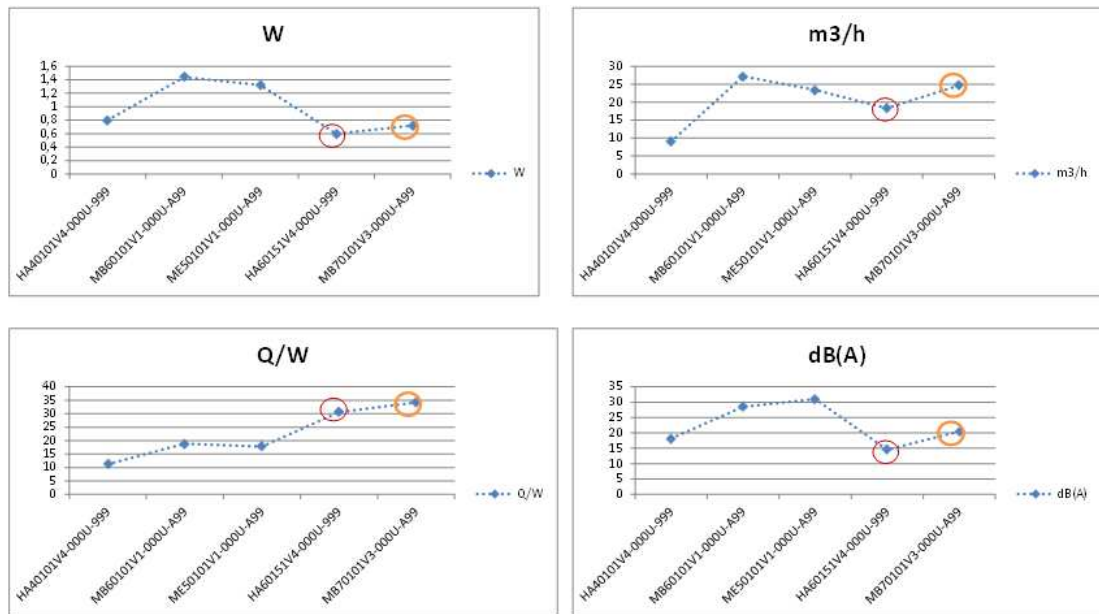


Figura 38. Representación de las variables a comparar de los ventiladores

Para obtener el resultado de las sumas ponderadas seguimos la siguiente definición:

$$Valor\ de\ ventilador\ k = \sum_{i=1}^{variable\ n} \pm w_i * \frac{variable_i^k - \overline{variable_i}}{\overline{variable_i}}$$

El valor \pm se define en tanto cuanto sea positivo estar por encima o por debajo de la media para cada variable, por ejemplo es mejor estar por debajo para el ruido pero para el caudal mejor estar por encima. $\overline{variable_i}$ es la media de la variable i calculada como una media aritmética simple, $variable_i^k$ es el valor de la variable i para el ventilador k, y w_i es el peso ponderado de la variable i.

Con esta fórmula se calcula la diferencia entre el valor del ventilador y el medio, y se divide entre el valor medio con objeto de normalizar todas las variables, tras lo cual se multiplican por el peso correspondiente. Si le damos a todas las variables el mismo peso el resultado es el que se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultado de ventiladores con todos los pesos ponderados iguales

VENTILADORES	PUNTUACIÓN	POSICIÓN
MB70101V3-000U-A99	19,51	1º
HA60151V4-000U-999	18,55	2º
HA40101V4-000U-999	-8,01	3º
ME50101V1-000U-A99	-14,11	4º
MB60101V1-000U-A99	-15,95	5º

Teniendo en cuenta las características del producto que estamos diseñando, y basado en el criterio del proyectista, **adjudicamos a las variables consumo de potencia y ruido el doble de importancia que a caudal y Q/W**. Esto se debe a que el producto puede acabar teniendo que estar funcionando en una estancia donde se esté descansando, leyendo, viendo la tele... y no es aceptable que el dispositivo emita un ruido molesto.

De igual manera y dadas las fuentes de suministro se valora muy positivamente un menor consumo con objeto de prolongar la autonomía del dispositivo, lo cual redundará en mayor comodidad para el usuario. El resultado tras esta reasignación de pesos es la que se muestra a continuación:

Tabla 4. Resultado de ventiladores al ponderar según el confort del usuario

VENTILADORES	PUNTUACIÓN	POSICIÓN
HA60151V4-000U-999	20,56	1º
MB70101V3-000U-A99	14,04	2º
HA40101V4-000U-999	7,02	3º
ME50101V1-000U-A99	-17,65	4º
MB60101V1-000U-A99	-23,96	5º

Se comprueba que la elección va decantándose claramente entre dos ventiladores en tanto que la clasificación para el 3º, 4º y 5º se mantiene constante con ambos criterios y además muy alejados de los dos primeros. Los dos primeros ventiladores obtienen una puntuación muy parecida en el primer caso y se desmarca en esta segunda comparativa el HA60151V4, si bien en términos generales

Mostramos en la Figura 39 las 5 curvas superpuestas y el detalle de los dos ventiladores que hasta ahora han resultado como las mejores opciones.

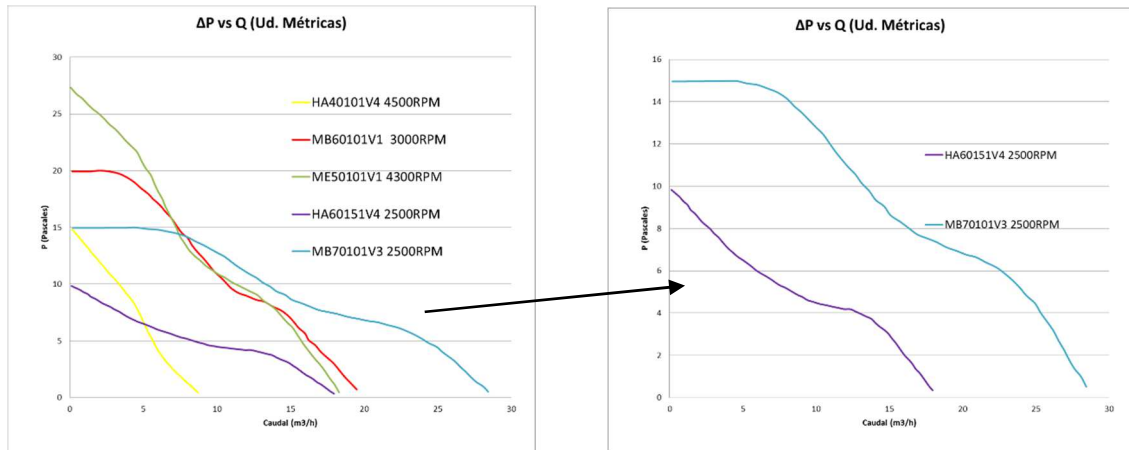


Figura 39. Comparación de curvas ΔP vs Q para todos los ventiladores (izq.) y para los dos elegidos (dcha.)

Al observar las gráficas de la Figura 39 confirmamos dos hechos:

- Los ventiladores elegidos son aquellos que presentan las curvas ΔP vs Q más “aplanadas”, esto es, que tienen un mayor ratio $Q_{max}/\Delta P_{max}$. Esto encaja con lo planteado ya que el sistema se comporta prácticamente como si no hubiera resistencia, y por ello interesa una curva con más caudal pero menor caída de presión.
- De la gráfica de la derecha se corrobora que el ventilador MB70101V3 daría más caudal en cualquier situación que el HA60151V4, siempre y cuando ambos estén alimentados a la misma tensión. Por el contrario sabemos gracias a las hojas de características que el HA60151V4 es más silenciosos y consume menos potencia.

6.5. Segunda selección de ventiladores

Llegado este punto del documento, y con objeto de recordar que este no es el desarrollo de un proyecto teórico sino real, cabe hacer una reflexión en torno a la metodología de desarrollo de productos. El desarrollo de cualquier nuevo producto no es lineal sino que sigue una trayectoria cíclica de mejora continua; cualquier estudio, ensayo o etapa del proyecto puede traer como consecuencia una modificación de algo que ya estaba definido si a cambio de introducir dicha mejora el proyecto en su conjunto gana valor. Por ello, si en algún punto de este documento se vuelve a hablar sobre algo que ya estaba tratado no debe verse como una repetición sino como una fase posterior que trata el mismo punto desde otra perspectiva más avanzada.

Siguiendo con el proceso de elección del ventilador, como resultado del punto 6.4 se había observado que los ventiladores predominantes eran el HA60151V4 y el MB70101V3. Por requisitos de diseño mecánico de la carcasa y para poder ensayar de manera más equitativa diferentes modelos se decidió fijar el ancho (espesor) del ventilador en 15 [mm].

Dada la incertidumbre que supone trabajar de manera combinada con coeficientes de convección y curvas de presión-caudal, decidimos realizar una comparación experimental significativa que descartara las incertidumbres del análisis teórico. Para ello concretamos ensayar 3 modelos de ventilador con diferente diámetro y características hidráulicas para ver cuál era el que más se adecuaba a las necesidades del dispositivo en las condiciones reales de funcionamiento.

Basándonos en el primer análisis teórico y en la disponibilidad del proveedor elegimos 3 modelos de la casa SUNON (nomenclatura), en concreto ME80151V1, ME70151V3 y HA60151V4, cuyas curvas a tensión nominal se presentan en la Figura 40. Las elecciones del de 60 y 70 mm de diámetro corresponden al análisis teórico ya explicado mientras que el de 80 se ensaya para cubrir la posibilidad de que con los otros modelos estuviéramos faltos de caudal de aire, así como para estudiar la posibilidad de introducir otra variante del producto con mayor tamaño y potencia.

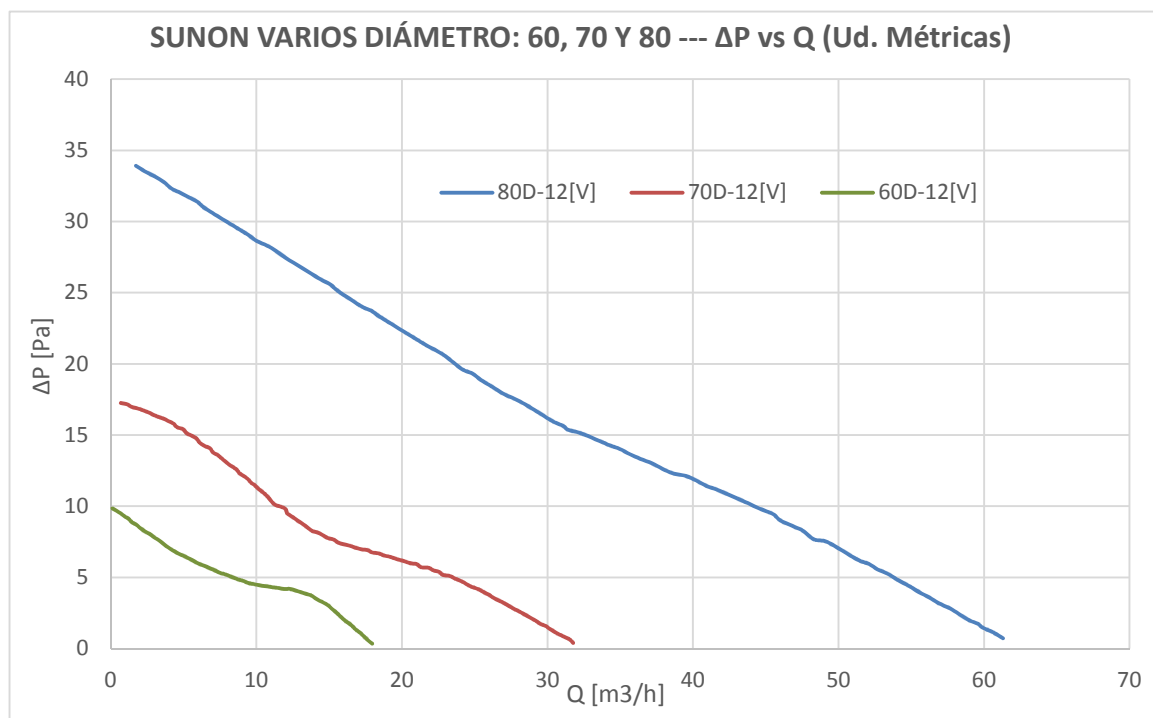



Figura 40. Curvas de ΔP vs Q para los 3 ventiladores a ensayar

Comentar que debido a una rotura de stocks, finalmente cambiamos el modelo de 70 mm de diámetro con curva V3 por el mismo modelo pero con curvas V2 y V1. Recordar que según la nomenclatura, ME70151VX supone un ventilador de 70 mm de diámetro y 15 de espesor, alimentado a 12 V y la X que corresponde a las curvas 1, 2 y 3 son diferentes curvas caudal vs caída de presión para las características comunes ya indicadas. La Figura 41 recoge las características de estos 3 ventiladores.

	Rating Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise	Curve
	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(Inch-H ₂ O)	(dB (A))	
ME70151V1-000U-A99	12	113	1.36	3300	27.0	0.11	31.5	1
ME70151V2-000U-A99	12	74	0.89	2800	23.0	0.09	26.5	2
ME70151V3-000U-A99	12	47	0.57	2300	19.0	0.07	21.5	3

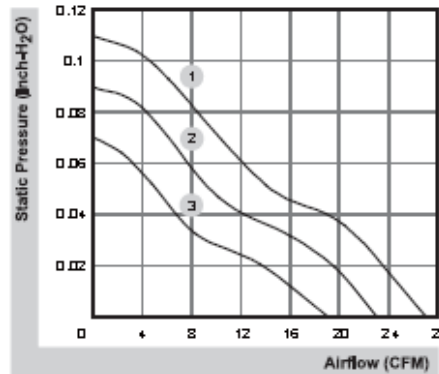


Figura 41. Características de las 3 curvas de ΔP vs Q para los ventiladores ME70151VX

Con estos cuatro ventiladores que habíamos seleccionado hasta la fecha, unidos a la envolvente resultante del apartado 5, comenzamos a probar un primer prototipo con objeto de obtener de manera experimental los caudales que tendríamos en la instalación.

Para que el documento quede correctamente sustentado introducimos a continuación un apartado en el que se explica cómo hallar el punto de trabajo de la instalación una vez instalado el dispositivo. Posteriormente al desarrollo teórico se procederá a realizar el ensayo con los ventiladores ya definidos.

7. PROCEDIMIENTO PARA HALLAR EL PUNTO DE TRABAJO

Una vez estudiados de manera independientes las características tanto de los ventiladores como del radiador, podemos pasar a explicar el procedimiento de selección del ventilador así como a encontrar el punto de trabajo en el que funcionará la instalación. En la siguiente imagen resumimos el procedimiento para obtener a primera vista una idea clara:

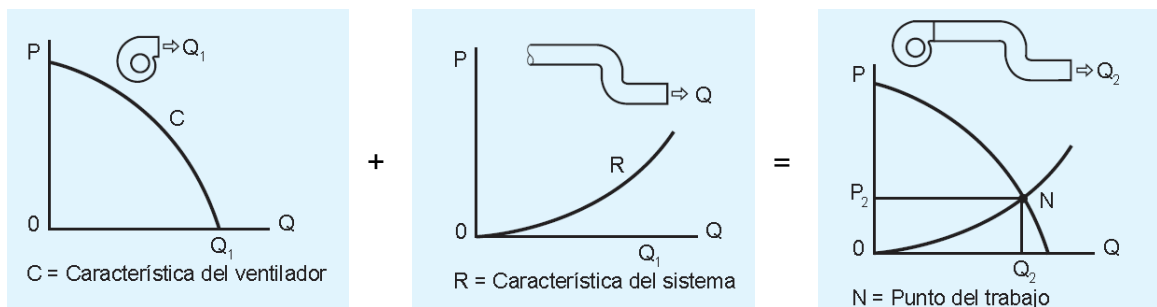


Figura 42. Procedimiento para hallar el punto de trabajo

Tal y como se puede apreciar en la imagen superior, el primer paso es obtener la curva ΔP vs Q para el ventilador. Esto ya se ha realizado en pasos anteriores. Después se debe hallar la misma curva, ΔP vs Q, pero en este caso para la instalación a la que se va a acoplar el ventilador. Finalmente se trata de hallar de manera gráfica, analítica y/o experimental el corte entre ambas curvas.

7.1. Curva de carga del ventilador

Utilizaremos el ventilador SUNON HA60151V4. Las curvas de dicho ventilador para tres tensiones, con su velocidad correspondiente, se muestran en la *Figura 37*, perteneciente al apartado 6.3.

7.2. Curva de carga de la instalación

En segundo lugar por tanto necesitamos la curva de instalación del sistema, que nos la proporciona parcialmente la simulación de QFIN3. A ello le debemos sumar la caída de presión en el propio dispositivo, si bien y como nos demostraron las pruebas experimentales se consideran despreciables.

En el caso de que no fuera posible obtener la curva teórica de caída de presión del sistema realizaremos la aproximación que recogen diversas fuentes, y que se basan en suponer que la curva de pérdidas del sistema es una parábola solamente con el término

cuadrático, cuya fórmula se da a continuación y cuya representación se muestra en la Figura 43.

$$p = p_1 * \left(\frac{q}{q_1}\right)^2 = k * q^2$$

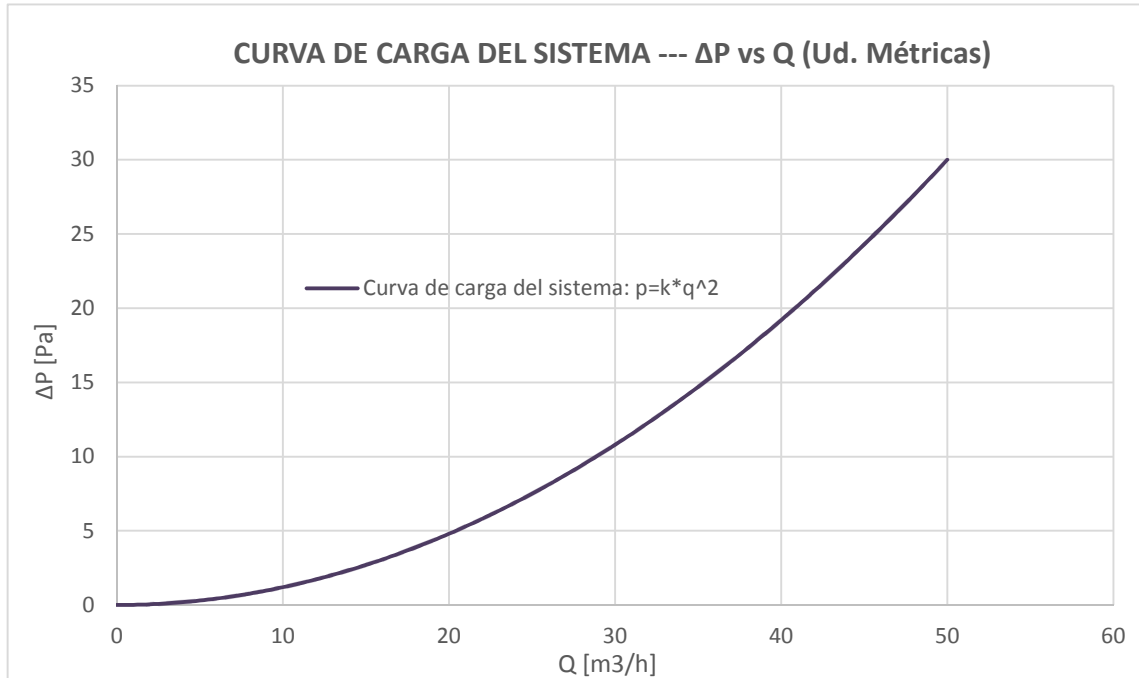


Figura 43. Ejemplo teórico de una curva de pérdidas de carga

7.3. Puntos de funcionamiento hidráulicos

Cada uno de los puntos de funcionamiento se obtendrá en los puntos de cruce entre la curva de carga del sistema y la de los ventiladores; para las diferentes velocidades y los diferentes modelos, como muestra la *Figura 44*.

Con objeto de acabar el ejemplo planteado, a continuación se presentan los puntos de funcionamiento del conjunto instalación-DAREC para 3 tensiones (velocidades) diferentes del ventilador (HA60151V4) y la curva de carga supuesta.

Tabla 5. Puntos de funcionamiento y características asociadas

Punto	Caudal [L/s]	Pot. Cons. [W]
12 [V]	15	.6
8 [V]	10	.3
4 [V]	5	.15

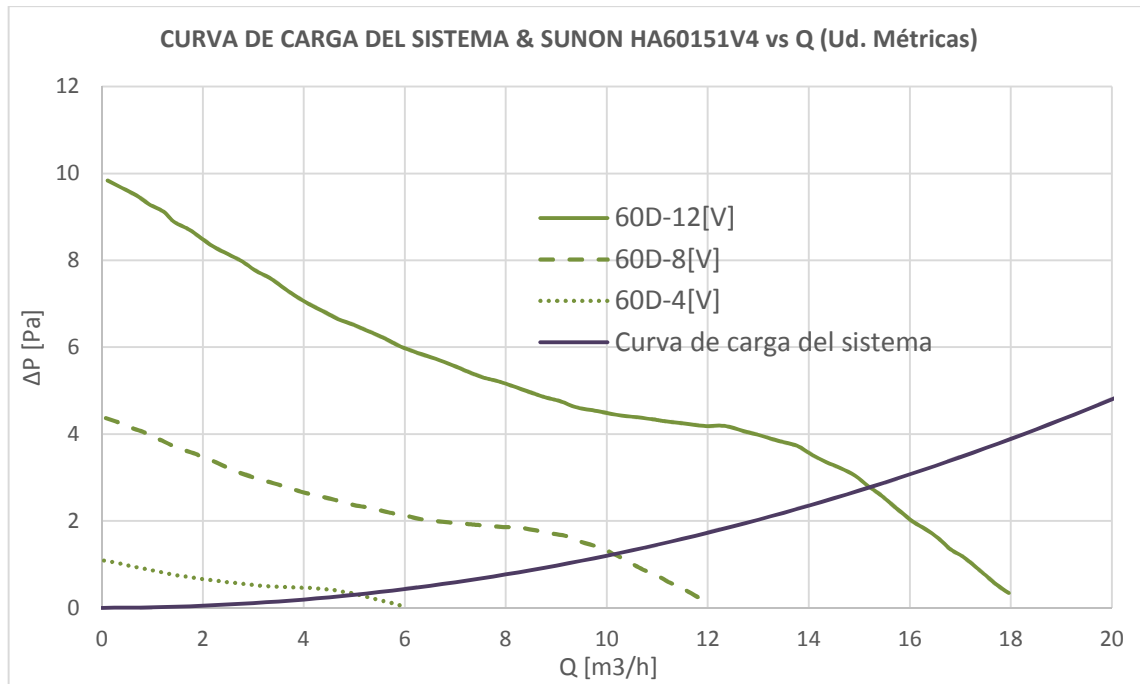


Figura 44. Curva de carga frente a curva de ventilador para hallar puntos funcionamiento reales

7.4. Consideraciones térmicas

Sin embargo, con el planteamiento realizado hasta el momento, solamente hemos tenido en cuenta las características hidráulicas de la instalación. Una de las funciones que pretende realizar el dispositivo puede definirse de manera sencilla, a pesar de que su análisis sea mucho más complejo. **Dicha función es aumentar la transferencia de calor de manera convectiva para un radiador.** Esta función se logra al aumentar el coeficiente de transferencia de calor interno del radiador, especialmente al pasar de convección natural a forzada, mediante el caudal de aire movido por los ventiladores.

La situación inicial es que sin el dispositivo se tiene un caudal calorífico \dot{Q} emitido por el radiador para un salto de temperaturas determinado. Al incorporar el dispositivo, mejora la $h_{interna}$, lo cual reduce la R_{th} total y con ello, para un mismo salto de temperatura se tiene una mayor emisión de calor, lo cual redundará en un ahorro para el usuario porque tendrá la calefacción dada durante menos tiempo. Dicho de otra manera, consumiendo la misma cantidad de energía base, logrará satisfacer sus necesidades caloríficas en un menor tiempo.

Si por ejemplo se pretende una mejora de calefacción del 5% en \dot{Q} para una ΔT dada, supondría reducir la R_{th} equivalente en un 4,8%. En función de los valores de resistencia térmica de radiación y de convección externa quedaría determinado el incremento de $h_{interna}$ necesario. Aquí es donde se ligan las características térmicas con las hidráulicas,

ya que para lograr esa mejora de $h_{interna}$ buscada sería necesario emplear un caudal determinado de $X \text{ m}^3/\text{h}$ que lo darían el/los ventiladores del DAREC. La relación entre el caudal y el coeficiente de convección forzada interna es compleja y nada inmediata, estando sus ecuaciones en el Anexo A, empleado para el cálculo teórico de la emisión del radiador.

Sin embargo y aun siendo importante, no es especialmente este valor ya que las dos mayores ventajas que aporta el dispositivo son, como ya se han dicho, evitar la fuga de calor por las ventanas que supone un despilfarro de energía, y además contribuir a homogeneizar la temperatura dentro de la habitación, mejorando el confort de los usuarios.

8. ENSAYO DE CAUDAL SOBRE PROTOTIPO REAL

Tras introducir al final del apartado “Ventiladores I” los ensayos iniciales que pensábamos llevar a cabo, y exponer en el apartado anterior cómo se halla el punto de trabajo, pasamos a explicar de manera detallada cómo realizamos estas primeras pruebas.

8.1. Importancia del diseño y elección de los componentes

Como ya se comentó en apartados anteriores se trata de hallar un balance entre la mejora de convección lograda por el caudal que mueve el ventilador y el consumo de potencia del mismo, recordando que estamos diseñando un dispositivo autónomo, renovable y eficiente.

Enmarcado en el plan europeo del triple 20 para 2020, uno de los objetivos más importantes es el de la eficiencia. La idea de eficiencia, aplicada a nuestro dispositivo se refleja del siguiente modo:

- Hasta ahora se diseñaban multitud de productos (bombillas, coches...) sin tener en cuenta el consumo ya que el acceso a las fuentes de energía era barato.
- Sin embargo la escasez de recurso que propicia un aumento de los precios, unido a la conciencia medioambiental ha provocado una mayor preocupación por el consumo.
- Esto supone que **el fin del todo vale**. No se trata de elegir un ventilador cualquiera, conectarlo a la red y ponerlo a funcionar en su punto de máxima potencia para así obtener el máximo caudal del ventilador.
- En contraposición a esta vieja manera de pensar, la mentalidad de diseño sostenible, *sustainable design*, que tanto se estila hoy día busca satisfacer las necesidades a la par que se realiza un uso moderado y adecuado de los recursos.
- En nuestro desarrollo esto pasa por realizar un estudio de varios ventiladores y a varias tensiones de alimentación para ver cuál es el más adecuado. Las diferentes tensiones de alimentación se traducirán en diferentes velocidades de giro y en sus curvas de presión-caudal asociadas. **Sin duda es un proceso más complejo, largo y costoso que como se hacía antes, pero a cambio se tiene un diseño mucho más riguroso, preciso y equilibrado.**

8.2. Objetivos de los ensayos

El objetivo era claro, realizar unas pruebas de funcionamiento con los ventiladores seleccionados, instalándolos en la envolvente metálica y comprobando para diferentes tensiones de alimentación si el punto de funcionamiento es acorde a lo esperado o si por el contrario existen discrepancias y si estas pueden llegar a impedir que el DAREC

satisfaga sus requisitos. Las conclusiones que necesitábamos obtener tras estos ensayos eran las siguientes:

- ¿Hay que modificar algo de la carcasa? ¿Si es así, qué hace falta?
- ¿Cuál de los ventiladores es el más apropiado? ¿Puede incluso haber varios? ¿En qué posición se instalará el ventilador? ¿A qué tensiones se alimentará?

Para obtener una comparativa más avanzada, adquirimos una unidad comercial del modelo de la competencia y así pudimos contrastar las mejoras que tenía el nuestro incluso estando en fase de desarrollo.

8.3. Preparación de los ensayos

En primer lugar comenzaremos por explicar cómo y dónde se realizaron las pruebas así como el equipo de medición que empleamos para ello.

8.3.1. Equipos empleados

Kanomax 6813

Anemómetro de álabes y de alta precisión. A continuación se muestra una imagen y un resumen de sus características



Rango de medida de 0,2 a 40 [m/s]

Precisión de +/- 1,0 % en la lectura

Resolución de 0,01 [m/s]

Temperatura del fluido entre -30 y 100 [°C]

Temperatura ambiente entre -95y 200 [°C]

Precisión de +/- ,3 [°C] en la lectura

Resolución de 0,1 [°C]

Pantalla LCD para lectura inmediata

Figura 45. Anemómetro Kanomax 6813: Imagen y características principales

Túneles de viento

Para realizar una medición fiable es necesario realizar un túnel de viento, y tras ponernos en contacto con el departamento técnico de Kanomax, nos dijeron que debíamos construir unas canalizaciones cuya sección fuera del tamaño del ventilador, y con una longitud de varios diámetros de manera que se asegure un desarrollo laminar del fluido dentro de dicha canalización. Construimos sendos túneles de viento con papel-cartón y secciones de 60 y 70 [mm] de lado, como se muestra en la Figura 46.

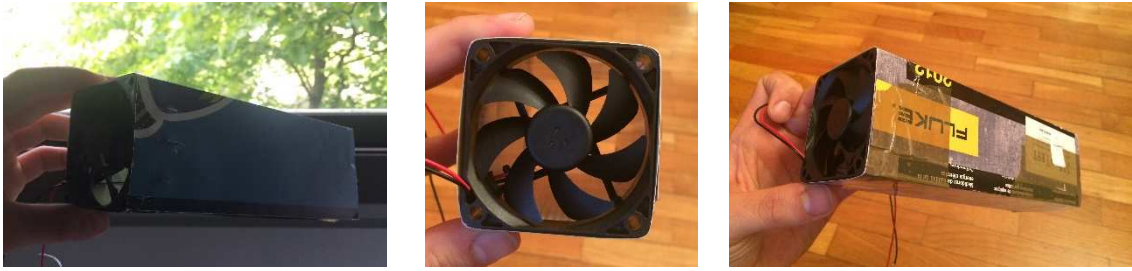


Figura 46. Túneles de viento para los ventiladores de 70; vista 3D (izq.) y para 60; ajuste (ctro.) y vista 3D (dcha.)

A los túneles de viento les practicamos unas incisiones para albergar las rejillas tanto lisas como a 90°. No se construyó el túnel para el **ventilador de 80 [mm]** porque al conectarlo a la fuente de alimentación y probar su funcionamiento a varias tensiones quedó patente que el **ruido provocado lo hacía inviable para esta aplicación.**

Banco de pruebas

Para poder probar los prototipos en su ámbito de funcionamiento realizamos un banco de pruebas encima de un radiador lo suficientemente alargado como para albergar a dos dispositivos. Instalamos una fuente de alimentación con doble salida, así como un polímetro con el fin de tener lecturas contrastadas y tener con ello unos ensayos más rigurosos. Se puede observar todo ello en la siguiente figura:



Figura 47. Instalación del banco de ensayos empleado

8.3.2. Medición de flujo libre

Una vez preparado todo comenzamos a medir los caudales de los diferentes ventiladores en flujo libre, esto es, sin ninguna oposición ni aguas arriba ni aguas abajo. Este paso se realiza para comprobar si el caudal medido por el anemómetro es el que debería ser, para en caso contrario establecer un coeficiente de minoración o mayoración respecto al valor que da el fabricante para asegurar que las lecturas posteriores son coherentes.

Estas medidas se realizaron para los 3 ventiladores a las 3 tensiones establecidas para el ensayo, estando recogidos todos los datos en el Anexo C. Decir que de las 9 medidas, 5 obtuvieron un valor igual al teórico, y en las 4 restantes la diferencia fue menor al 5%. La Figura 48 ilustra cómo medimos la velocidad a flujo libre, a la par que muestra los valores tanto de velocidad en [m/s] como la tensión de alimentación del ventilador.



Figura 48. Medida del caudal en flujo libre

8.3.3. Diferentes tipos de rejillas

El primer ventilador con el que empezamos a ensayar fue el HA60151V4, al ser el que mejor caracterizado teníamos de mediciones anteriores. En el siguiente punto se explicará porque pasamos de poner los ventiladores en posición horizontal a ponerlos en vertical, si bien lo que quedó muy patente en cuanto lo pusimos en vertical es que con este cambio de orientación, la parte inferior de la salida frontal oponía una obstrucción inaceptable. Procedimos por tanto a seccionar esta parte ya que **decidimos que en lo sucesivo el ventilador iría preferiblemente en vertical o lo más próximo a dicha posición, siempre teniendo en cuenta los criterios de seguridad.**

Una vez seccionada la parte inferior, lo siguiente que cuestionamos fue las rejillas de que había en la salida del dispositivo, y probamos 3 configuraciones diferentes aprovechando la versatilidad de los túneles de viento. Dichas configuraciones fueron, estando el túnel colocado en la salida del DAREC, probar sin rejillas, con las rejillas

originales de 90° y con las rejillas alisadas. Una vez más, para el ventilador HA60151V4 y alimentado a 12[V], probamos las configuraciones de las rejillas citadas.

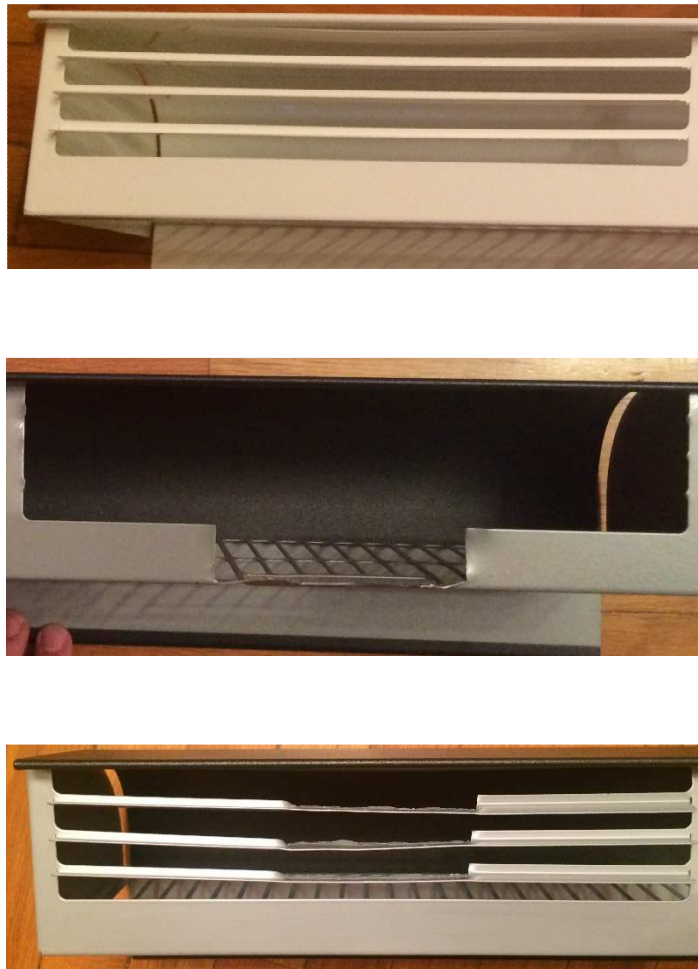


Figura 49. Salida de aire original (arriba), detalle del seccionamiento inferior (medio) y cambio a aletas lisas (abajo).

Como era de esperar obtuvimos el mayor caudal para la configuración sin rejillas, después con rejillas lisas y en último lugar con rejillas de 90°. A raíz de ello y al igual que el seccionamiento de la parte inferior, también **decidimos que en el caso de haber rejillas en el dispositivo final, estas serían lisas ya que oponen menor resistencia.**

Llegado este momento, otra apreciación relevante fue que **el caudal que obteníamos al colocar el ventilador a la salida del DAREC en orientación vertical, era prácticamente el mismo que en flujo abierto.** Esto se debe a que los caudales movidos por los ventiladores, en relación a la geometría de la carcasa, conllevan unas velocidades medias bajas, y a dichas velocidad no se producen pérdidas de presión o en todo caso son prácticamente despreciables. La Figura 50 recoge lo dicho en este párrafo.

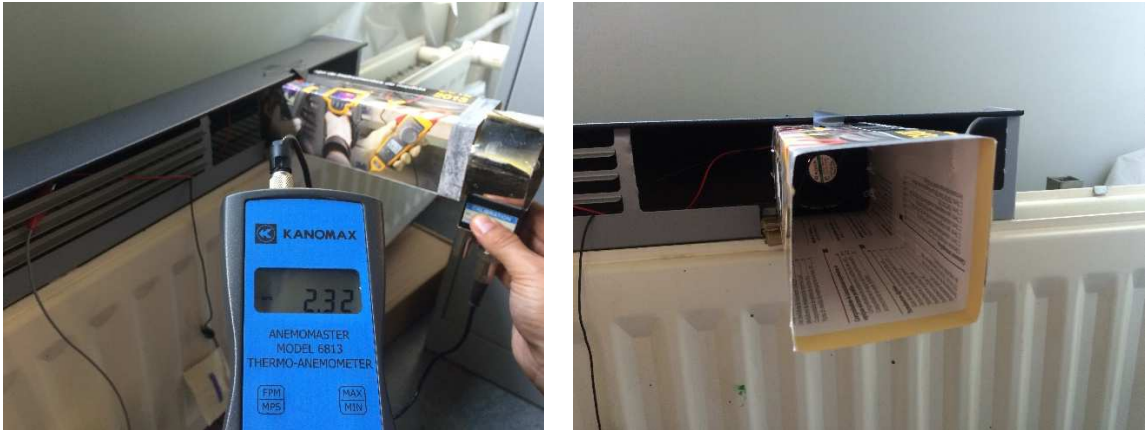


Figura 50. Ventilador de 60 dentro del túnel de viento, a 12[V] colocado en el DAREC y sin rejilla

8.4. Desarrollo de los ensayos

8.4.1. Comparación en horizontal

Para empezar con las pruebas decidimos hacer una medición del caudal que daban ambos dispositivos, es nuestro y el de la competencia, en posición horizontal. En este caso colocamos ambos dispositivos con los mismos ventiladores, los de 60 que además eran lo que traía el *Radfan*, y los alimentamos a 12 [V]. Colocamos el anemómetro a lo largo de la salida, haciendo un barrido de varias secciones y así obtuvimos la velocidad media, procedimiento recogido en la Figura 51.



Figura 51. Medida de caudales en posición horizontal para el Radfan (izq.) y el DAREC (dcha.)

La velocidad media de salida del Radfan era casi el doble a la nuestra, si bien en las áreas la situación era al revés, la nuestra era prácticamente el doble que la suya. Realizando el cálculo de los caudales, el **prototipo del DAREC aportaba un 8,5% más de caudal**, y lo que es más, lo hacía con la carcasa sin mejorar que todavía tenía las aletas a 90° y la parte inferior de la salida tapada.

8.4.2. Cambio de orientación a vertical

A continuación pasamos a colocar los ventiladores en posición vertical o en un ángulo elevado (70°) ya que comprobamos que provocaba mucho menos ruido, y que a igualdad de alimentación de los ventiladores llegaba a aportar hasta un 28,6% más de caudal.

La explicación radica en que en posición horizontal, la aspiración del ventilador interfiere con la rejilla de entrada y ello causa ruido y caídas de presión. Además el aire que sale del ventilador, a una velocidad mayor que a la entrada, es impulsado directamente contra la pared superior del dispositivo, causando turbulencias y reduciendo el aire que sale del dispositivo.

Tras cambiar de posición a vertical comprobamos que efectivamente el caudal era superior, incluso estando las rejillas en 90°, lo cual nos lleva a un nuevo planteamiento, la mejor posición para obtener un caudal mayor es en vertical o lo más próxima posible, si bien al acercar el ventilador a la salida del dispositivo hay que aumentar la atención sobre las medidas de seguridad contra dedos.

Es por ello que la posición inclinada, entorno a 70°, es la que se perfila como mejor de cara al rediseño de la carcasa, al ser un compromiso entre las prestaciones hidráulicas y la protección contra los dedos.

8.4.3. Mediciones de los 3 ventiladores a 3 tensiones

Haciendo un **resumen**, llegado a este punto ya solamente tenemos **3 ventiladores** (ME70151V1, ME70151V2 y HA60151V4), hemos definido que es más interesante la **orientación vertical** que la horizontal, que no habrá obstrucción en la parte inferior de la salida y que **caso de haber rejillas** en el prototipo final, estas **serán planas**. Además ya hemos comprobado que por los bajos caudales que mueven los ventiladores en relación al volumen de la envolvente, el **DAREC** se **comporta prácticamente** como **flujo abierto**.

Repaso teórico V-RPM

Comenzamos recordando, de acuerdo al apartado 6.2, que las curvas de caída de presión frente a caudal son función de la velocidad de giro, y esta depende de la tensión aplicada.

$$\text{Curva } (\Delta P \text{ vs } Q) = f(\text{rpm}) = f(\text{tensión})$$

Como prácticamente la curva del sistema, ya cojamos la de flujo libre o la que resulta de tener rejillas a la salida, es muy plana, resulta que siempre corta a las curvas de los ventiladores cerca del eje horizontal. Como a su vez el caudal es directamente proporcional

a la velocidad podemos decir que si seleccionamos 3 velocidades, la nominal, $2/3$ de la nominal y $1/3$ de la nominal, tendremos aproximadamente el caudal máximo, $2/3$ del caudal máximo y $1/3$ del caudal máximo respectivamente.

Por ello, una vez obtenida la función polinómica de segundo orden que liga la velocidad de giro con la tensión, podremos despejar, para cada ventilador en concreto, a qué tres tensiones debemos alimentar el ventilador para obtener los caudales deseados. Por último recordar que como también tenemos las curvas potencia consumida frente a tensión, para cada caudal podremos saber de antemano que potencia eléctrica estará consumiendo el ventilador.

Flujo libre

Dado que no todas las mediciones pudieron hacerse el mismo día, para descartar posibles variaciones, cada día antes de probar una nueva configuración volvíamos a medir los caudales que daban los ventiladores en flujo libre, medición que se mostró repetible y precisa en el tiempo.

Rejilla lisa y diferentes velocidades; tensiones

Finalmente procedimos a colocar los 3 ventiladores dentro de los túneles de viento y en la salida del DAREC. Alimentamos cada uno de ellos a las 3 tensiones calculadas para cumplir el planteamiento explicado previamente, y registramos los datos obtenidos. Estos datos se encuentran recogidos en el Anexo C, y mientras que toda la información teórica se recoge en la Figura 52.

Para aclarar la información que se presenta en esa gráfica comentar que las curvas azules son para el ventilador más potente, el ME70151V1, las rojas para el otro de 70 [mm], el ME70151V2, y finalmente las verdes son para el ventilador silencioso de 60 [mm], el HA60151V4. Si la curva es continua representa la tensión de alimentación alta, asociada a la velocidad alta (High Speed), si es con guiones representa la velocidad media (MS) y si es una fina línea de punto está asociada a la velocidad más baja (LS).

Respecto al DAREC, las dos curvas naranjas representan las curvas de pérdidas del sistema, si bien la continua es para el sistema con las rejillas lisas en la salida y la curva de puntos es para el sistema sin rejillas, que como ya se ha comentado se comporta como si fuera circuito abierto.

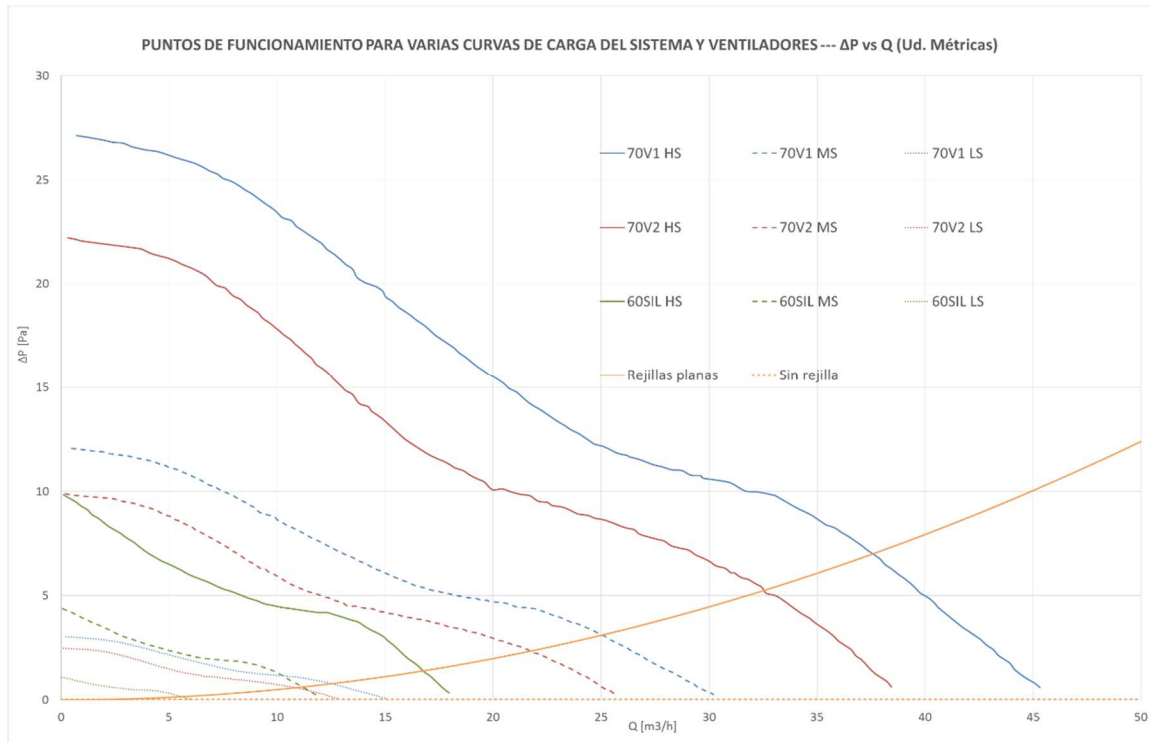


Figura 52. Puntos de funcionamiento del DAREC para varios ventiladores a varias tensiones, con y sin rejillas.

8.5. Comparación resultados teóricos y experimentales

La gráfica anterior se construyó de manera teórica como ya se ha justificado en apartados anteriores salvo la curva del sistema con rejillas planas, que se obtuvo a partir del punto de funcionamiento a 12[V] del ventilador de 60 [mm]. Haciendo caso a esta tabla, los caudales que deberíamos obtener son los que se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Puntos de funcionamiento teóricos y experimentales y diferencias porcentuales

Ventilador	Tensión [V]	Velocidad	CAUDAL MEDIDO [M3/H]	CAUDAL TEÓRICO [M3/H]	DIFERENCIA % [Valor Absoluto]
60 Silenc.	12	HS	16,76	16,50	2%
	7,46	MS	11,33	11,50	1%
	3,84	LS	5,90	5,50	7%
70 V2	12	HS	35,60	32,50	9%
	7,06	MS	23,25	22,00	5%
	3,44	LS	11,38	11,00	3%
70 V1	12	HS	40,20	37,50	7%
	6,82	MS	27,48	25,00	9%
	3	LS	13,76	12,50	9%

Antes de sacar ninguna conclusión hay que hacer referencia al dato que da el fabricante de ventiladores, y donde dice textualmente que la velocidad será “2500 RPM ± 15% a la velocidad nominal”. Estamos **partiendo** por tanto de una **incertidumbre** del **15%** por las limitaciones de los ventiladores, por lo que si nuestras **diferencias** entre los **caudales**

teóricos y medidos se sitúan por **debajo** del **10%** podemos **concluir** que hemos hecho un **buen análisis teórico. Por tanto, este modelo será válido para estimar futuros de funcionamiento del sistema con un margen de error inferior al 10%.**

8.6. Análisis de alternativas

La última cuestión que nos planteamos dentro de estos ensayos, y especialmente a raíz de la nueva orientación en vertical, fue qué resultados obtendríamos si colocáramos las rejillas de protección clásicas en los ventiladores, mostrada en la Figura 53 (izq.).



Figura 53. Ventilador de 60 con protección circular; frontal (izq.) y colocado en el DAREC (dcha.)

Este tipo de protecciones son muy buenas hidráulicamente ya que aun colocando dos de ellas, una delante y otra detrás, las pérdidas de carga son la mitad que con las rejillas lisas. Sin embargo encarecen el dispositivo al añadir más partes, aunque a cambio puede simplificarse el diseño de las entradas y salidas de aire de la envolvente. Por ello se ha considerado como una alternativa que deberá analizarse en sucesivas fases y determinar qué solución es la más óptima. A partir del punto de funcionamiento medido con las protecciones para el ventilador de 60, Figura 53 (dcha.), añadimos una nueva curva del sistema, correspondiente precisamente a la configuración de sin rejillas pero con protecciones circulares, y que se coloca entre las dos curvas de carga que teníamos antes:

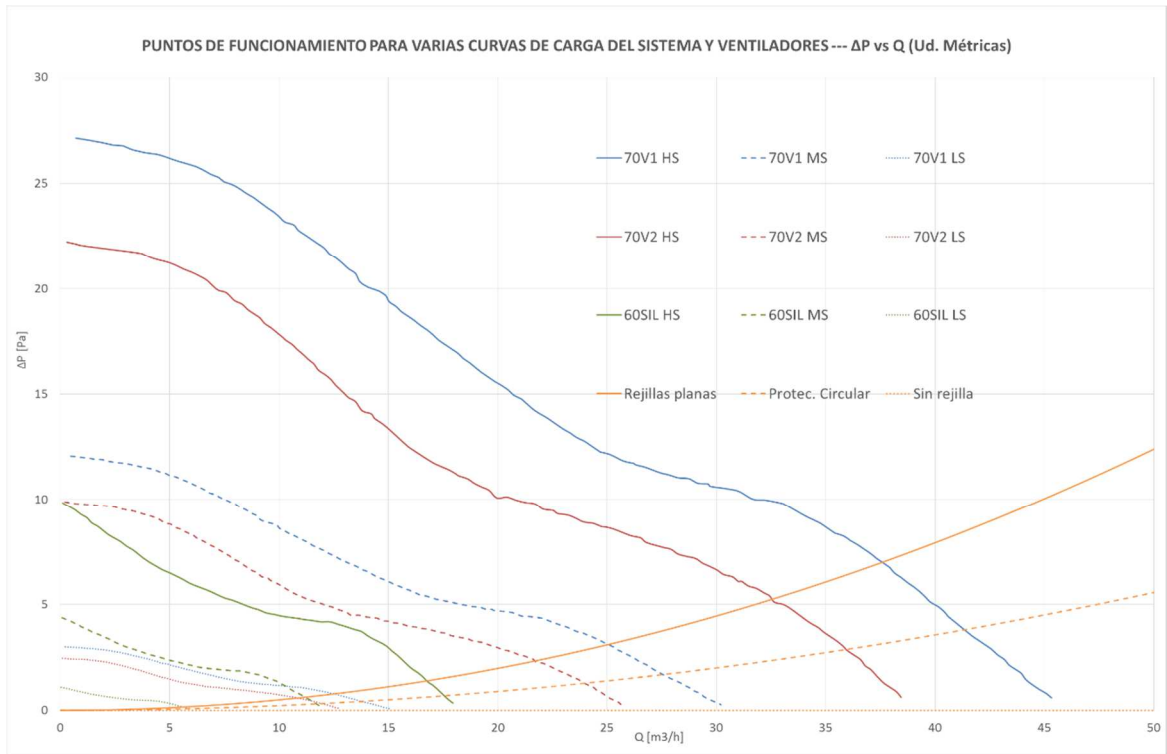


Figura 54. Puntos de funcionamiento del DAREC, añadiendo la curva del sistema con las protecciones circulares

8.7. Conclusiones

Esta serie de ensayos nos han servido para contrastar el modelo teórico, detectar puntos débiles que mejorar tanto para la envolvente como para los ventiladores, plantear nuevas alternativas y recordar que el diseño es algo dinámico, y que un descubrimiento en cualquier fase puede conllevar una modificación incluso de aspectos que se consideraban ya cerrados, siempre que la mejora aportada lo merezca.

9. ENVOLVENTE II

9.1. Conclusiones extraídas a raíz de los ensayos

A raíz de los ensayos realizados planteamos una serie de mejoras sobre el segundo diseño de la envolvente, enmarcadas una vez más dentro de los grupos de requisitos:

- **Térmicos**

- Se considera que la forma exterior es lo suficientemente buena en cuanto a la dirección del flujo como para no realizar cambios, solamente ligeros retoques derivados de otras especificaciones.

- **Mecánicos**

- Se vuelve a modificar la parte posterior, reduciendo la caída de la parte trasera que está en contacto con el radiador.
- Mejoras en los perfiles de cara a facilitar la producción y el montaje, que redunden en un producto más seguro y rígido.

- **De seguridad**

- Eliminación de aquellos bordes que todavía quedaban tras el segundo diseño.
- Retoques en la entrada de aire para evitar el contacto de los dedos con las aspas del ventilador.

- **Hidráulicos**

- Modificación del soporte para el ventilador, retrasándolo de manera que el flujo de aire saliente no choque con el techo de la envolvente sino que tenga una proyección libre hacia el exterior.
- Respecto a la salida de aire de la carcasa, supresión de la parte inferior que obstaculizaba el flujo, como ya se explicó durante el desarrollo de los ensayos.
- Por la misma razón, modificación de las rejillas frontales para que no sean de 90° en la salida del ventilador. Sin embargo esto supone un compromiso entre la caída de presión y la rigidez mecánica, ya que la eliminación de material supone una merma de dicha característica.

- **Estéticos**

- Definir finalmente las combinaciones de colores tras haber hecho un análisis sobre los 3 modelos del segundo diseño.
- Añadir inscripción sobre eficiencia energética e inclusión del logo.

- **Económicos**

- Gracias a una relación de *feedback* mutua establecida con el taller mecánico que podría actuar como fabricante, se establecieron las modificaciones incluidas en el punto “mecánicos”, que aseguran un proceso de producción de menos coste.

9.2. Tercer diseño

El resultado de mejorar el segundo diseño con las conclusiones comentadas, fue el tercer diseño que se muestra a continuación:



Figura 55. Tercer diseño de la envolvente y prototipo completo DAREC; varias vistas

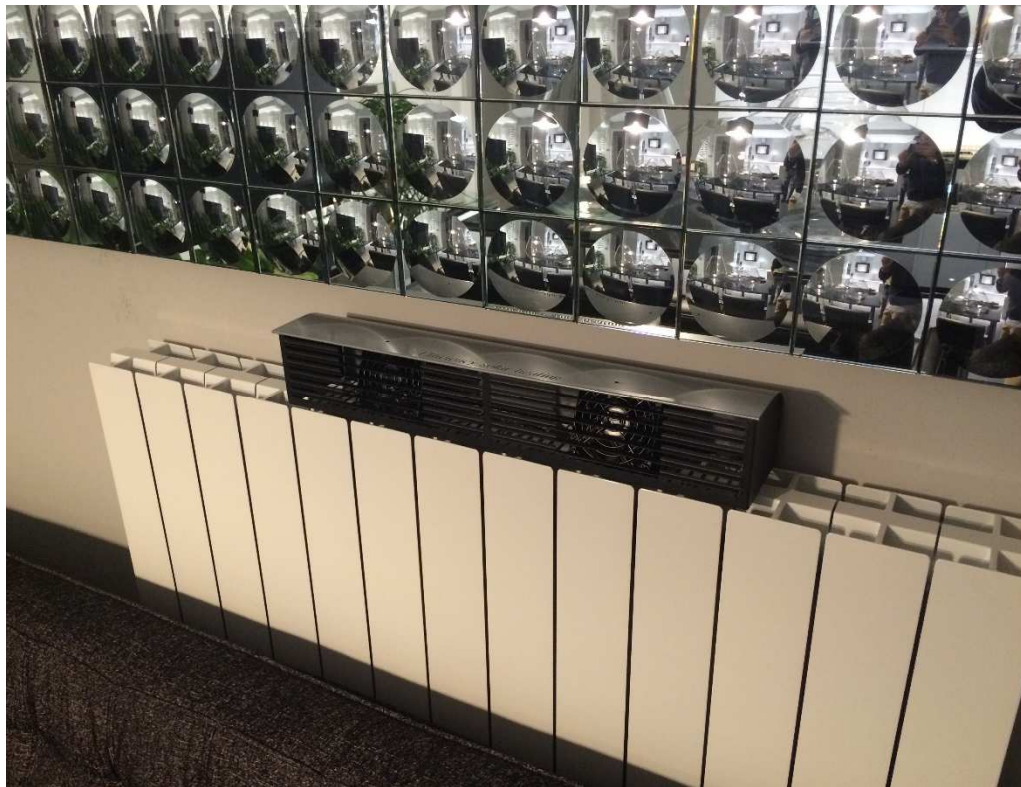


Figura 56. Tercer diseño del DAREC, construido y en un entorno de funcionamiento real

Como se puede observar, el desarrollo del DAREC es un proceso gradual, secuencial y coherente, donde los cambios se introducen de manera justificada y atendiendo a criterios funcionales, estéticos, de seguridad o economía.

10. VENTILADORES II

10.1. Conclusiones extraídas a raíz de los ensayos

Al igual que para la envolvente, los ensayos sobre caudal nos hicieron darnos cuenta de una serie de conclusiones de cara a realizar la última selección de ventiladores, que emplearíamos en las pruebas térmicas finales.

Tras darnos cuenta de que las curvas de pérdida del sistema son muy planas, y que consecuentemente cortan a las curvas ΔP vs Q cerca del eje horizontal, los ventiladores quedan caracterizados, además de por las propias dimensiones geométricas, en función de 3 prestaciones:

- **Ruido:** Cuanto menos mejor, es un requisito clave de cara al funcionamiento final del dispositivo.
- **Caudal:** Mejor cuanto mayor sea mayor pero sin llegar a resultar excesivo, ya que el coeficiente de convección interior no aumenta igual que la velocidad media. Podría incluso llegar a darse que un flujo de aire elevado no tuviera tiempo de calentarse y realmente estuviéramos moviendo aire frío.
- **Consumo:** Cuanto menor sea la potencia consumida mejor será de cara a la autonomía del dispositivo. Sin embargo el consumo es inversamente proporcional a la potencia, por lo que nuevamente habrá que buscar un compromiso.

10.2. Selección final de ventiladores

Precisamente por el requisito del ruido descartamos el ventilador de 80 [mm], modelo ME80151V1, debido a que a su tensión nominal el ruido producido no era aceptable. El fabricante indica un valor de 34,7 [dB], y podemos asegurar, gracias a haberlo probado, que este volumen acústico es excesivo.

Precisamente en el punto contrario se encuentra el ventilador HA60151V4, tan solamente con 14,5 [dB] trabajando en tensión nominal, lo cual nos llevó a buscar más información sobre el mismo. Las dos primeras letras, HA, corresponden a la serie del modelo, y comprobamos que dicha serie venía acuñada por Sunon como serie de ventiladores súper silenciosos. Dentro del catálogo encontramos otro ventilador de 60 [mm] que aunque era algo más grueso ya que subía de 15 a 25 [mm], aportaba un 27% más de caudal y su valor de ruido bajaba hasta 13,8 [dB].

En último lugar incorporamos a las alternativas barajadas otro ventilador de la serie silenciosa, en este caso de 80 [mm], con el objeto de tener uno que pudiera darnos mucho más caudal. A tensión nominal mueve más del doble de caudal que el de 60 original, a cambio de que su ruido sube hasta los 22,1 [dB], estando aun así por debajo del ruido que generan los dos ventiladores de 70 [mm].

Resumiendo, contamos con 5 ventiladores en este momento del proceso de diseño, 3 pertenecientes a la serie silenciosa y los otros dos de 70 [mm]. Recogemos la información en la siguiente tabla.

Tabla 7. Valores de ruido, caudal y consumo para los 5 ventiladores finales

	Ruido	Caudal	Consumo
HA60151V4	14,5	18,3	0,6
HA60251V4	13,8	23,4	0,7
HA80251V4	22,1	40,3	0,8
ME70151V2	26,5	18,3	0,89
ME70151V1	31,5	23,4	1,36

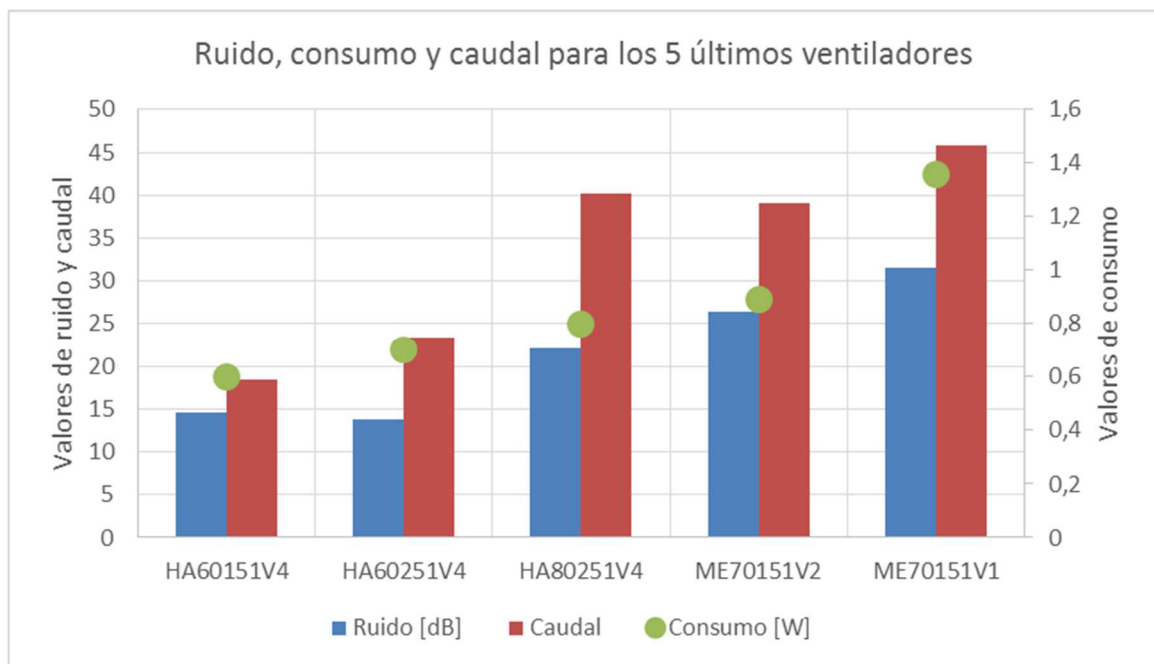


Figura 57. Comparación entre los 5 ventiladores finales de las 3 características principales

Comenzaremos por comparar los dos ventiladores de 70 [mm] con el de 80 [mm]. Podemos ver como los dos de 70 tienen un caudal relativamente similar al de 80, pero su ruido es un 20% y un 43% superior al de 80. Además el consumo sube también en ambos, y los de 70 consumen un 11% y un 70% más que el de 80. En resumen, similar caudal pero más ruido y más consumo.

Desde que realizamos los ensayos de caudal volvimos a poner en valor la importancia de que los ventiladores tengas bajo nivel de ruido. En su momento solamente teníamos, de la serie silenciosa, el HA60151V4 por lo que no podíamos desechar el resto ya que el nivel que imponía este ventilador a nivel de ruido era demasiado severo. Sin embargo y tras adquirir el ventilador silencioso de 80, modelo HA80251V4, vimos que aunque su valor de ruido fuese superior al de 60, en este caso sí que era aceptable. **Por ello descartamos los dos ventiladores de 70 [mm]**, modelos ME70151V1 y ME70151V2.

Volviendo a la Figura 57 podemos observar como los dos modelos de 60 de la serie silenciosa compiten entre sí. La comparación, extraíble de la Tabla 7, muestra que el ventilador más grueso, modelo HA60251V4, tiene un 5% menos de ruido, un 28% más de caudal y un 17% más de consumo que el fino, modelo HA60151V4. **Realizando una ponderación de estos tres datos decidimos descartar el modelo HA60151V4.**

Por tanto y llegado este punto ya tenemos los dos ventiladores que emplearemos en los prototipos, y que son el HA60251V4 y el HA80251V4. Ambos han resultado como los mejores dentro de un proceso de selección razonado, coherente y justificado. Además y por sus diversas características podrían servir para realizar dos variantes diferentes del DAREC, una enfocada a mayores prestaciones y otra a mayor silencio. Finalmente mostramos cuáles serían los puntos de funcionamiento del sistema con estos nuevos ventiladores:

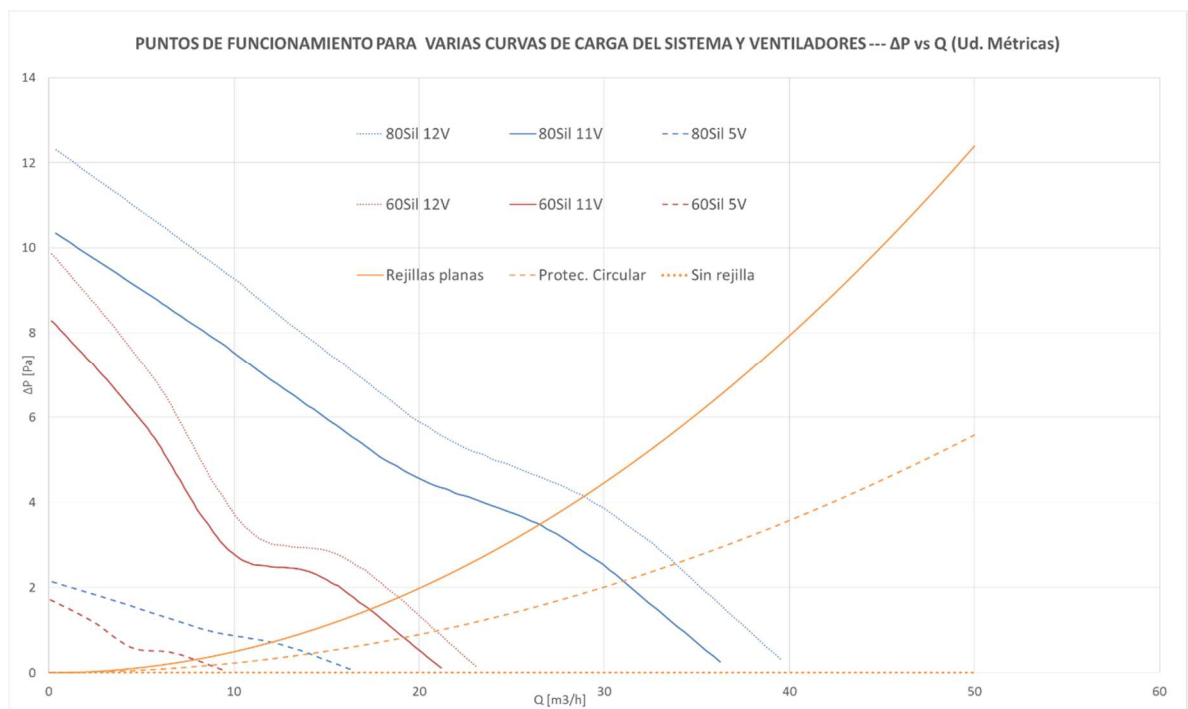


Figura 58. Puntos de funcionamiento del DAREC, con las 3 curvas del sistema y los 2 ventiladores silenciosos elegidos

11. ELECTRÓNICA

Llegado este punto del trabajo, con la envolvente y los ventiladores definidos, es necesario introducir la parte de la electrónica. Trataremos sobre los requisitos que hay que satisfacer a nivel de alimentación eléctrica, así como sobre las estructuras de control implementadas. Dividimos la solución electrónica en alternativas, según la fuente que se emplee como alimentación.

11.1. Alimentación fotovoltaica

Esta parte se subcontrató teniendo en cuenta que debían de cumplirse una serie de requisitos y que los componentes con los que había que compatibilizar (envolvente y ventiladores) eran los ya definidos.

11.1.1. Requisitos y características

- Alimentación del ventilador a una tensión alta, denominada HV (*High Voltage*)
- Alimentación del ventilador a una tensión baja, denominada LV (*Low Voltage*)
- Algoritmo de control que imponga la tensión real, denominada RV (*Real Voltage*), y que variará en función del SOC (*State Of Charge*) de la batería y la temperatura del radiador.
- Inclusión de un interruptor termoelectrónico que active los ventiladores únicamente cuando el radiador esté funcionando.
- Elección de la batería en función del coste de la misma, autonomía deseada y consumo de los diferentes ventiladores.
- Emplear un pequeño panel fotovoltaico que cargue la batería, pudiendo emplearse esta para alimentar los ventiladores o un dispositivo externo mediante una salida microusb.

11.1.2. Solución obtenida

Se estudió y analizó como primera opción la posibilidad de incorporar un interruptor térmico que regule la activación del sistema de ventilación, alimentado a través del cargador solar, en función de la temperatura del radiador. Este dispositivo resultó ser muy caro, oscilando su coste entre 4'5€ y 9€ la unidad en función de la cantidad a comprar y el distribuidor seleccionado. Además, era poco flexible y más complejo desde el punto de vista del diseño de las estrategias que se pretendían diseñar y desarrollar para la activación automática del sistema de ventilación. En la siguiente figura se muestra uno de los interruptores térmicos comprados y probados para este primer análisis.



Figura 59. Interruptor térmico normalmente abierto en función de la temperatura aplicada en su extremo.

Como alternativa se optó por sustituir este interruptor térmico por un termopar común, cuyo coste es sustancialmente menor. La señal de este termopar se distribuye en paralelo con los cables de alimentación de los ventiladores, desde la envolvente del dispositivo hasta llegar al cargador solar portátil. Dentro del microprocesador del cargador solar, se han desarrollado y programado tres estrategias, en función de dos grados de libertad: el estado de carga de la batería (SOC) y la temperatura del radiador (Tr).

En primer lugar hay que diferenciar dos casos, que el cargador solar se encuentre encendido (ON) o apagado (OFF), gestionado esto desde un botón situado en el propio cargador. En el caso de que el cargador solar esté en ON, se pasa al siguiente nivel, y es ver el estado del radiador, si está encendido o apagado. Si el radiador está apagado, se considera así cuando T_r es inferior a 35°C , y el cargador se encuentra en ON, los ventiladores no funcionarán. Aclarar que el valor de temperatura de consigna establecida, 35°C por ejemplo, es modificable. En el caso de que la T_r sea igual o superior a 35°C , aparecen una de las tres estrategias: Low, High o Auto.

- **Estrategia “Low”:** Consiste en aplicar a los ventiladores la tensión mínima de alimentación con el fin de que consuman lo mínimo posible, minimizando el impacto del ruido y consumo de la batería. Está diseñada para dejarla en funcionamiento durante toda la noche.
- **Estrategia “High”:** Consiste en aplicar a los ventiladores la tensión máxima de alimentación con el fin de que aceleren lo antes posible la transferencia de calor por convección del radiador con el ambiente. Aquí se reduce el tiempo de alcanzar la temperatura de consigna pero con un mayor ruido, caudal y consumo. Está diseñada sobre todo para el momento de inicio de activación.
- **Estrategia “Auto”:** Consiste en aplicar a los ventiladores diferentes tensiones, con un rango que va desde la tensión mínima (Low) hasta la tensión máxima (High), en

función del estado de carga de la batería. Si el SOC de la batería está por encima del 50%, aplicará una tensión proporcional en función de la temperatura del radiador. En cambio, si el SOC de la batería está por debajo del 50%, se pondrá automáticamente en la estrategia Low, priorizando el consumo independientemente de la T_r del radiador.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del control del sistema de ventilación, llevando a cabo tanto una regulación automática como una gestión del caudal de los ventiladores.

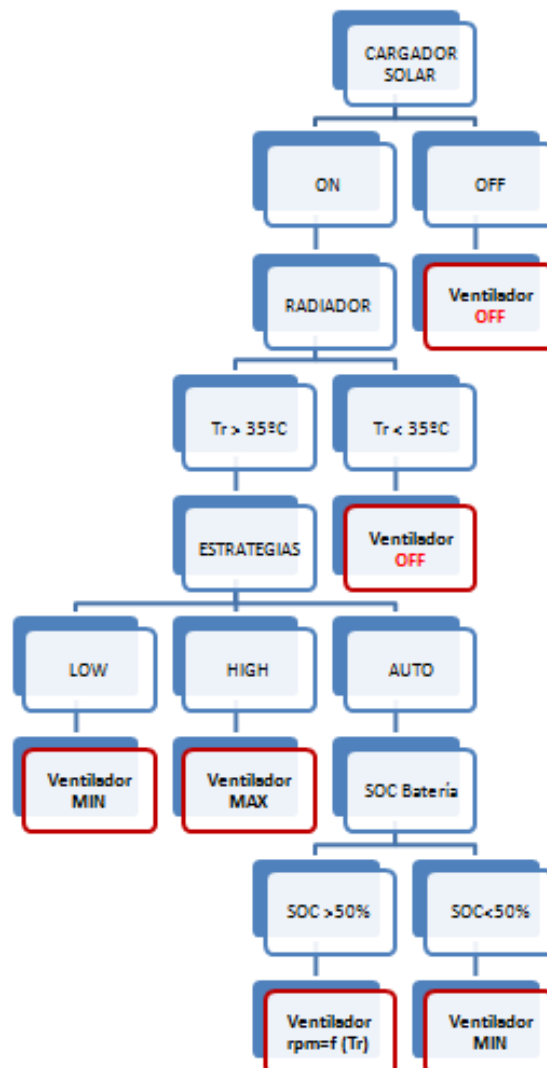


Figura 60. Diagrama de flujo del control del sistema de ventilación

Hasta aquí se ha respondido a los 4 primeros requisitos, y a continuación se explicará la selección de panel y batería.

11.1.3. Diseño, dimensionado y elección del sistema de generación eléctrica renovable y almacenamiento.

Generación eléctrica renovable

Se llevó a cabo el diseño del sistema de generación renovable basado en una placa fotovoltaica que carga una batería, siendo las tensiones de diseño las exigidas por el sistema de ventilación. Además, este sistema debe tener protecciones y estabilizadores de tensión con el fin de alargar la vida útil del sistema de almacenamiento. También, debe de ser un sistema de generación renovable portátil capaz de captar la energía solar procedente de cualquier ventana o espacio abierto.

La solución final es un cargador solar que está compuesto por una placa solar fotovoltaica, una batería de ion litio, una tarjeta electrónica encargada de controlar el flujo bidireccional de energía (la carga y descarga) de la batería a través de la placa solar fotovoltaica de forma óptima, y una envolvente robusta que proteja todo el sistema, con estética similar al dispositivo, y de fácil colocación en ventanas o lugares con suficiente irradiancia solar.

A la hora de elegir el módulo fotovoltaico, se ha tenido en cuenta su tamaño, coste y tensión de circuito abierto. Se realizó un análisis de mercado de los módulos fotovoltaicos existentes y la alternativa elegida fue un módulo solar fotovoltaico policristalino de tamaño 99mm x 69mm, con una tensión de 5V, una potencia de 1W y muy económico, de alrededor de 2'3€/unidad en función de la cantidad de pedido.

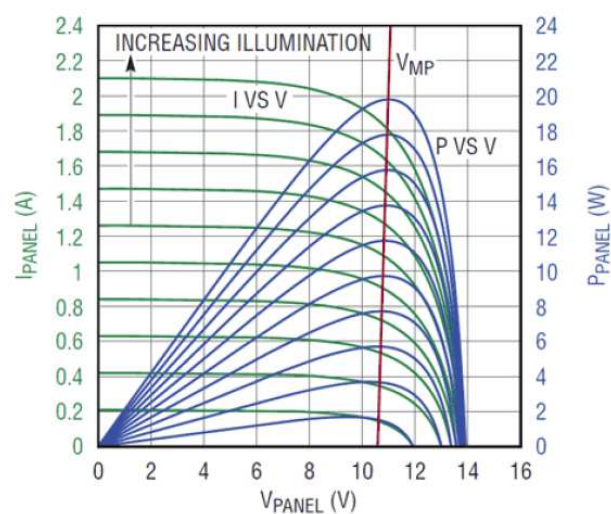


Figura 61. Curvas I-V y P-V de un módulo solar fotovoltaico.

La Figura 61 muestra las curvas características que definen a un módulo fotovoltaico, curvas I-V (líneas verdes), traducándose a efectos prácticos en curvas P-V (líneas azules, multiplicando V e I), donde conociendo la tensión a la que trabaja el módulo es posible saber cuál es la potencia disponible del módulo.

MPPT: Seguimiento del punto de máxima potencia

Como puede deducirse de las curvas de un panel, existen unos puntos más interesantes de trabajo que otros, aquellos en lo que se obtenga la máxima potencia. Además existen dos variables a tener en cuenta a la hora de conocer el comportamiento de las curvas P-V: la irradiancia (G) y la Temperatura del módulo (T_m).

A medida que la G disminuye (menos irradiación solar), el punto de máxima potencia de las curvas P-V disminuye casi proporcionalmente, y viceversa en caso de aumentar. Sin embargo el comportamiento con T_m no es lineal sino que su efecto se amortigua mucho más. Cuando aumenta, la tensión de circuito abierto (punto de V_{max} y $P=0$ de la curva P-V), se desplaza hacia la izquierda, es decir, disminuye; y viceversa.

Por tanto, se observa cómo la tensión en el punto de máxima potencia (V_{MP}), que será la tensión a la cual el módulo fotovoltaico aporta mayor potencia, varía en función de G y T_m . Dicho de otro modo, a medida que aparecen cambios de luz, la tensión y la corriente del módulo fotovoltaico varían y, por tanto, deben ser seguidas cuidadosamente para obtener siempre la máxima potencia disponible.

En general, la forma en que los controladores realizan el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es a través de un convertidor DC / DC no lineal, donde en cada momento se conoce el punto MPPT. Por ejemplo, si se quiere cargar una batería de 6V y se tiene un módulo de 12V, similar al de la figura, la tensión oscilará entre 9V y 14V dependiendo de G y T_m . El convertidor reductor hará todo lo posible para mantener el consumo de corriente que demanda la batería, por lo que la potencia total disponible en la salida se maximiza. Un buen seguimiento del MPPT llega a aumentar la eficiencia, en estos tamaños de módulos fotovoltaicos hasta un 30%, de ahí la importancia de un buen control.

Batería

En tercer lugar, se han analizado diferentes tipologías de baterías de ion litio, ya que a día de hoy son las que mejor rendimiento y eficiencia tienen, además de un buen ratio densidad de energía - volumen. Considerando baterías estándar, con tensiones comunes como 3.7 [V] (empleada por la mayoría de los dispositivos móviles) el precio resulta realmente competitivo. El precio y tamaño aumentará en función de la capacidad que se

elija. Tras varios análisis, se ha elegido una batería recargable Li-Polymer de 3'7 [V] y 2800 mAh, capaz de dotar al sistema de ventilación una autonomía a mínima carga (30mA con la estrategia LOW) de casi 3'8días, mientras que a plena carga (65mA con la estrategia HIGH) la autonomía sería de alrededor de 1'8días. El tamaño elegido de esta batería es de 95mm x 82mm x 4mm, muy similar al del módulo fotovoltaico por lo que harán un buen encaje dentro del cargador.



Figura 62. Batería Li-Polymer 3'7V y 2800mAh.

Cabe destacar que aunque la batería es un elemento fundamental en cuanto a la dotación de autonomía del sistema de ventilación, existen multitud de marcas de baterías con características similares en el mercado en función de la aplicación y características que se deseen darle al dispositivo. Por tanto, se podrán seleccionar diferentes capacidades, tamaños, formas, costes, etc. Además, si se quiere reducir su coste, se pueden utilizar baterías de segunda vida de teléfonos móviles adaptando el conector a la entrada de la tarjeta electrónica.

Tarjeta electrónica de control

En cuarto lugar, pero no por ello menos importante, se está desarrollando el elemento más crítico del cargador solar portátil, la tarjeta electrónica, encargada de extraer la máxima potencia en cada momento del módulo fotovoltaico y gestionar de manera eficiente la energía de la batería, tanto en la carga como en la descarga, para alimentar al sistema de ventilación.

Esta tarjeta electrónica se está diseñando teniendo en cuenta la vida útil de la batería, su temperatura máxima durante la carga, y los ciclos de carga y descarga lentos e

incorrectos que disminuyen la vida total de la batería. A su vez, debe ser capaz de maximizar la potencia del módulo fotovoltaico, extrayendo en cada momento la máxima potencia en función de la tensión a la cual se encuentra por las condiciones meteorológicas (G , T_m). En la Figura 63 se muestra el esquema principal del desarrollo de la tarjeta electrónica con todas sus partes.

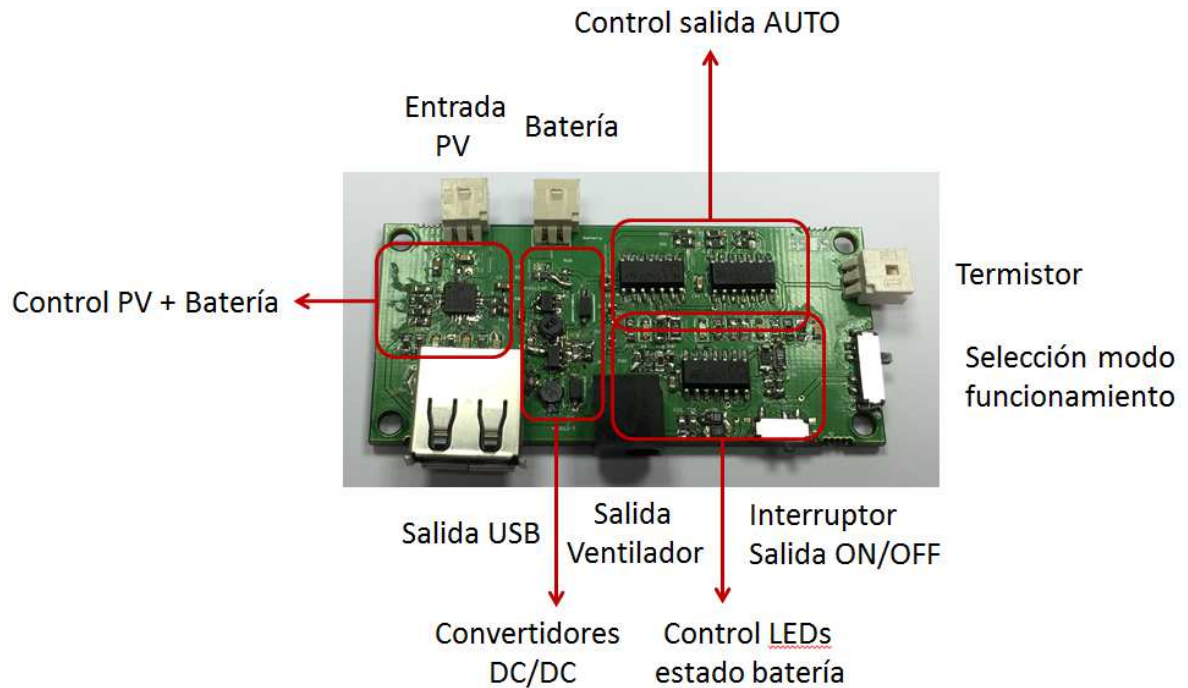


Figura 63. Esquema principal con los componentes más importantes de la tarjeta electrónica.

Como se puede observar en la figura, el circuito cuenta con las **siguientes entradas/salidas** agrupadas por zonas:

Entrada fotovoltaica: Es un conector sencillo y económico que está preparado para conectar al módulo fotovoltaico elegido. En este prototipo de PCB (*Printed Circuit Board*) se ha puesto como limitación que el módulo fotovoltaico no pueda superar una tensión de 6V, abaratando así los componentes internos.

Batería: Es el mismo conector que para la entrada fotovoltaica para estandarizar elementos y reducir costes, que está preparado para conectar a una batería de 3.7 [V].

Salida USB: La tarjeta electrónica está dotada de una salida USB estándar para alimentar dispositivos a 5V/500 mA. Esta salida se ha pensado y diseñado para poder utilizar el cargador solar portátil en otros ámbitos a parte del sistema de ventilación, dotándolo de mayor utilidad por ejemplo en temporadas de verano donde no se use el dispositivo.

Salida ventilador: Es un conector para la conexión de los ventiladores, el cual está dotado de diferentes tensiones para poder llevar a cabo la estrategia seleccionada.

Termistor: Es también el mismo conector que para el módulo fotovoltaico y las baterías, para poder conectar el termistor y transmitir la señal para medir la temperatura del radiador y poder variar así la tensión de los ventiladores con la temperatura del radiador.

Además, se le ha dotado a la tarjeta electrónica con **dos tipos de selectores:**

Interruptor Salida ON/OFF: Es el encargado de apagar o encender tanto la salida USB como la del ventilador.

Interruptor estrategias: Es el encargado de seleccionar el modo de funcionamiento o estrategia que se comentó anteriormente

- **LOW:** Modo bajo consumo. Es la mínima tensión que se les aporta a los ventiladores.
- **HIGH:** Modo alto consumo. Es la máxima tensión que se les aporta a los ventiladores, entorno a los 10V.
- **AUTO:** Modo automático. En función de la temperatura del radiador (T_r) con el termistor y del estado de la batería (SOC), se va variando la salida de los ventiladores desde alrededor de 5V hasta 9V. A mayor temperatura, mayor tensión, y únicamente se activa esta opción cuando el estado de carga de la batería es superior al 50%.

Por último explicar que la tarjeta electrónica cuenta con **cuatro circuitos independientes bien diferenciados:**

Circuito de Control PV+Batería. Es la parte de la tarjeta electrónica donde se encuentra el circuito integrado capaz de gestionar de manera óptima la carga de la batería a través de la máxima potencia extraída del módulo fotovoltaico. Este circuito incluye tres LEDs que permiten conocer el estado del sistema e informar si existe irradiación suficiente para generar electricidad.

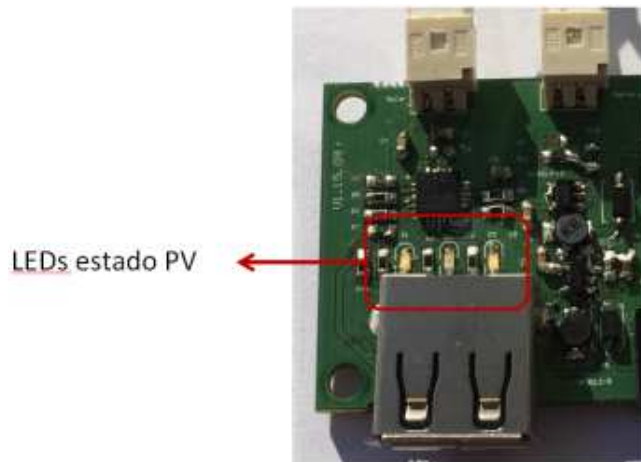


Figura 64. Circuito e indicadores LED para conocer el estado del módulo fotovoltaico.

Circuito de los convertidores DC/DC: Este circuito está compuesto principalmente por varios elevadores que son los encargados de estabilizar y obtener las tensiones de trabajo de salida, tanto para la salida USB como para la salida de los ventiladores en el rango de 5V a 10V.

Circuito de control salida AUTO: Es un circuito compuesto por comparadores y amplificadores para poder controlar la tensión de salida en función del estado de la batería y de su temperatura.

Circuito de control LEDs estado batería: Es un circuito compuesto por comparadores para el control de los LEDs de estado de la batería, mostrando su SOC aproximado en función de su tensión (25%, 50%, 75% y 100%).

Actualmente se está desarrollando el prototipo de la PCB así como el montaje de componentes, llevando a cabo un procedimiento de pruebas y ensayos, comprobando el correcto funcionamiento de todos los elementos y especialmente de las partes más críticas de la tarjeta electrónica. Una vez queden bien definidos todos estos elementos, se llevará a cabo el diseño y desarrollo de la carcasa mecánica del cargador solar portátil.

11.2. Alimentación termoeléctrica

11.2.1. Breve introducción a la termoelectricidad

Como alternativa a la alimentación fotovoltaica se planteó la posibilidad de una alimentación termoeléctrica. Teniendo como fundamento físico los cuatro efectos termoeléctricos; Peltier, Seebeck, Thomson y Joule, se han inventado y construido los llamados módulos termoeléctricos o generadores termoeléctricos. En el mercado existe

cada vez una mayor variedad de ellos tanto en tamaño, como en rendimiento, materiales, temperaturas que soportan, aplicaciones y precio.

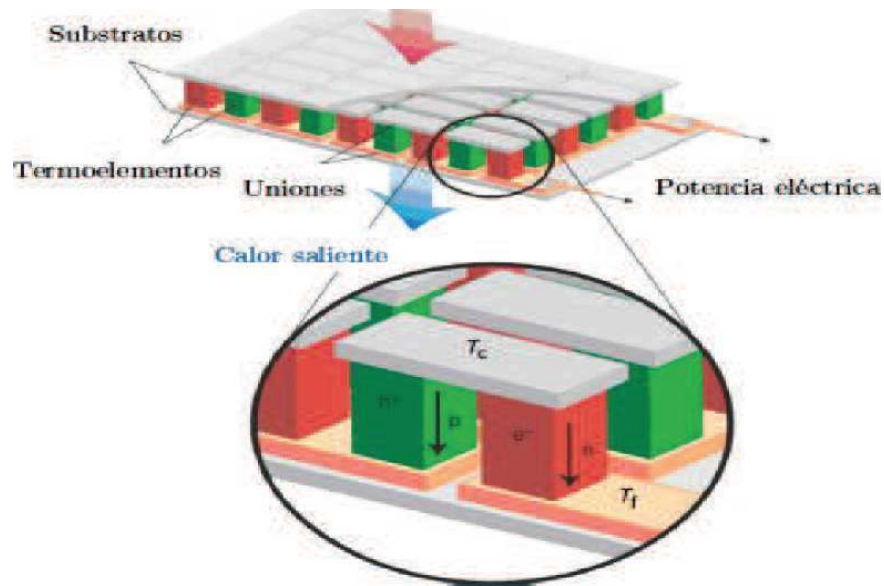


Figura 65. Esquema de funcionamiento de un generador termoeléctrico

La Figura 65 muestra una imagen teórica de un módulo termoeléctrico (en adelante MTE) y explica su funcionamiento. Una de ellas, en este caso la de arriba, es la cara caliente y la otra es la cara fría. En función de la diferencia de temperatura **real** que exista entre ambas caras aparecerá una diferencia de tensión o fuerza electromotriz asociada precisamente a dicho salto térmico. Además de eso y para un mismo salto térmico, en función de la potencia calorífica que pase a través del MTE, éste será capaz de dar una determinada potencia eléctrica. Cuando mayor sea el flujo de calor mayor será la potencia eléctrica disponible.

11.2.2. Importancia de la resistencia externa o de carga

Como tercera variable hay que añadir la resistencia eléctrica interna del módulo y la repercusión que tiene sobre el circuito y sobre la elección de la resistencia eléctrica externa. A continuación se explica la importancia de esta tercera variable, partiendo del esquema eléctrico de un MTE.

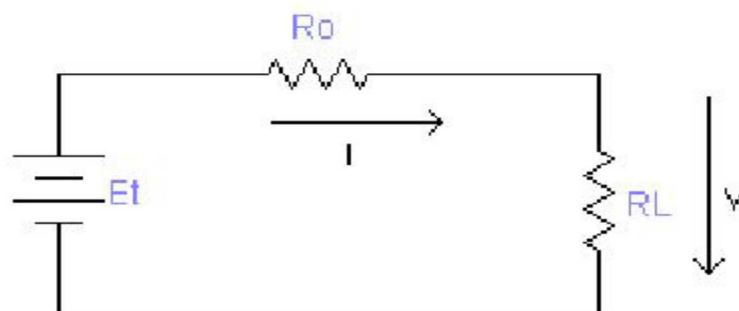


Figura 66. Circuito eléctrico equivalente de un módulo termoeléctrico

Teniendo las variables el siguiente significado:

- V = Diferencia de potencial en la resistencia de carga R_L
- R_0 = Resistencia eléctrica propia del elemento termoeléctrico
- I = Corriente eléctrica que circula por el circuito
- R_L = Resistencia de carga, externa e impuesta por el usuario

Un MTE, tal y como refleja la Figura 66, se compone por una fuente de tensión en serie con una resistencia interna. En los terminales de salida se conecta una resistencia eléctrica y con ello se cierra el circuito. A pesar de ser algo muy básico a nivel eléctrico, el desconocimiento de este esquema puede suponer un despropósito en una instalación con MTE por el siguiente razonamiento:

$$P_{util} = I^2 * R_L = \left(\frac{V}{R_L + R_0} \right)^2 * R_L$$

$$(P_{util})' = \frac{V^2}{(R_L + R_0)^2} - \frac{2 * V^2 * R_L}{(R_L + R_0)^3}$$

$$(P_{util})' = 0 \rightarrow \frac{V^2}{(R_L + R_0)^2} - \frac{2 * V^2 * R_L}{(R_L + R_0)^3} = 0 \rightarrow 1 - \frac{2 * R_L}{(R_L + R_0)} = 0 \rightarrow R_L = R_0$$

$$\text{Y por tanto } P_{util_m\acute{a}xima} = I^2 * R_L = I^2 * R_0 = \left(\frac{V}{2 * R_0} \right)^2 * R_0 = \frac{V^2}{4 * R_0}$$

De tal manera que si se conecta una resistencia de carga igual o lo más cercana posible a la resistencia interna del módulo, estaremos extrayendo la máxima potencia. Una mala elección de esta resistencia supone desaprovechar la potencia que genera el módulo, convirtiendo además la potencia no aprovechada en calor que se produce dentro del MTE y que tiende a reducir el rendimiento. La siguiente figura muestra un ejemplo de qué potencia se obtiene en una instalación TME cuya resistencia interna es de 10 [Ω].

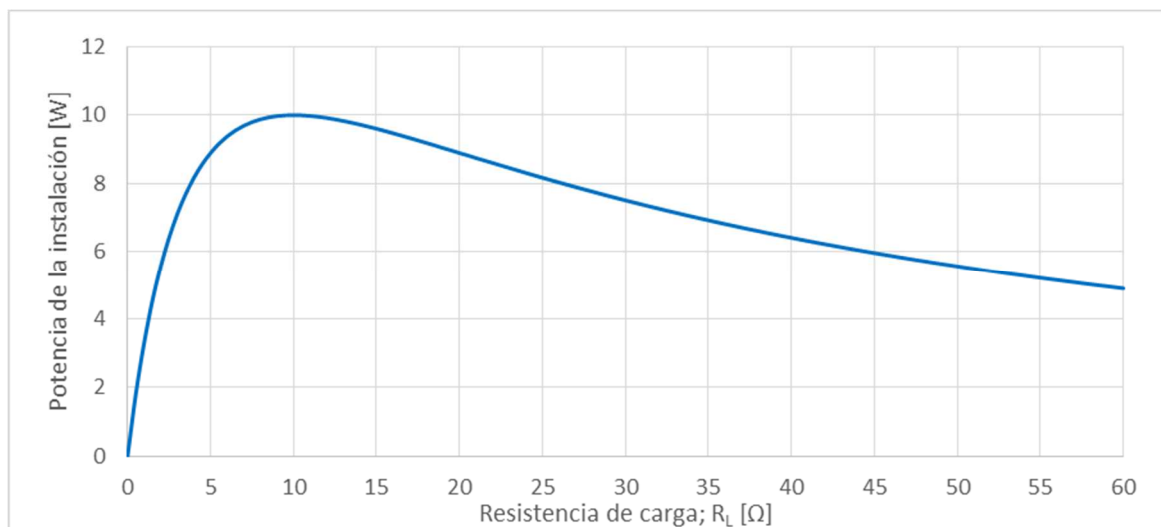


Figura 67. Potencia extraída de una instalación de MTE en función de la resistencia externa de carga

Una vez explicado este concepto teórico, cabe añadir que para los ventiladores seleccionados; HA60251V4 y HA80251V4, las resistencias son 200 y 181 [Ω] respectivamente.

11.2.3. Dimensionamiento de la instalación termoeléctrica

Dado que pretendemos aprovechar como foco caliente la propia temperatura del radiador para la alimentación del sistema de ventilación, deberemos estudiar cuales son los requisitos que debe satisfacer esta fuente de alimentación:

- Potencia mínima de los ventiladores = $0,3 \text{ W} * 2 = 0,6 \text{ W}$
- Tensión mínima de los ventiladores = 3,5 V

Una vez conocidas las necesidades el procedimiento para dimensionar se basa en las hojas de características de los fabricantes. Haremos un ejemplo con las gráficas incluidas en las hojas técnicas del módulo SP-254-1.0-1.3, para una temperatura real en la cara caliente de 50°C.

Como ya se ha explicado, para hallar el punto de trabajo de un MTE debemos conocer tanto la temperatura de las caras caliente y fría, como el calor que atraviesa el módulo. Suponiendo que en la cara caliente del módulo se consiguiese la temperatura indicada en las hojas, 50°C, que existiera un salto térmico real a la cara fría de 10°C, y que por cada módulo pasara un flujo de calor de 14[W], sabríamos que el módulo tiene un tensión a circuito abierto de 6'6 [V], tal y como indica la Figura 68.

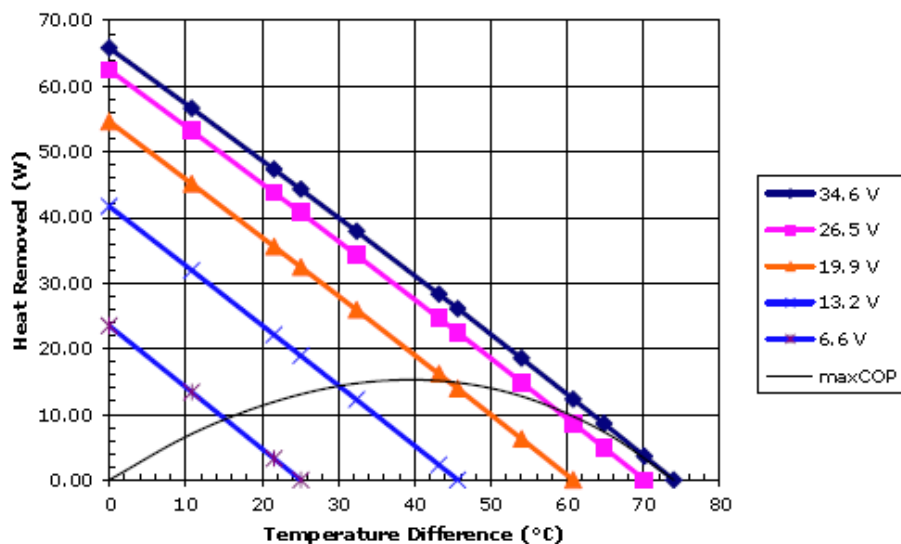


Figura 68. Gráfica que relaciona la tensión de trabajo de un MTE con el calor que lo atraviesa y el salto térmico real

El siguiente paso es, con los datos de salto térmico y tensión obtenidas hasta el momento, remitirse a las gráficas del fabricante para que informe de la corriente o potencia,

producto de la tensión por la corriente, máxima que puede extraerse. En nuestro caso y atendiendo a la Figura 69, la corriente sería de 0'65 [A] lo que nos daría una potencia máxima de 4,29 [W]. Esta potencia máxima la da el fabricante suponiendo que está instalada, como ya se ha dicho, una resistencia de carga externa del mismo valor que la resistencia interna.

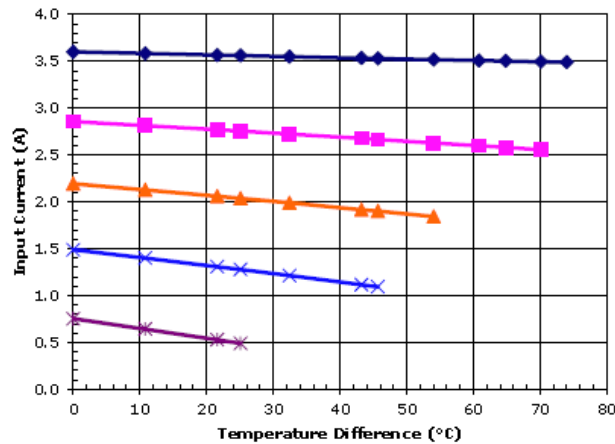


Figura 69. Gráfica que relaciona la corriente de un MTE con el salto térmico y la tensión de trabajo

Hasta aquí, y de manera teórica, esta es una opción técnicamente viable y que podría servir para alimentar al DAREC.

11.2.4. Conclusiones sobre la alimentación termoeléctrica

Tras lo explicado en cuanto a la resistencia de carga óptima, y asumiendo que se trabajase con un ratio resistencia de carga partido por resistencia interna de 10, supondría lograr una resistencia interna de 18 a 20 [Ω]. Esto es debido a que la resistencia de los ventiladores se sitúa, como se ha dicho, entre 181 y 200 [Ω]. Además un ratio de 10 es realmente pobre y muy lejos del ratio unitario deseado.

Los MTE consultados poseen una resistencia eléctrica interna cuyo valor se sitúa en torno a 2 o 3 [Ω], cada pastilla. Para alcanzar los 18 [Ω], dejando de lado otras consideraciones, harían falta de 6 a 9 unidades termoeléctricas. Esto queda a todas luces fuera de los costes asumibles para un producto que se pretende comercializar a día de hoy. Por otro lado y dadas las experiencias anteriores de los diseñador con el empleo de MTE, lograr un salto térmico real de 10°C en la instalación prevista se plantea realmente difícil.

Se contempla en las líneas de futuro una posible versión del DAREC alimentada con esta tecnología si en el futuro se diera una caída fuerte del precio de los MTE o un aumento en la eficiencia de la conversión térmica a electricidad.

12. ASPECTOS ESTÉTICOS

En este apartado, último paso antes de las pruebas finales del dispositivo, se quiere volver a poner de manifiesto la importancia del apartado estético a la hora de diseñar un producto que el cliente va a estar viendo durante su uso.

Como se dijo al comenzar el proceso de diseño, no vale solamente con que el producto cumpla sus requerimientos funcionales, sino que además debe tener una buena presentación de cara especialmente a lograr un buen resultado comercial. Esto se ha plasmado especialmente en el diseño de la envolvente, en cuyas modificaciones se han ido recogiendo una serie de mejoras que atendían específicamente a este apartado.

En resumen podríamos decir que los requerimientos estéticos los hemos satisfecho mediante:

- Geometría de la envolvente que crea un dispositivo armonioso y visualmente agradable.
- Rugosidad adecuada que facilite su agarre y resulte agradable al tacto.
- Combinación de colores que hacen un dispositivo atractivo y elegante.
- Logo e inscripciones que resaltan los principios de eficiencia y energías renovables del dispositivo.

A continuación y para cerrar este punto se muestran dos de los logos diseñados durante el proceso de elección:



Figura 70. Logo representativo de la eficiencia y la conciencia medioambiental para el DAREC

13. PRUEBAS TÉRMICAS

13.1. Objetivo y requisitos

El objetivo de realizar las pruebas es evaluar de manera experimental el funcionamiento y las mejoras aportadas por el DAREC a la climatización de un espacio real y casi siempre habitado.

De cara a que sean unas pruebas rigurosas y comprobables deberemos registrar exactamente cómo hacemos el ensayo para dotarlo de repetibilidad y que si por alguna razón hubiera que comprobar los resultados con posterioridad el ensayo sea lo más replicable posible.

13.2. Definición de las mismas

13.2.1. Antecedentes

Hasta ahora se había planteado el uso de una cámara climática como solución inicial, sin haber analizado propiamente qué se quería hacer, cómo o para qué. Sin embargo el empleo de la cámara plantea varios problemas inherentes como que su aislamiento es muy bueno y por tanto no representa las condiciones reales de una habitación (fugas de calor por paredes y ventanas). Por tanto y además de que la mejora en el calentamiento de la sala no sería tan apreciable, nos imposibilitaría apreciar la mejora del denominado efecto frío (pérdidas localizadas en la ventana).

Además de estos problemas inherentes había otros circunstanciales como el coste de alquilar una sala de este tipo y la escasez de las mismas, ya que averiada la de la Upna nos obligaba a buscar una fuera de la ciudad. Por último y dado que el propósito de la cámara climática es mantener la temperatura en su interior constante no tiene sentido emplearla para nuestro experimento ya que solamente serviría para establecer las condiciones iniciales de los ensayos mediante una consigna de temperatura concreta.

13.2.2. Solución propuesta

Se propone por tanto utilizar como lugar de ensayos una habitación estándar, que tenga una ventana como mínimo e instalar las sondas de temperatura uniformemente distribuidas. Paralelamente habrá de buscarse un equipo portátil de aire acondicionado de manera que nos permita establecer las condiciones iniciales de la habitación a una consigna aunque no sea con la misma precisión que la cámara climática. Una vez establecida dicha temperatura se incorporará a la habitación un radiador eléctrico, con un

vatímetro para medir el consumo, y se registrara mediante las sondas previamente citadas la evolución espacial de la temperatura dentro de la habitación. Una vez alcanzada la consigna de calefacción se detiene todo, se guardan los registros de las sondas y se anota el tiempo empleado. Finalmente se vuelve a encender el equipo de frío para alcanzar la temperatura inferior de consigna, de manera que el ensayo se repetirá tantas veces como configuraciones quieran probarse.

13.3. Preparación de las pruebas

Cuando a continuación se hable de DAREC de 60 y DAREC de 80, son dos versiones del prototipo comentado hasta la fecha, con la única diferencia de que cada uno de ellos equipa uno de los dos ventiladores seleccionados al final del punto 10.2. El de 60 equipa el de 60 y el de 80 lleva el ventilador de 80, lo cual se refleja en una carcasa proporcional al propio ventilador.

13.3.1. Equipos necesarios

Térmico

- Radiador(es) eléctrico(s) portátil(es)
- Radiador convencional en una calefacción individual
- Dispositivos DAREC a ensayar

Sensado

- Sondas de temperatura (20 uds.)
- Equipo que gestione las sondas de temperatura
- Polímetro, amperímetro y/o vatímetro
- Soporte físico para las sondas de temperatura

Eléctricos

- Fuente(s) de alimentación para los dispositivos
- Cables y pinzas para asegurar uniones
- Alargaderas y herramientas varias (tijeras, alicates...)

13.3.2. Explicación de los dos tipos de prueba

Dada la diferencia... radiador eléctrico y de calefacción, que si general y específico...

13.4. Modelo de prueba A; Radiador eléctrico

Comenzaremos por analizar el comportamiento del DAREC instalado sobre unos radiadores eléctricos.

13.4.1. Esquema de la prueba

- Establecer temperatura inicial de la habitación a la de consigna
- Introducir radiador eléctrico en estado estacionario
- Registrar evolución espacial de la temperatura dentro de la habitación
- Parar los equipos cuando se alcance la consigna de temperatura superior

13.4.2. Orden de dispositivos

- En primer lugar probaremos el radiador sin ningún añadido
 - En tercer lugar el modelo de 60 al voltaje más bajo que puede dar el equipo
 - En quinto lugar el modelo de 60 al voltaje más alto que puede dar el equipo
 - En segundo lugar el modelo de 80 al voltaje más alto que puede dar el equipo
 - En cuarto lugar el modelo de 80 al voltaje más bajo que puede dar el equipo
- Estos ensayos serán los ensayos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente cuando se nombren más adelante.

13.4.3. Desarrollo de las pruebas tipo A; Radiador eléctrico

Tras realizar todo el diseño del DAREC y la planificación de la prueba, finalmente hallamos una habitación en la que hacer las pruebas, con las dimensiones, posición de la ventana y orientación que considerábamos adecuados. Las medidas eran 2'65x4'75 metros cuadrados, con un altura aproximada de 2'7 m. La orientación era de ventana hacia el este y la casa a la que pertenece se encuentra en Funes.

Estas primeras pruebas con radiador eléctrico podrían denominarse como pruebas específicas, en las que comparamos de manera muy concreta los diferentes modelos entre sí y el comportamiento del DAREC respecto a los objetivos que debía cumplir.

La Figura 71 muestra la habitación citada así como la estructura que sirvió de soporte para las sondas de temperatura. Las 20 sondas se distribuyeron de la forma más uniforme posible y atendiendo a los siguientes criterios: 1 para la temperatura exterior situada por fuera de la ventana, 1 para la temperatura del radiador, 1 cerca del marco de la puerta denominada "temperatura de referencia" y las otras 17 distribuidas a 1 y 2 metros respecto al suelo, y realizando un barrido espacial lo más completo posible. Se distribuyeron en diferentes combinaciones a 1, 2, 3 o 4 metros de la puerta en el lado largo y a 0'9 y 1'8 metros respecto al lado ancho de la habitación.



Figura 71. Habitación empleada para las pruebas térmicas con la estructura de soporte para las sondas

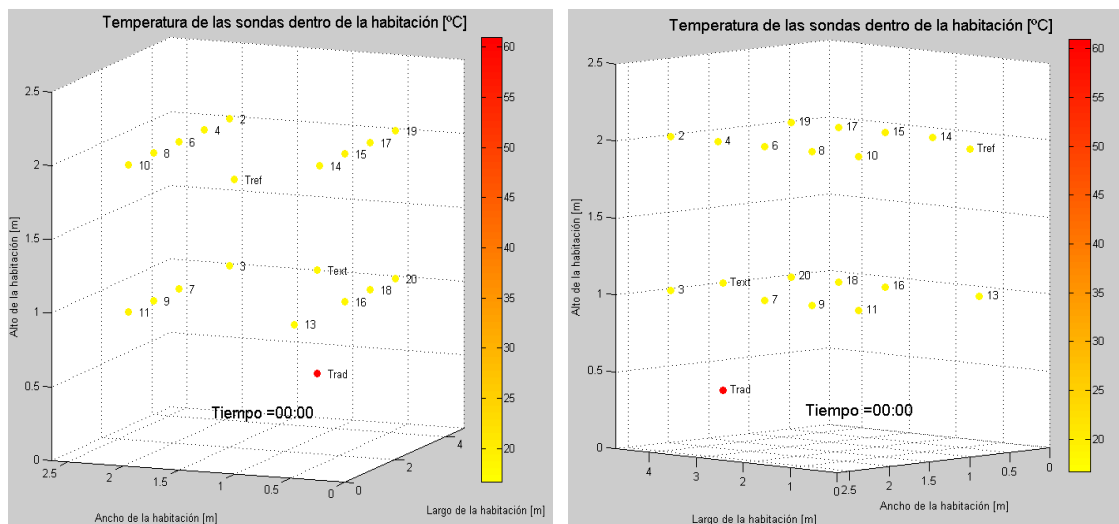


Figura 72. Localización espacial de las sondas vistas desde la puerta (izq.) y desde la otra esquina del mismo lado (dcha.) para el modelo de pruebas B

La Figura 72 muestra la localización de las sondas a lo largo de la habitación, coincidiendo la perspectiva de la izquierda con la visión que se tendría desde la puerta, tal y como aparece en la Figura 71. La sonda Text es la número 1, la Trad es la 5 y Tref la 12.

Continuando con los equipos, en mitad de la habitación se observa un equipo en el suelo del que parten las 20 sondas. Este equipo es la extensión del adquisidor de datos, que junto al ordenador se situaron en el pasillo para que no actuaran como una fuente de calor y distorsionaran los datos.

Las verdaderas fuentes de calor fueron los radiadores situados al final de la habitación, en el suelo y justo debajo de la ventana. Se colocaron 2 juntos para poder abarcar la superficie de apoyo del DAREC, tal y como muestra la Figura 73. En dicha imagen se observa también la fuente de alimentación empleada y que sustituyó durante las pruebas al cargador del propio equipo. Se tomó esta decisión para poder estar seguros de a qué tensión se alimentaban los ventiladores y saber así que potencia consumían.



Figura 73. Radiadores eléctricos de aceite con el DAREC encima y la fuente de alimentación empleada

Por último y antes de entrar a comentar los ensayos decir que el orden seguido fue el que estaba planificado. En primer lugar se realizó el ensayo tal y como se ha descrito en el apartado anterior sin el DAREC. A continuación y con el DAREC de 60 [mm] se repitió el ensayo a 10 y 5 [V], para finalmente repetirlo con del DAREC de 80 [mm] a 10 y 5 [V].

Los ensayos tuvieron lugar desde las 17:00 en adelante por 3 razones:

- Evitar la entrada de sol que podía darse hasta poco después del mediodía

- Es un horario que en la vida real puede coincidir con periodos de calefacción en los hogares
- A partir de esa hora y en adelante la temperatura exterior tendría una tendencia descendente por lo que los datos son válidos ya que nos ponemos en el peor caso desde nuestro punto de vista, y es que el ensayo sin DAREC se realiza a una temperatura externa mayor que con el DAREC.

13.4.4. Análisis de los datos de las pruebas tipo A

Identificación de ensayos

Empezamos por mostrar en la Figura 74 los 3 primeros ensayos y las sondas de temperatura exterior, del radiador y la de referencia o termostato a lo largo de los mismos. Realizamos los ensayos tal y como los habíamos planeado y comprobamos que efectivamente el DAREC cumplía los objetivos propuestos. En los siguientes puntos iremos desgranando los datos obtenidos en estos ensayos.

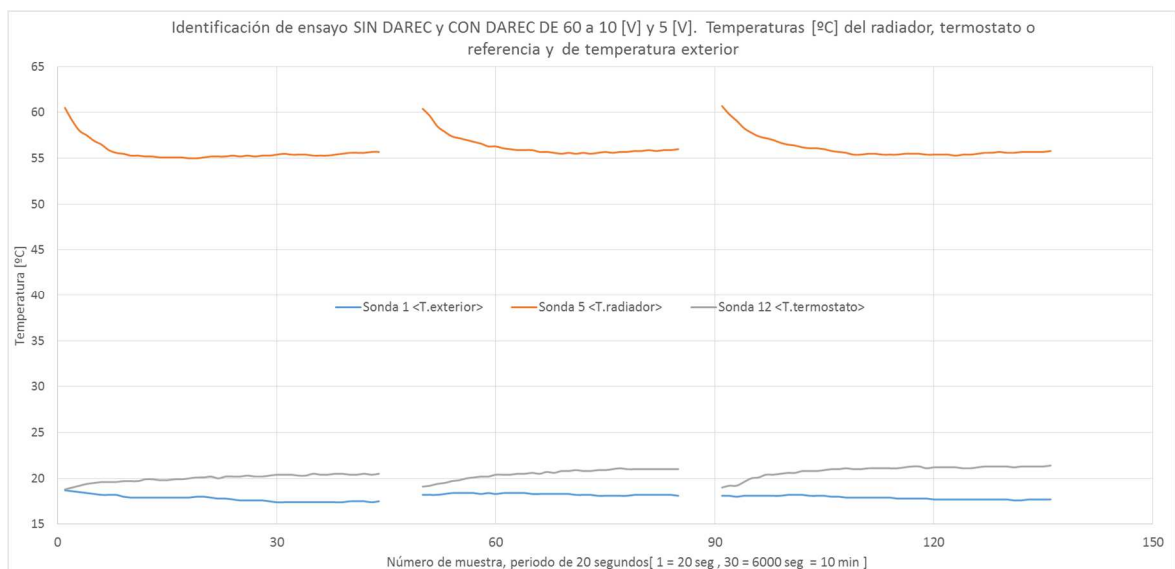


Figura 74. Ensayo 1 sin DAREC (izq.) y ensayos 2 y 3 con DAREC 60 a 10 y 5 [V] (ctro. y dcha.)

Comparación sin DAREC respecto a DAREC 80 a 5 [V]

Para poder estudiar detenidamente los datos construimos una interface o visualización que nos permitiera representar las 5 variables que debíamos considerar, 3 para la posición tridimensional de la sonda, y las otras 2 para la temperatura de dicha sonda y para la variable tiempo. Dada que la cantidad de datos era elevada, una representación en video como la que obtuvimos finalmente permite asimilar la información de manera más sencilla. En la carpeta que contiene este documento se adjunta en video como ejemplo el ensayo del DAREC 80 a 5 [V].

Siguiendo con este ejemplo, aprovecharemos para comparar los tiempos de calentamiento respecto al ensayo de sin DAREC, que fue el ensayo número uno. Hemos realizado una captura con el momento inicial y final de cada ensayo y al situarlos uno frente a otro obtenemos la Figura 75.

En ambos ensayos partimos de la misma temperatura en la sonda de referencia, con el radiador en iguales condiciones y con la temperatura exterior ligeramente más fría en el caso de DAREC 80 a 5[V]. A pesar de contar con este hándicap, puede comprobarse como tras haber pasado aproximadamente 15 minutos y siendo la temperatura exterior del ensayo del DAREC casi un grado más fría, en el mismo instante la temperatura de referencia de la habitación supera en más de un grado al ensayo sin DAREC.

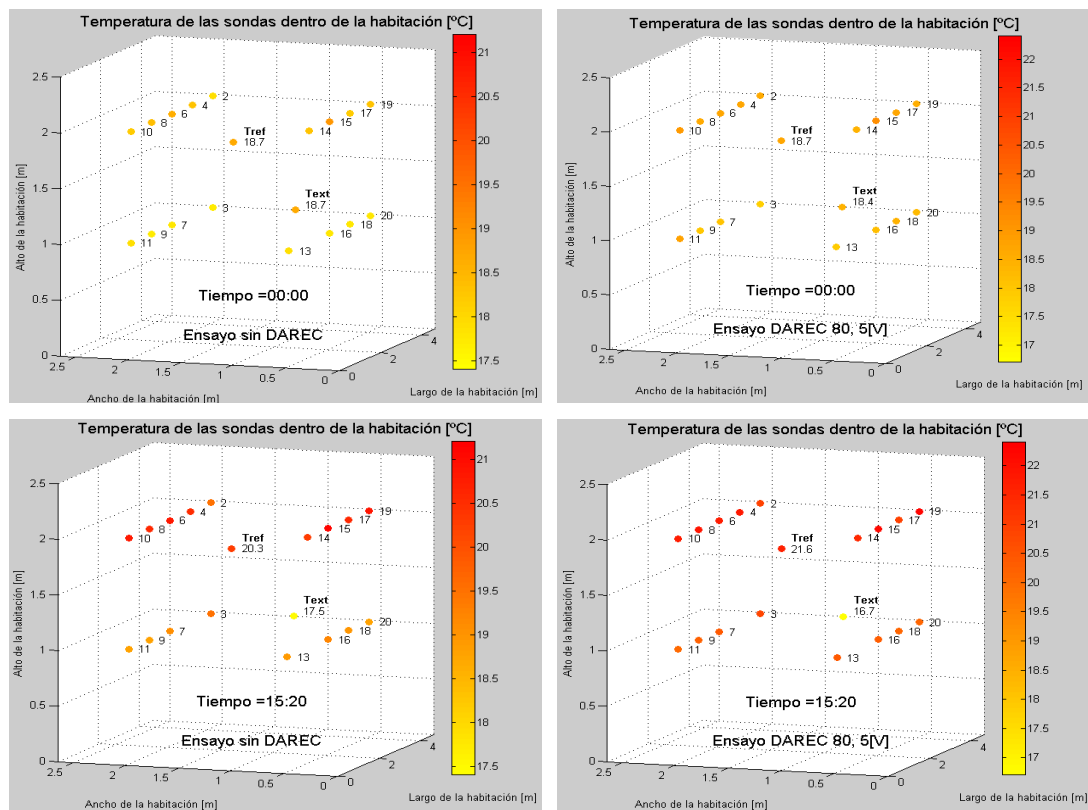


Figura 75. Ensayos sin DAREC (izq.) y con DAREC 80 a 5 [V] (dcha.) Arriba el instante inicial y abajo el final

En resumen, partiendo de las mismas condiciones y con un ambiente más frío, el DAREC es capaz de producir un mayor calentamiento dentro de la habitación. No es de extrañar pues se sustenta en los principios que ya se han repetido en varias ocasiones:

- Reducir las pérdidas por la ventana
- Aumentar la extracción de calor del radiador

- Al impulsar el aire con un ventilador el radiador se convierte en un dispositivo similar a radiador + estufa de aire. Ello supone un calentamiento del aire de la habitación a una velocidad muy superior a la que habría sin DAREC.

De hecho esta tercera ventaja la podemos cuantificar a partir de las imágenes mostradas, ya que si en el mismo tiempo el gradiente que logra el DAREC es mayor, implica que la velocidad de calentamiento del aire dentro de la habitación también lo es. En concreto se obtiene un aumento de la velocidad del 80% lo que reduciría el tiempo necesario para alcanzar la consigna en el ambiente en aproximadamente un 45%.

Estudios de la temperatura por zonas

Otra de las ventajas del DAREC era que se según su diseño a lograr una mayor homogeneización en la temperatura dentro de la habitación, reduciendo los gradientes entre las diferentes áreas de la misma. Para estudiarlo hemos creado 4 temperaturas ficticias que se explican en la Tabla 8.

Tabla 8. Explicación de las temperaturas ficticias para el modelo de pruebas A

Temperatura ficticia	=	Promedio de las sondas
Superior		2 4 6 8 10 12 14 15 17 19
Inferior		1 3 7 9 11 13 16 18 20
Cerca (del radiador)		2 4 3 19 17 18 20
Lejos (del radiador)		8 10 9 11 12 14 13

De acuerdo a las disposición de las sondas mostradas en la Figura 72 se entiende que la temperatura superior es la media de todas las situadas a una altura de 2 metros, siendo la inferior la media de aquellas situadas a 1 metro, a excepción de la del radiador que se elimina para no distorsionar el resultado. Para determinar la temperatura ficticia de cerca y lejos decidimos no considerar sondas situadas en el centro de la habitación (6, 15, 16 y 7) de manera que nos quedasen dos grupos, uno más cercano al radiador y otro más alejado. La temperatura media de estos grupos es la de “cerca” y la de “lejos” respectivamente.

En el Anexo D se explica cómo se han calculado los valores y se expone una tabla de los 5 ensayos. Como resumen decir:

- Todos los ensayos muestran que el DAREC reduce el gradiente que existe entre la temperatura superior e inferior en al menos un 15%, y en 2 de los 4 reduce esta diferencia en un 33%.
- Respecto a la diferencia de temperatura entre T^aCerca y T^aLejos decir que en todos los casos, incluidos sin DAREC, se sitúa en aproximadamente 0'1[°C]. Es

un valor tan bajo que no puede hablarse sobre comparaciones ya que la resolución de la sonda es precisamente 0'1[°C].

Por tanto podemos afirmar que el DAREC mejora la homogeneización de la temperatura dentro de la habitación.

Contraste del tiempo de mejora con dos sondas de referencia

Para que no pueda achacarse el tiempo de mejora a unos resultados oportunistas o manipulados, hemos querido contrastar los resultados obtenidos en cuanto a la mejora de tiempo de calentamiento con dos sondas de referencia. Además de las 3 sondas generales (radiador, exterior y referencia) que nos llevan al estacionario hicimos un procedimiento de descarte para hallar las sondas más significativas/estables.

Dado que en el lado de la ventana se producen fuertes pérdidas, y que cerca de la puerta suele haber corrientes con el pasillo, a priori sosteníamos que la cuarta esquina sería la que tendría las sondas más estable. Realizamos un análisis detallado de la evolución de las 20 sondas a lo largo de los ensayos y fuimos descartando aquellas que se mostraban más “nerviosas” hasta encontrar las dos más estables. El proceso se detalla a continuación.

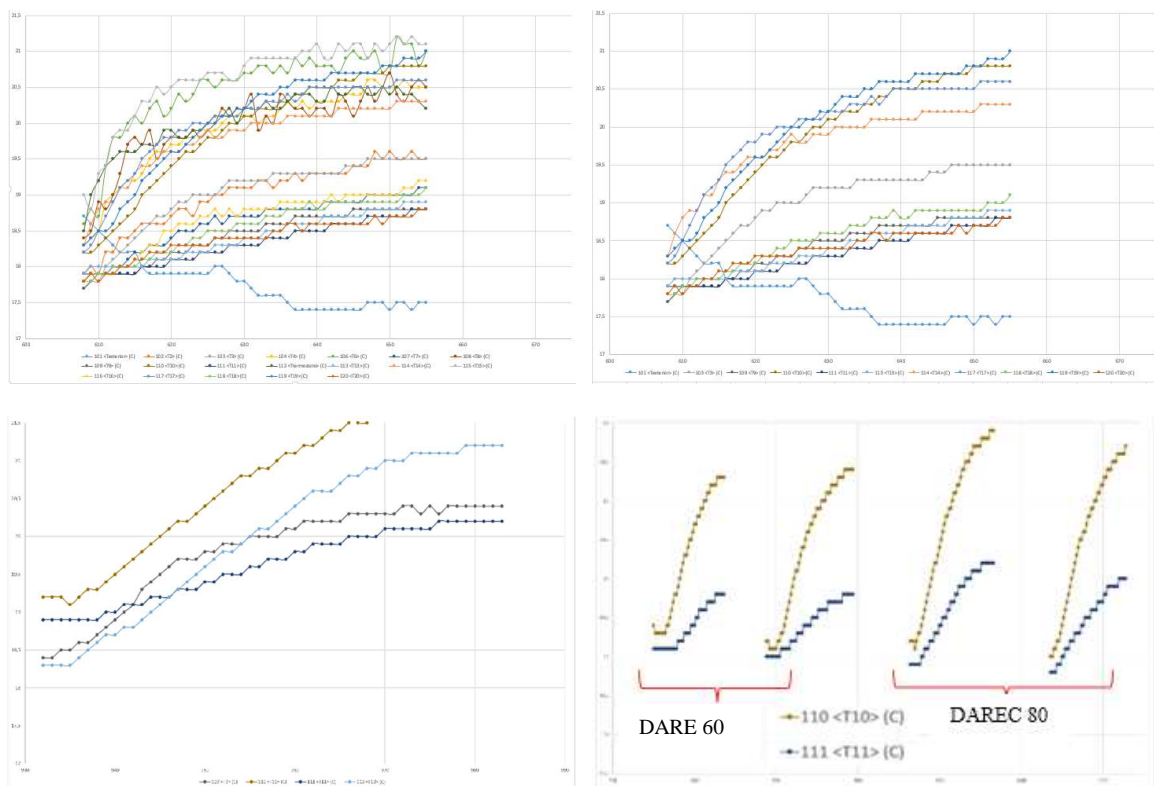


Figura 76. Proceso de búsqueda de las sondas 2 sondas más estable

Efectivamente comprobamos que las dos sondas más estables, y cuya forma se repite a lo largo de los ensayos son la 10 y la 11, justo las colocadas en la esquina alejada de la ventana que no es la puerta. Al tener unas sondas que se comportan con la regularidad que refleja la esquina inferior derecha de la Figura 76 podemos pasar a comparar los tiempos de calentamiento entre los diferentes ensayos. Además dicha figura refleja como en los dos últimos ensayos, realizados con el DAREC de 80, las temperaturas alcanzadas son mayores que en los ensayos realizados con el DAREC de 60.

Finalmente y ya que es la sonda con un mayor recorrido y por tanto más estable, se emplea la número 10 para calcular de nuevo la reducción en los tiempos de calentamiento del aire. En el Anexo D se explica cómo se han calculado los valores y se expone una tabla de los 5 ensayos, si bien como resumen volvemos a afirmar que la reducción del tiempo para el DAREC 80 se sitúa en torno al 45% y para el de 60 entorno al 35%, todo ello dependiendo de la tensión a la que esté funcionando.

13.5. Modelo de prueba B; Radiador de calefacción individual

13.5.1. Esquema de la prueba

- Distribuir sensado de temperaturas en la habitación al igual que en modelo de prueba A
- Establecer una consigna de termostato
- Arrancar la calefacción y dejarla evolucionar, registrando el comportamiento y evolución espacial de la temperatura durante un período prolongado
- Parar la calefacción y la adquisición de datos

13.5.2. Orden de pruebas

- El primer día probaremos el radiador sin ningún añadido
- El segundo día colocaremos dos dispositivos DAREC 80 para cubrir el ancho del radiador pero alimentado a un voltaje bajo, 5 [V].

13.5.3. Desarrollo de las pruebas tipo B; Radiador de calefacción

Para estos ensayos se modificaron la posición de algunas sondas con el objeto de, estudiando la evolución de la temperatura del cristal, poder determinar la eficacia del DAREC en la reducción de las pérdidas a través de la ventana. Al margen de emplear una sonda para este propósito se empleó la misma estructura para situar el resto de las sondas, por lo que volveríamos a tener información de la temperatura a nivel tridimensional dentro de la habitación.

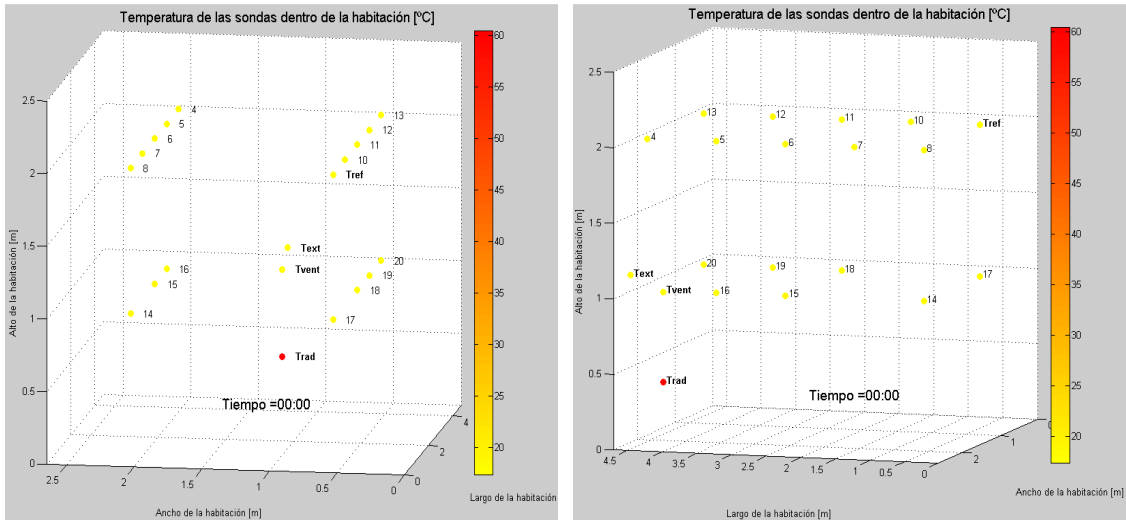


Figura 77. Localización espacial de las sondas vistas desde la puerta (izq) y desde la otra esquina del mismo lado (dcha.) para el modelo de pruebas B

La Figura 77 muestra la localización de las sondas para el modelo de pruebas B. Las sondas más importantes son las siguientes: Text es la número 1, Trad es la 2, Tvent es la 3 y Tref la 9, siendo T = Temperatura y el acrónimo significa exterior, radiador, ventana y referencia, respectivamente. En este caso la fuente de calor fue el propio radiador de la habitación que se puede observar en la Figura 78.



Figura 78. Radiador de calefacción convencional para el modelo de pruebas B

El interés de este radiador radica en que su situación es algo común entre los radiadores instalados hoy día, y es precisamente encontrarse debajo de una ventana. Se

colocaron 2 dispositivos DAREC juntos para poder abarcar el ancho del radiador, y se alimentaron a una tensión de 5[V], la más baja para la que está diseñada el sistema. En estas pruebas, además de otros efectos, se buscaba cuantificar la reducción de las pérdidas a través de la ventana al reducir la temperatura del cristal. Dicha temperatura se reduce en la medida en la que el DAREC recoge el aire ascendente del radiador y lo dirige hacia el centro de la habitación en vez de dejar que pase por delante de la ventana. Este efecto se explicó al comienzo del documento y lo recoge la Figura 7.

13.5.4. Análisis de los datos de las pruebas tipo B

Identificación de ensayos

Empezamos por mostrar en la Figura 79 el ensayo completo de 3 días de duración, durante los cuales se recogieron las temperaturas de las 20 sondas ya explicadas, y donde se puede observar el valor de cada una de ellas. El primer día, 20 de Octubre, se dejó sin encender la calefacción con objeto de estudiar la evolución de las sondas y comprobar que no hubiera ninguna anomalía en el registro de las mismas.

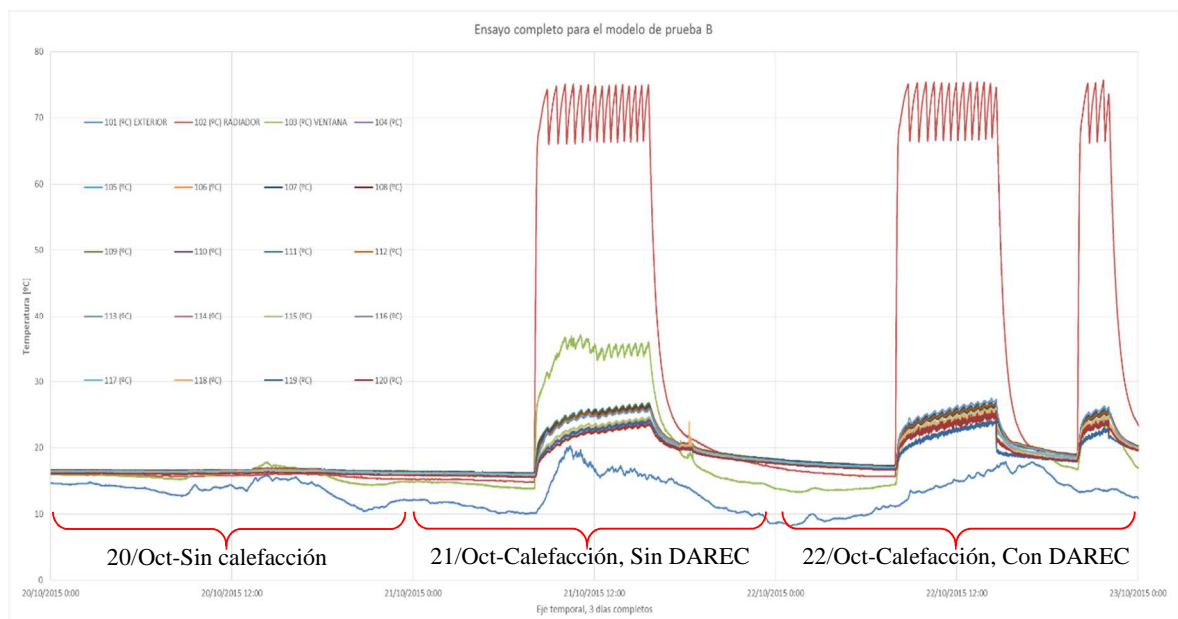


Figura 79. Evolución de las sondas de temperatura durante 3 días en el modelo de pruebas B

Para el primer día, 20 de Octubre, se puede observar cómo sin estar conectada la calefacción destacan 3 sondas; la azul que representa a la temperatura exterior, la verde que representa a la temperatura del cristal y evoluciona con una tendencia paralela a la de la temperatura exterior, y en último lugar la roja que representa a la temperatura del radiador. La separación entre la temperatura interna de la ventana y la exterior de ambiente se debe a las propiedades aislantes de la ventana.

Para los dos siguientes días, 21 y 22 de Octubre, se encendió la calefacción tal y como reflejan todas las sondas y especialmente la del radiador, que se llega a situar sobre los 70°C. La diferencia radica en que el segundo día, 21 de Octubre, se realizó el ensayo sin el DAREC mientras que el tercer día, 22 de Octubre, sí que se repitió el mismo ensayo con el DAREC sobre el radiador. Ambos días comparten un intervalo de tiempo común en el que se encendió el radiador, sobre los que se harán sendos zooms a continuación.

Reducción de las pérdidas a través de la ventana

Comenzamos este apartado introduciendo los zooms:

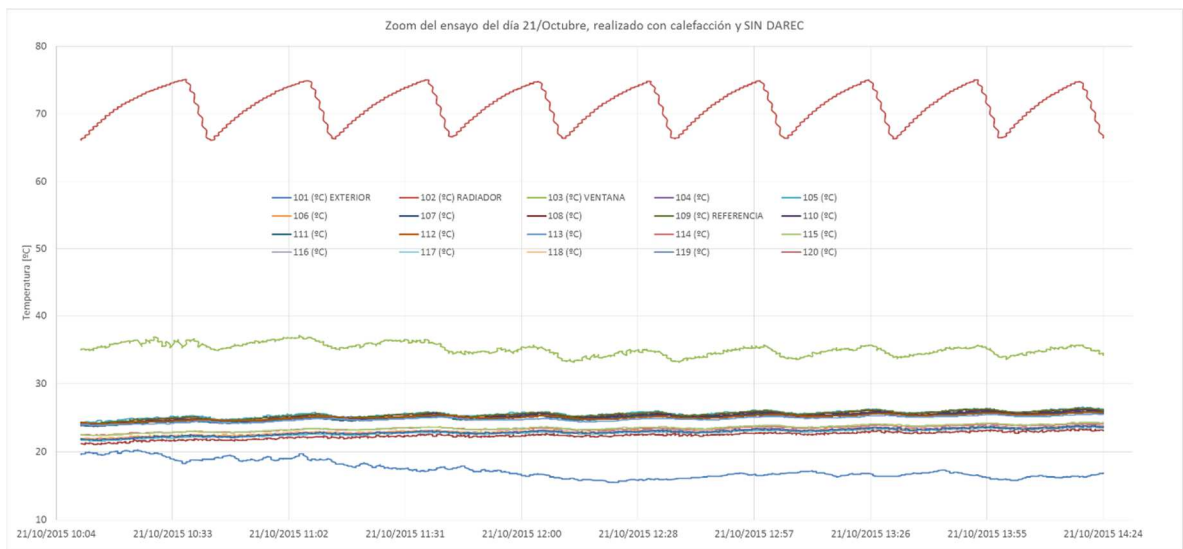


Figura 80. Zoom del ensayo correspondiente al día 21/Octubre; con calefacción y SIN DAREC

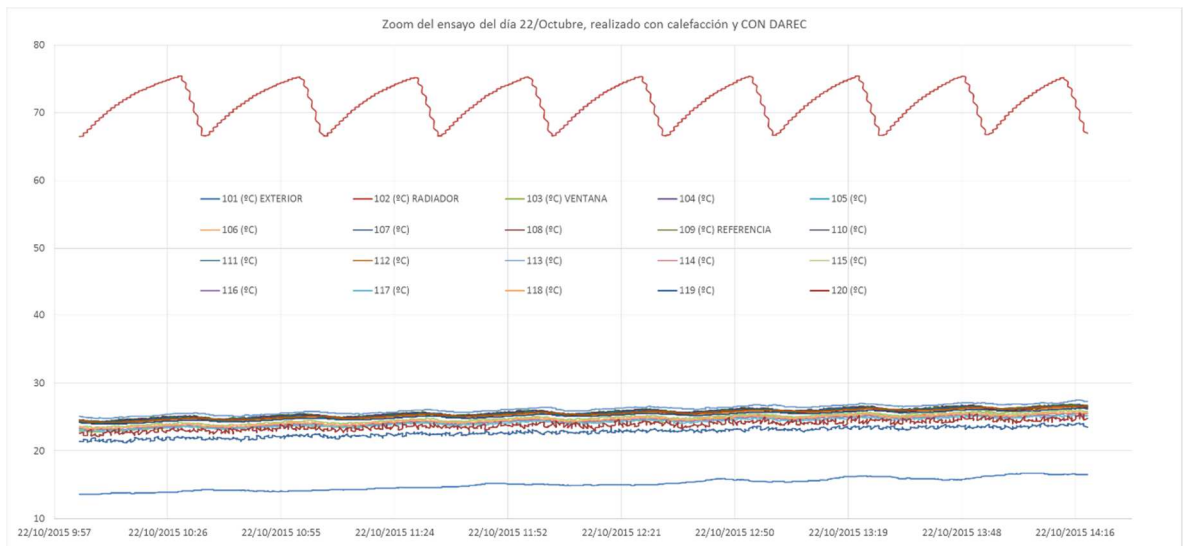


Figura 81. Zoom del ensayo correspondiente al día 22/Octubre; con calefacción y CON DAREC

Podemos observar como en ambas figuras el radiador se sitúa prácticamente en la misma temperatura, en el extremo contrario observamos la sonda de ambiente como la temperatura más baja, y entre medio se hallan las otras 18 sondas. Sin embargo y

solamente de un primer vistazo se puede comprobar como la sonda de temperatura correspondiente al cristal interno de la ventana sobresale de este grupo (Figura 80) mientras que en la Figura 81 permanece en el mismo rango de temperaturas que las demás sondas de la habitación. **Esto es precisamente lo que marca la eficiencia del DAREC en la reducción de las pérdidas a través de la ventana.**

Según diversas fuentes las pérdidas de calefacción a través de la ventana se sitúan, para una vivienda tipo, aproximadamente en el 20% del total. Teniendo en cuenta un coeficiente dado de transferencia de calor a través de la ventana “U”, y una temperatura exterior “Text” también fijada, la transferencia de calor se regirá por la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas por la ventana}} [W] = (T^{\text{a}}_{\text{cristal interno de ventana}} - T^{\text{a}}_{\text{ambiente exterior}}) [^{\circ}\text{C}] * U \left[\frac{W}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

La temperatura media del cristal durante el zoom mostrado en las figuras anteriores fue de 35'1 [°C] y de 24'5 [°C] respectivamente. Si la temperatura media exterior durante los ensayos fueron de ensayos es de 17'3 y de 15'1 [°C] respectivamente, podemos deducir que:

$$\begin{aligned} \% \text{reducción de pérdidas} &= \frac{\dot{Q}_{\text{pérdidas sin Darec}} - \dot{Q}_{\text{pérdidas con Darec}}}{\dot{Q}_{\text{pérdidas sin Darec}}} = 1 - \frac{(24'5 - 15'1) * U}{(35'1 - 17,3) * U} \\ &= 1 - \frac{9'4}{17'8} = 47'2 \% \end{aligned}$$

Ampliando al caso general la reducción sería:

$$\% \text{reducción de pérdidas} = 1 - \frac{(T_{\text{vent CON Darec}} - T_{\text{ext}})}{(T_{\text{vent SIN Darec}} - T_{\text{ext}})}$$

Por tanto, si aplicamos la reducción de pérdidas obtenidas del 47'2%, y fijamos unas pérdidas de calor a través de la ventana del 20%, obtenemos una reducción de las necesidades caloríficas totales para la habitación del 9'5%.

Nuevo estudio sobre la homogeneización de la temperatura

Con el objetivo de volver a comprobar que el DAREC homogeneiza la temperatura dentro de la habitación, realizamos un nuevo zoom en la Figura 80, que se muestra a continuación:

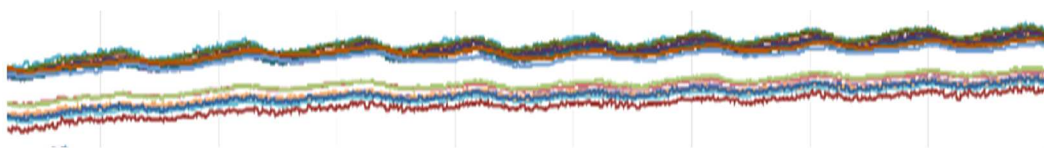
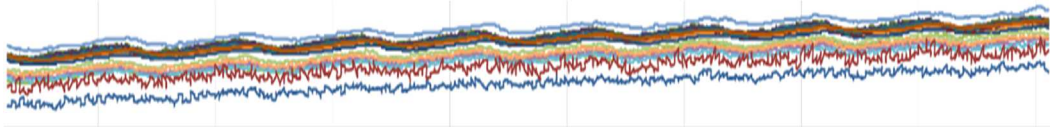


Figura 82. Detalle de las sondas de temperatura dentro de la habitación en el ensayo sin DAREC

Se evidencia un hueco entre dos grupos de sondas que pasamos a explicar. El grupo superior agrupa precisamente a las sondas colocadas a una altura de 2 metros dentro de la habitación, mientras que el grupo de sondas por debajo del hueco están colocadas a

una altura de 1 metro. Si realizamos el mismo proceso con la Figura 81, zoom sin las temperaturas del radiador y del exterior, obtenemos lo siguiente:



En este caso y habiendo realizado el ensayo con el DAREC podemos ver como desaparece el hueco de temperaturas entre los grupos de sondas superior e inferior. Realizando los cálculos necesarios, que se detallan en el Anexo E, podemos afirmar que el DAREC reduce en un 32% la diferencia de temperaturas entre el grupo superior e inferior de sondas.

13.6. Conclusiones

Esta serie de ensayos nos han servido para poner en funcionamiento dentro de un entorno real el producto en una versión casi final, cuantificando la diferencia entre la utilización o no de un dispositivo DAREC.

En los ensayos de radiador eléctrico hemos comparado los modelos DAREC 80 y DAREC 60, y hemos observado el efecto que produce la tensión a la que se alimenta el prototipo. Comprobamos que efectivamente reduce los gradientes de temperatura dentro de la habitación entre un 15% y 33%, lo que equivale a decir que existe una mayor homogeneización de la temperatura y por ende un mayor confort. Además logra una reducción de tiempo de calentamiento del aire cerca de la puerta de entre el 35 y el 45%, según modelo y tensión de funcionamiento.

Por otra parte y gracias a los ensayos realizados mediante el radiador de calefacción individual, todavía más representativa de una situación real, podemos volver a asegurar que la temperatura del aire dentro de la habitación es más homogénea. En concreto se reduce la diferencia entre la temperatura de la zona superior e inferior en un 32%. Por otro lado y dadas las pérdidas de calor a través de la ventana, podemos decir que el DAREC, al reducir en gran medida puede llegar a producir un ahorro del 9'5% en las necesidades caloríficas para una determinada estancia.

14. BALANCE ECONÓMICO

Tal y como se ha dicho varias veces, se ha buscado un producto bueno y bonito, pero también económicamente viable. Ello se ha plasmado en que desde que el principio el planteamiento ha sido obtener un producto con un coste total inferior a los 30€. A continuación aportamos información que sustenta cómo se ha alcanzado dicho objetivo:

14.1. Material de la envolvente y proceso de fabricación

Contemplamos como opción de partida el realizar un equipo completo en chapa, empleando un utillaje ya disponible y que no acarrearía por tanto ningún tipo de inversión previa que hubiera que amortizar. Posteriormente comparamos otras 4 combinaciones de material para la envolvente con su correspondiente proceso de fabricación, para cada una de las cuales era necesaria una inversión inicial en equipos, y obtuvimos los resultados que recoge la tabla inferior.

Tabla 9. Resultado de ventiladores con todos los pesos ponderados iguales

<i>Material y/o proceso de fabricación</i> <i>Unidades para rentabilizar el utillaje</i>	DAREC				
	Completo en chapa	Completo en chapa (con radios)	En chapa y plástico	Completo en plástico	Plástico de moldes de prototipado
	0	NO se llega a rentabilizar	1600	900	400

A raíz de este análisis comparativo llegamos a la conclusión de que lo realizaríamos completamente en chapa. A pesar de que si superásemos un número determinado de unidades podría plantearse otro método de fabricación, el riesgo se minimiza al partir de un producto que no requiere apenas inversión inicial para su fabricación.

14.2. Ventiladores

Tabla 10. Coste de los ventiladores elegidos

<i>COSTE [€]</i>	<i>Nº Unidades</i>			
	≤ 9	≤ 49	≥ 50	
<i>Modelo</i>				
	HA80251V4	3,18 €	2,77 €	2,38 €
	HA60251V4	3,28 €	2,87 €	2,46 €

Los dos ventiladores elegidos son como ya se sabe de la casa Sunon, pertenecientes a la clase supersilenciosa, con un espesor de 25 [mm] y una tensión nominal común de 12

[V]. La medida de diámetro es 60 y 80 [mm], que unido a la curva característica y a consumo son las principales cosas en las que se diferencian. Respecto al precio, y realizando la compra al proveedor TME, el precio en ambos es muy similar, con una ligera ventaja hacia el de 80 [mm] y con un importante descuento eso sí, a medida que se aumenta el número de unidades pedidas.

14.3. Electrónica

Al igual que en los anteriores apartados, comentaremos aquí el precio exclusivamente de la compra de los componentes pertenecientes a la parte de la electrónica. Desgranaremos los costes de la siguiente forma:

Tabla 11. Lista de los conceptos del coste electrónico

Lista de conceptos que forman la parte del coste electrónico

PCB	Circuito control batería
	Circuito convertidor DC/DC
	Circuito acondicionamiento salida AUTO y LED's
	Coste circuito botón encender
	Coste conectores
Placa fotovoltaica	
Batería de Li-Polímero	
Carcasa metálica del cargador solar	

El coste del PCB varía enormemente en función de las unidades a producir, situándose entre 7 y 4 [€]. La placa ronda los 2,3 y la batería los 4 [€]. El coste de la carcasa metálica ronda el 1 [€].

14.4. Coste total del DAREC

Recopilando podemos decir que el coste total del DAREC se agrupa en 3 partidas; envoltorio, ventiladores y electrónica, encontrándonos dentro de cada una con 2 subpartidas; coste de materiales y coste de mano de obra.

La suma total de estas subpartidas será la que aporte el coste final de producción del DARCE, sometido como siempre a un cierto grado de incertidumbre ante la variación de los precios, la falta de disponibilidad de alguno de los componentes, o alguna incidencia en los proveedores que sea externa a la planificación realizada en este documento. Recalcar de nuevo el gran descenso de coste unitario al aumentar las cantidades de compra.

Tabla 12. Lista de los conceptos del coste electrónico

		Nº UNIDADES		
		≥ 10	≥ 100	≥ 1000
COSTE DE COMPONENTES	Mecánica	35,00 €	31,50 €	28,35 €
	Electrónica	7,18 €	5,32 €	4,21 €
	Ventiladores	2,82 €	2,42 €	2,42 €
	Subtotal Coste Componentes	45,00 €	39,24 €	34,98 €
MANO DE OBRA	Mecánica	1,00 €	0,90 €	0,81 €
	Electrónica	15,56 €	12,45 €	9,96 €
	Ventiladores	- €	- €	- €
	Subtotal Coste Mano de Obra	16,56 €	13,35 €	10,77 €
	TOTAL Coste DAREC (Por Unidad)	61,56 €	52,58 €	45,75 €

A partir de estos costes unitarios, y en función del precio de venta y de los gastos respectivos en la parte comercial podría obtenerse el beneficio bruto por cada unidad de producto vendida.

15. CONCLUSIONES FINALES

- I. La energía térmica supone la mayor fuente de consumo en los hogares. El 60% de la energía se emplea en calefacción, y otro 20% en agua caliente. Del 20% restante, una cuarta parte la consume el frigorífico. Podemos decir por tanto que un 85% del consumo de los hogares tiene como fin satisfacer una necesidad térmica.
- II. Dentro del 60% de consumo energético destinado a calefacción (68% en Navarra), diversos estudios estiman que existe un potencial de ahorro de entre el 20 y el 40%. Este ahorro puede darse mediante 3 líneas: generación, aislamiento y distribución del calor.
- III. El punto más evidente es el aislamiento pero a la vez es el más difícil para tomar medidas ya que una vez construido es rara la ocasión, salvo el cambio de ventanas, en la que se mejora por ejemplo el aislamiento entre las paredes y el exterior.
- IV. El segundo punto afecta al sistema de generación, cuya tendencia pasa por soluciones individualizadas o con contadores particulares frente a las grandes calefacciones centrales que se estilaban antes. A pesar de que una calefacción central actual tendría un mayor rendimiento, la falta de sensibilización sobre el uso de algo que se percibe como “común”, unido a que son instalaciones con tecnología más antigua, hace que hoy en día se opte por calefacciones individuales.
- V. En tercer lugar está la distribución del calor, tanto en el transporte del fluido desde la caldera hasta las estancias a calentar, como en la proyección que tenga el mismo dentro de cada estancia en cuestión. El mismo radiador, en función de donde esté situado dentro de una habitación producirá unos resultados térmicos diferentes provocados por los flujos de calor según las paredes, obstáculos o ventanas.
- VI. Un estudio sobre el estado del arte de los radiadores actuales muestra que la tendencia actual es instalar radiadores de aluminio con una zona superior convertida a salida de aire caliente, esto es, a transferencia de calor convectivo.
- VII. A raíz del modelo teórico de emisión del radiador observamos que el 70% del calor transferido se da por convección tanto interna como externa entre el radiador y el ambiente. El 30% restante se da por radiación entre la superficie exterior del radiador y las paredes de la estancia.

- VIII. Se ha conseguido un diseño de la envolvente que cumple todas las necesidades planteadas. Es funcional, estéticamente agradable, seguro, robusto, hidráulicamente eficiente, tiene un coste de fabricación competitivo y permite albergar o servir de base al resto de los elementos.
- IX. De igual manera y tras un riguroso y exhaustivo proceso de selección se han elegido dos ventiladores altamente eficientes, de bajo consumo pero con la potencia suficiente y sobre todo, extremadamente silenciosos. El precio de los ventiladores es también muy competitivo y para su elección se han combinado análisis teóricos y medidas experimentales de caudal y de ruido.
- X. El cargador solar que alberga la placa fotovoltaica, batería y circuito electrónico de control cumple con todos los requisitos solicitados, incluyendo un MPPT mediante convertidor DC/DC. También permite seleccionar entre diversas estrategias de funcionamiento que permitan apostar por la autonomía o por las prestaciones en función de las preferencias del cliente.
- XI. Señalar que además este cargador tiene una salida USB que le permite alimentar a otros dispositivos como puede ser un Smartphone, de manera que durante aquellas épocas del año en las que el DAREC no esté operativo se le puede dar un uso alternativo. Esto hace más atractiva la compra del dispositivo al aumentar las posibilidades de utilización del mismo.
- XII. El gasto de calefacción explicado en los primeros puntos lleva asociada en la práctica totalidad de los casos, el consumo de algún tipo de combustible fósil; gas, pellet, gasoil... Por supuesto con sus emisiones de CO₂ asociadas.
- XIII. El DAREC colabora a reducir esta cifra en tanto que si aumenta la eficiencia del sistema de calefacción, para las mismas necesidades energéticas hará falta consumir menos recursos naturales. Además es doblemente eficiente porque sus virtudes y su funcionamiento se basa en la energía obtenida de forma renovable, mediante FV, a diferencia del principal producto de la competencia.
- XIV. El procedimiento de diseño seguido durante todo el proyecto se ha basado en la mentalidad del diseño sostenible, buscando satisfacer las necesidades a la par que se realiza un uso moderado y adecuado de los recursos. Es un proceso más

complejo, largo y costoso que diseñar grosso modo, pero a cambio se obtiene un diseño mucho más riguroso, preciso y equilibrado.

- XV. Se ha mantenido una línea rigurosa durante el diseño de manera que ningún aspecto primara caprichosamente por encima de otro y donde cada modificación debía justificarse en base a una necesidad o requisito. Esto ha permitido, junto al diseño sostenible, obtener un producto que está pensado de manera integral y no como un agregado de partes hechas independientemente.
- XVI. Se han realizado para finalizar pruebas térmicas detalladas, con un sensado espacial de la habitación, que permitiera observar las mejoras introducidas por el DAREC. Efectivamente se observa una mejora en la homogeneización dentro de la sala al reducir de un 15% a un 35% el valor de la diferencia de temperaturas entre la zona superior e inferior de la habitación.
- XVII. Se observó una reducción del tiempo de calentamiento para el aire de la habitación situado en el extremo opuesto al radiador de entre un 35 y un 45%, además de cuantificar la reducción de las pérdidas a través de la ventana hasta en un 47'2%. Esto supone un descenso de hasta el 9'5% de las necesidades caloríficas dentro de dicha sala.
- XVIII. Por último y para que el proyecto no se quede en un mero experimento o ejercicio académico, hay que afirmar que sí es económicamente viable. De hecho se ha buscado siempre la colaboración con empresas de la región de manera que se fomente la economía de la zona.
- XIX. El fruto de un buen proceso de diseño es por tanto un producto que funciona, es bonito y seguro, y además puede llevarse a producción.

16. LÍNEAS DE FUTURO

- I. Para ampliar las posibilidades del dispositivo así como una simplificación estructural del mismo se planteó la posibilidad de cambiar la fuente de la alimentación. De este modo pasaría de ser fotovoltaica a termoelectricidad. Se ha realizado un primer estudio, sus ventajas principales serían que eliminan la necesidad del controlador electrónico y que además conformaría un dispositivo de una única pieza. Sin embargo el bajo rendimiento de los módulos dentro de esta instalación y rangos de temperatura concretos supone que, para cubrir las necesidades de alimentación mínima, harían falta una cantidad de módulos cuyo coste sería inasumible.
- II. Dada la geometría del dispositivo, que redirige el flujo de aire 90° de dirección vertical a horizontal hacia el centro de la habitación, la solución a priori más idónea sería emplear un ventilador tangencial. Sin embargo se han estudiado los actuales y no se encuentra ninguno cuya curva característica sea adecuada para el DAREC. Además emiten un nivel de ruido que duplica los seleccionados y su consumo se sitúa al menos un 30% por encima de los actuales. Se deja por tanto para una futura revisión, confiando en que mejoren los modelos existentes de dichos ventiladores.
- III. Otra posibilidad de mejora de cara al futuro sería la plantear diseños de carcasa más vanguardistas o arriesgados. Con inspiración en la forma de alguno de los altavoces actuales, se podría construir una envolvente atractiva que además de mejorar el apartado estético mantendría las propiedades hidráulicas.
- IV. La última línea de mejora se centra en la vertiente económica, desde dos enfoques que plantean lo mismo pero con diferentes acciones. Está claro que si se lograra una expansión del volumen de las ventas significativo, se harían cada vez pedidos de compra más grandes que llevaría asociado una rebaja del precio porque así trabajan los distribuidores. Este hecho puede dar pie a una estrategia de marketing que trabaje a la inversa, esto es, apostar porque va a haber una venta grande de unidades, subir un orden de magnitud, y hacer los pedidos en función de ello. De este modo el producto saldría a un coste menor y por tanto podría hacerse la campaña inicial de venta a un precio más atractivo y más asequible para el cliente.

17. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

17.1. Bibliografía

- [1] J. Chapman, "Transmisión de calor" (3ª edición), Ed. Bellisco, 1990.
- [2] Frank M. White, "Fluid Mechanics" (5th edition), Ed. McgrawHill, 2002.
- [3] J. P. Holman, "Transferencia de Calor", (8ª edición), Ed. McgrawHill, 2011.
- [4] Yunus A. Çengel, "Transferencia de calor" (3ª edición), Ed. McgrawHill, 2012.
- [5] P. Diéguez, "Apuntes de la asignatura Transmisión de Calor", 2011.
- [6] J. García, "Apuntes de la asignatura Máquinas Hidráulicas", 2012.

17.2. Weblografía

- [7] Salvador Escoda S.A. y S&P, "Manual práctico de ventilación, Catálogo Técnico" (2ª edición), Salvador Escoda S.A.

<http://www.salvadorescoda.com/tecnico/VE/Manual-Ventilacion.pdf>

(Consultado y disponible a 08/Nov/2015)

- [8] Varios autores, "Guía sobre las claves para la optimización de las instalaciones de calefacción individuales" (2014)

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-las-claves-para-la-optimizacion-de-las-instalaciones-de-calefaccion-individuales-fenercom-2014.pdf>

(Consultado y disponible a 08/Nov/2015)

- [9] Gobierno de Navarra, "Ahorro y uso eficiente de la electricidad en el hogar" (s.f.)

<http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/3273BD73-5CE9-41C4-95B5-0A9D81534ECD/128125/AhorroHogares.pdf>

(Consultado y disponible a 08/Nov/2015)

ANEXO A: CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

En este anexo se explica cómo calcular los tres valores de resistencias empleadas en el modelo teórico del radiador.

- **Resistencia del fenómeno de radiación – R_{rad}**

Recopilamos algunas expresiones del apartado 4.1:

$$\dot{Q}_{radiación} = \frac{\Delta T}{R_{rad}} = \frac{T_s - T_a}{R_{rad}} [W]$$

Por otro lado la Figura 83, extraída de los apuntes de la asignatura Transmisión de Calor (Pedro Diéguez, 2011) no proporciona una expresión concreta para $\dot{Q}_{radiación}$

Objeto pequeño en una cavidad grande

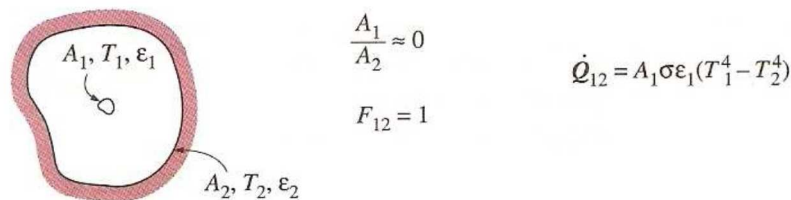


Figura 83. Ecuación de transmisión de calor por radiación para un objeto pequeño en una cavidad grande

Sustituyendo el valor de \dot{Q}_{rad} llegamos a:

$$\dot{Q}_{radiación} = \frac{\Delta T}{R_{rad}} = \frac{T_s - T_a}{R_{rad}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4) [W]$$

Si tenemos en cuenta, que matemáticamente:

$$(T_s^4 - T_a^4) = (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s^2 - T_a^2) = (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a) \cdot (T_s - T_a)$$

Despejamos para obtener:

$$R_{rad} = \frac{(T_s - T_a)}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4)} = \frac{1}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a)}$$

Siendo T_s la temperatura media de la superficie del radiador y T_a la temperatura media del ambiente, ambas en Kelvin. A es el área del radiador que emita a la habitación, ΔT es la diferencia de temperatura entre el radiador y el ambiente (por tanto indiferente si se calcula mediante °C o K), ε es el coeficiente de emisividad de la superficie radiante y σ es la constante de Stefan Boltzman cuyo valor se cifra en $5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

Si tomamos dicha expresión

$$R_{radiación} = R_{rad} = \frac{T_s - T_a}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4)} = \frac{1}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^2 + T_a^2) \cdot (T_s + T_a)} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

• **Resistencia de convección natural – $R_{conv.nat}$**

Recogemos de nuevo expresiones del apartado 4.1:

$$\dot{Q}_{convección} = h \cdot A \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{conv}} [W] \quad \rightarrow \quad R_{convección} = R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Se trata por tanto de calcular cuánto vale la h en cuestión para cada fenómeno considerado así como el área al que se aplique dicho fenómeno de convección. Empezaremos por calcular el valor del coeficiente de convección h para el caso de convección natural, donde necesitamos hallar el Nusselt:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k}$$

El número Nusselt es función de otros dos números, el de Prandtl y el de Rayleigh. A continuación, algunas expresiones para el caso de convección natural:

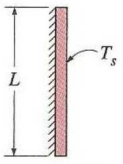
Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	$10^4 - 10^9$	$Nu = 0.59 Ra_L^{1/4}$ (9-19)
		$10^9 - 10^{13}$	$Nu = 0.1 Ra_L^{1/3}$ (9-20)
		Todo el intervalo	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)

Figura 84. Expresiones para el cálculo del Nusselt en convección natural

Siendo éste último, el de Rayleigh, función de Grashof y también del Prandtl:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \left[\frac{g \beta (T_s - T_{\infty}) L_c^3}{\nu^2} \right] Pr$$

T_s es la temperatura media de la superficie del radiador y $T_a = T_{infinito}$ es la temperatura del ambiente o del fluido al que se está transmitiendo el calor. g es aceleración de la gravedad, L_c es la longitud característica tal y como se indica en la figura y las demás variables son propiedades del fluido, que deben evaluarse siempre a la temperatura media llamada temperatura de película, $T_f = \frac{T_s + T_a}{2}$

Se realizaron los cálculos necesarios a mano, y para comprobarlos empleamos la página que se cita a continuación, obteniendo una similitud de resultados prácticamente perfecta. Esta correlación se explica si tenemos en cuenta que el procedimiento empleado por la página es el mismo que el detallado aquí.

<http://www.thermal-wizard.com/tmwiz/default.htm>

- **Resistencia de convección forzada – $R_{\text{conv.forz}}$**

Dentro de este apartado explicamos el cálculo de la h para el caso de convección forzada, y en último lugar aclararemos las áreas a las que aplicamos cada uno de dichos fenómenos. Lo primero es hallar el Reynolds, utilizando para ello el diámetro hidráulico equivalente:

$$Reynolds = Re = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D_h}{\mu} = \frac{V_m \cdot D_h}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{V_m \cdot D_h}{\nu} \quad \text{con} \quad D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p}$$

Siendo el diámetro hidráulico, por definición, el cociente entre 4 veces el área de la sección dividida por el perímetro de dicha sección. La sección a la que se refiere es aquella perpendicular al flujo. El Reynolds es un número adimensional resultante de multiplicar la densidad por el diámetro hidráulico y la velocidad media del fluido, todo ello dividido por la viscosidad dinámica. El cambio a la viscosidad cinemática se basa en que, por definición, esta es igual a la viscosidad dinámica partida por la densidad.

Una vez tengamos calculado el número de Reynolds, podremos definir el tipo de régimen en que nos encontramos, que serán laminar, de transición o turbulento. A partir de aquí se emplean las ecuaciones correspondientes para hallar el Nusselt en convección forzada:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0.33}$$

Donde Re y Pr son los números de Reynolds y Prandtl ya explicados, mientras que C y n son constantes que dependen de las características del flujo, si es sobre placa plana o no, flujo externo o interno...

Aclaración: A la hora de concretar qué áreas afectan a cada uno de los fenómenos, teniendo en cuenta las medidas del DAREC, del radiador y de los ventiladores que instalamos, se llegó a la siguiente conclusión:

- Área de convección forzada = $\frac{1}{4}$ del área total interna del radiador
- Área de convección natural = $\frac{3}{4}$ del área total interna más todo el área externa del radiador

Resultado numérico: Con la temperatura del aire a 20°C y la del radiador considerada uniforme a 60°C, los coeficientes de convección son de 4 y 4,5 [W/°C·m²] respectivamente. Sin embargo al ser la diferencia de área tan grande, la mejora en la transferencia total de calor queda muy amortiguada.

ANEXO B: DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

- **Testo 470 – Tacómetro**

testo 470

testo 470, tacómetro con funda TopSafe, incl. adaptador, ruedas giratorias de 0,1 y 6, cintas reflectantes, pilas y estuche de transporte.

Modelo 0563 0470



Tipos de sensor

	Ópticamente Mod. Haz de luz
Rango	+1 ... +99999 rpm
Exactitud ±1 dígito	±0.02% del v.m.
Resolución	0.01 rpm (+1 ... +99.99 rpm) 0.1 rpm (+100 ... +999.9 rpm) 1 rpm (+1000 ... +99999 rpm)
	Mecánica
Rango	+0,1 ... +19.999 rpm
Exactitud ±1 dígito	±0.02% del v.m.

Datos técnicos generales

Temp. Func.	0 ... +50 °C
Temp. Almac.	-20 ... +70 °C
Tipo de pila	2 pilas AA
Vida de la pila	40 h
Visualizador	Visualizador LCD de 5 dígitos y 1 línea
Medidas	175 x 60 x 28 mm
Peso	190 g
Garantía	2 años

	0.1 m	6"	12"
m/min	0.10-1999	0.10-1524	0.40-609.6
ft/min	0.40-6550	0.40-5000	0.40-2000
in/min	4.00-78700	4.00-80000	4.00-24000
m/sec	0.10-33.30	0.10-25.40	0.10-10.16
ft/sec	0.10-109	0.10-83.33	0.10-33.33
m	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999
ft	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999
in	0.00-99999	0.00-99999	0.00-99999

Unidades rpm, m/min, ft/min, in/min, m, ft, in

La tolerancia mecánica para las mediciones con rodillo es del 0,2 %; la exactitud se establece según el manejo: por ejemplo, la presión en la aplicación, el ángulo de incidencia, etc.

Figura 85. Hoja de características del tacómetro Testo 470 según el propio fabricante

Aclaración: De los posibles métodos de medida que ofrece el fabricante, se empleó el de lectura a distancia por medición óptica. Página web del producto:

https://www.testo.es/detalles_producto/0563+0470/#tab-4 (consultada a 7/10/2015)

• **Kanomax 6813 – Anemómetro**



Applications

- HVAC Ventilation and Balancing
- Laboratory Control
- IAQ Investigation
- Industrial Hygiene Quality Control

Features

- High Accuracy: +/- 1.0 % of reading
- 40 fpm of Air Velocity sensitivity
- Temp. Measurements from -22 to 212F
- Analog voltage and PC Communication output option
- Rugged Metal Probe and Vane

Specifications

Air Velocity	Probe AP275	40 to 7800 FPM (0.2 to 40 m/s)
	Probe AP100	60 to 6800 FPM (0.3 to 35 m/s)
	Accuracy	+/- 1.0 % of Reading +/- 1digit
	Resolution	1 FPM or 0.01 m/s
Temperature	Air Vel. Probe	-22 to 212°F (-30 to 100°C)
	Temp. Probe	-139 to 392°F (-95 to 200°C)
	Accuracy	+/- 0.3C +/-0.2 % of Reading in °C
	Resolution	0.1F or 0.1°C (1°F below -99.9F)
Display	0.5 inch LCD, 4 digits with LED Backlight	
Operating Temperature	Instrument: 32 to 125°F (0 to 50°C) Probe: -4 to 212°F (-20 to 100°C)	
Power Supply	3 AA Alkaline Batteries	
Operating Time (Battery)	Approx. 150 hours	
Dimensions	Instrument	W 3.2 x D 1.5 x H 6.5 inch (82 x 38 x 165 mm)
	Probe AP275	2.75 inch diameter
	Probe AP100	1.00 inch diameter
Accessories	1 x Rotating Vane Head (Your choice of APT275 or APT100) Extension Rod with Handle Grip, Flexible Rod 3 x AA 1.5V Alkaline Batteries, Operation Manual, Carrying Case Protective Rubber Boot and Splash-Proof Seal	
Options	USB Communications port RS232 Communications port Analog 0 or 5V output Additional Probe AP275 or APT100 Extra extension and/or flexible rods Custom Cable Lengths	

Figura 86. Hoja de características del anemómetro Kanomax 6813 según el propio fabricante

Aclaración: Este modelo no tenía la posibilidad de medir caudal sino solamente velocidad de viento. Para hallar el caudal se multiplica por el área correspondiente.

<http://www.kanomax-usa.com/anemometer/6813/6813.html> (Consultada a 7/10/2015)

- **Agilent/Keysight Technologies 34972A LXI – Adquisidor de Datos**

Junto a una tarjeta interna capaz de transmitir la señal de 20 sondas, este equipo fue el empleado para recoger la temperatura de los 20 termopares que se distribuyeron por la habitación para realizar los ensayos. Es un equipo de alta precisión, caro y con un calibrado que asegura que las lecturas obtenidas son fiables.

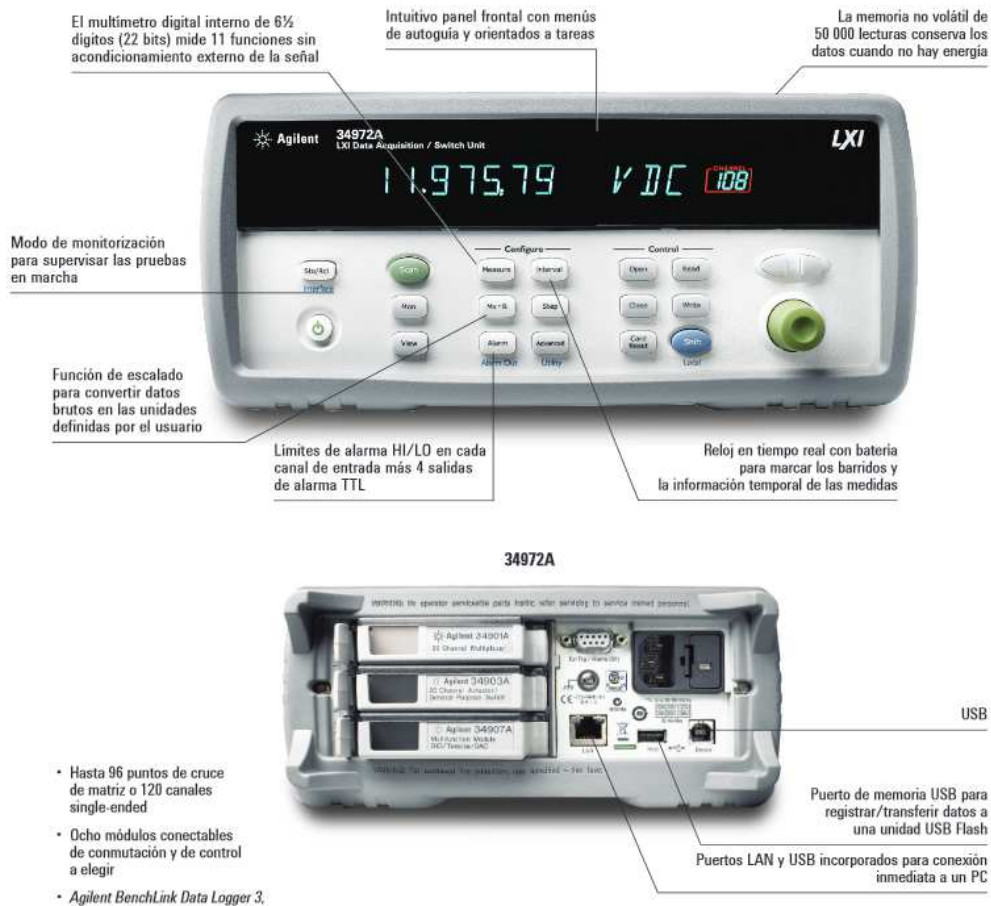


Figura 87. Imagen del equipo empleado como adquisidor de datos

Aclaración: Este modelo tenía la posibilidad de grabar los resultados a USB, función que se empleó dada la extensión de los ensayos, cuyos datos asociados superaban la memoria interna del dispositivo y hubieran obligado a parar los ensayos o a machacar los datos adquiridos.

<http://www.keysight.com/en/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?&cc=ES&lc=eng> (Consultada a 28/10/2015)

• **Agilent/Keysight Technologies 34972A LXI – Adquisidor de Datos**



Figura 88. Imagen del equipo empleado como adquisidor de datos

Aclaración: Este modelo tenía la posibilidad de grabar los resultados a USB, función que se empleó dada la extensión de los ensayos, cuyos datos asociados superaban la memoria interna del dispositivo y hubieran obligado a parar los ensayos o a machacar los datos adquiridos.

<http://www.keysight.com/en/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?&cc=ES&lc=eng> (Consultada a 28/10/2015)

ANEXO C: DATOS DE LOS ENSAYOS DE CAUDAL

- **Comparación de caudales en horizontal.**

Tabla 13. Datos de caudales para los dispositivos en posición horizontal

Ventilador	RADFAN (Competencia)	DAREC (2ª envolvente)
Velocidad media aire [m/s]	0,65	0,37
Área [m2]	0,01	0,0192
Caudal [m3/s]	0,0065	0,007104
Caudal [m2/h]	23,4	25,57
Comparación		+ 8,5%

Aclaración: Las velocidades son el resultado de una media aritmética de varias mediciones realizadas a lo largo de la salida de aire de los dispositivos. Las áreas son precisamente las de salida de dichos dispositivos.

- **Comparación de caudales al pasar de horizontal a vertical, ambos con rejillas a la salida de 90°.**

Tabla 14. Datos de caudales para el DAREC con los ventiladores en posición horizontal y vertical

Ventilador	DAREC (Horizontal)	DAREC (Vertical)
Velocidad media aire [m/s]	0,37	2,06
Área [m2]	0,0192	2x0,002217
Caudal [m3/s]	0,007104	0,009134
Caudal [m2/h]	25,57	32,88
Comparación		+ 28,6%

Aclaración: La velocidad del DAREC vertical es la medida con el túnel de viento, por lo que el área citada es únicamente la de salida del ventilador. Para hacer la comparación equivalente hay que tener en cuenta que el DAREC con los ventiladores en posición vertical también tiene dos ventiladores por lo que dicho área la duplicamos.

- **Datos experimentales de los 3 ventiladores medidos a 3 tensiones (velocidades) diferentes.**

Se adjunta únicamente la tabla con dichos datos y un pequeño comentario aclaratorio, ya que el punto “8.4.3. Mediciones de los 3 ventiladores a 3 tensiones” incluye toda la explicación requerida para comprender dichos datos.

Tabla 15. Datos correspondientes al ensayo de caudal para 3 ventiladores a 3 tensiones diferentes

Ventilador	Tensión	Posición	Libre abajo	Rejillas	M/S	CAUDAL MEDIDO [M3/H]	Factor Corrección	CAUDAL REAL [M3/H]
60 Silenc.	12	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		2,31	18,43	-	18,43
60 Silenc.	12	Vertical	SI	NO	2,3	18,35	-	18,35
60 Silenc.	12	Vertical	SI	SI (Planas)	2,1	16,76	-	16,76
60 Silenc.	12	Vertical	SI	SI* Protec C	2,2	17,56	-	17,56
60 Silenc.	12	Vertical	SI	SI (90 º)	2,06	16,44	-	16,44
60 Silenc.	7,46	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		1,6	12,77	-	12,77
60 Silenc.	7,46	Vertical	SI	NO	1,55	12,37	-	12,37
60 Silenc.	7,46	Vertical	SI	SI (Planas)	1,42	11,33	-	11,33
60 Silenc.	3,84	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		0,8	6,38	-	6,38
60 Silenc.	3,84	Vertical	SI	NO	0,78	6,22	-	6,22
60 Silenc.	3,84	Vertical	SI	SI (Planas)	0,74	5,90	-	5,90
						Factor de corrección		
70 V2	12	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		3,57	37,40	1,05	39,10
70 V2	12	Vertical	SI	NO	3,56	37,29	-	38,99
70 V2	12	Vertical	SI	SI (Planas)	3,25	34,05	-	35,60
70 V2	7,06	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		2,41	25,25	1,03	26,07
70 V2	7,06	Vertical	SI	NO	2,37	24,83	-	25,63
70 V2	7,06	Vertical	SI	SI (Planas)	2,15	22,52	-	23,25
70 V2	3,44	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		1,18	12,36	1,05	13,03
70 V2	3,44	Vertical	SI	NO	1,15	12,05	-	12,70
70 V2	3,44	Vertical	SI	SI (Planas)	1,03	10,79	-	11,38
70 V1	12	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		4,43	46,41	0,99	45,90
70 V1	12	Vertical	SI	NO	4,4	46,09	-	45,59
70 V1	12	Vertical	SI	SI (Planas)	3,88	40,65	-	40,20
70 V1	6,82	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		2,94	30,80	0,99	30,60
70 V1	6,82	Vertical	SI	NO	2,93	30,69	-	30,50
70 V1	6,82	Vertical	SI	SI (Planas)	2,64	27,66	-	27,48
70 V1	3	Vertical	FLUJO LIBRE DEL TODO		1,39	14,56	1,05	15,30
70 V1	3	Vertical	SI	NO	1,38	14,46	-	15,19
70 V1	3	Vertical	SI	SI (Planas)	1,25	13,09	-	13,76

Aclaración: Los 3 ventiladores son los ya explicados en el punto correspondiente y las tensiones son las necesarias para que cada ventilador gire al 100%, 66% y 33% de su velocidad nominal. La posición es en vertical para todas las mediciones, y para cada combinación se mide a flujo libre fuera del dispositivo, dentro del dispositivo sin rejillas y dentro del dispositivo con rejillas planas. Se aplica factor de corrección cuando la medida a flujo abierto fuera del dispositivo difiere de la suministrada por el fabricante.

ANEXO D: DATOS DE LAS PRUEBAS TÉRMICAS

MODELO A

- **Comparación de temperaturas ficticias**

Tabla 16. Diferencia máxima, mínima y media entre las temperaturas ficticias durante los 5 ensayos

		Diferencia [°C] entre T ^a Sup y T ^a Inf	Diferencia [°C] entre T ^a Cerca y T ^a Lejos
SIN DAREC	Máximo	1,8	0,3
	Mínimo	0,5	0,0
	Medio	1,5	0,1
DAREC 60, 10[V]	Máximo	1,3	0,2
	Mínimo	0,2	0,0
	Medio	1,0	0,1
DAREC 60, 5[V]	Máximo	1,6	0,2
	Mínimo	0,2	0,0
	Medio	1,2	0,1
DAREC 80, 10[V]	Máximo	1,5	0,3
	Mínimo	0,3	0,0
	Medio	1,2	0,1
DAREC 80, 5[V]	Máximo	1,4	0,1
	Mínimo	0,5	0,0
	Medio	1,3	0,1

Aclaración: Una vez definidas las 4 temperaturas ficticias se calcula la diferencia de temperaturas entre superior e inferior y entre cerca y lejos. Estos dos datos se calculan para cada muestra a lo largo de los 5 ensayos. Finalmente se extraen para cada ensayo los valores máximos, mínimos y medios.

- **Contraste del tiempo de mejora con dos sondas de referencia**

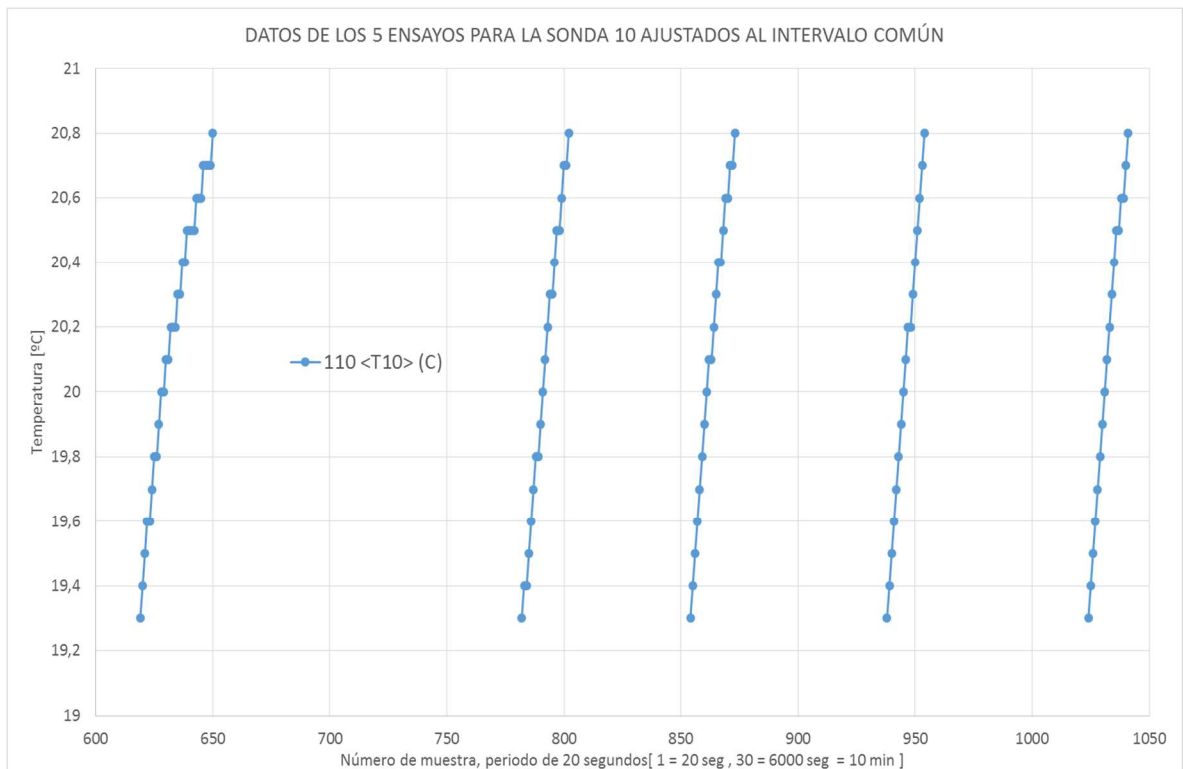


Figura 89. Intervalo común de subida de temperatura para los 5 ensayos mostrado en la sonda 10

Aclaración: Para calcular la mejora observamos cuanto tiempo necesitó la sonda 10 en cada uno de los ensayos para subir el mismo intervalo de temperatura. Los ensayos son 1, 2, 3, 4 y 5 de izquierda a derecha. Representan respectivamente a sin DAREC, DAREC de 60 a 10 y 5 [V] y DAREC de 80 a 10 y 5 [V]. La siguiente tabla recoge la cuantificación del tiempo empleado en cada ensayo para subir la misma diferencia de temperatura.

Tabla 17. Diferencia máxima, mínima y media entre las temperaturas ficticias durante los 5 ensayos

Ensayo	SIN DAREC	DAREC 60, 10V	DAREC 60, 5V	DAREC 80, 10V	DAREC 80, 5V
Número de muestras	32	21	20	17	18
Tiempo	10' 40"	7'	6' 40"	5' 40"	6'
Reducción del tiempo respecto a SIN DAREC		35%	37%	47%	43%

ANEXO E: DATOS DE LAS PRUEBAS TÉRMICAS

MODELO B

- **Comparación de temperaturas ficticias**

De acuerdo a las sondas mostradas en la Figura 77, la temperatura ficticia superior es la media de las sondas 4 hasta 13, es decir de 10 sondas. La temperatura ficticia inferior es la media de las sondas localizadas a 1 metro de altura, que son las sondas entre el 14 y el 20, es decir 7 sondas.

Tabla 18. Explicación de las temperaturas ficticias para el modelo de pruebas B

Temperatura ficticia = Promedio de las sondas	
<i>Superior</i>	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
<i>Inferior</i>	14 15 16 17 18 19 20

Tabla 19. Temperaturas media superior e inferior para el modelo de prueba B y diferencia media de temperaturas

Ensayo	Tª Superior Media	Tª Inferior Media	Diferencia media
Sin DAREC	25'2 [°C]	23 [°C]	2'2 [°C]
Con DAREC	25'6 [°C]	24'1 [°C]	1'5 [°C]
Reducción de la diferencia media al incluir el DAREC			32 %

Aclaración: Una vez definidas las 2 temperaturas ficticias se calcula, para cada muestra a lo largo del ensayo, el valor promedio. Posteriormente se restan y se obtiene la diferencia media de temperaturas sobre la cual finalmente se calcula la mejora.