



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos**

**Área de Conocimiento Máquinas y Motores Térmicos**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

---

**Diseño y modelado de una enfriadora de propano para  
aplicaciones de condensación de vapor atmosférico**

---

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autora: Alba María Camacho Beret

Tutor: Bernardo Peris Pérez

MÁLAGA, mayo de 2025



## Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño, selección de componentes reales y modelado de una enfriadora de propano destinada a aplicaciones de condensación de vapor atmosférico.

El punto de partida del trabajo es el análisis termodinámico del ciclo de compresión de vapor, a partir del cual se podrá realizar la selección de los componentes principales de la instalación.

Una vez definidos estos componentes, se desarrolla un modelo en Excel que permite simular distintos puntos de funcionamiento de forma automatizada. Para los componentes cuyos fabricantes proporcionen curvas polinómicas, se utilizarán dichas curvas para su modelización. En caso de que las curvas no estén disponibles he implementado macros en VBA que permiten la interacción entre el modelo en Excel y los programas de cálculo de los fabricantes de forma automatizada.

A partir de este modelo, y una vez seleccionados los componentes reales, se puede simular el mapa teórico de operación de la enfriadora, analizando parámetros clave como son el coeficiente de operación o la potencia frigorífica que es capaz de proporcionar. Esto además de permitir evaluar el comportamiento de la enfriadora en diferentes condiciones, también posibilita realizar futuros estudios para optimizar y seleccionar configuraciones más eficientes.

Con este trabajo se pretende facilitar y agilizar el análisis del comportamiento de la enfriadora. De este modo, integra conocimientos en refrigeración y termodinámica, con herramientas de programación orientadas a automatizar el proceso.

## Palabras clave

Propano, Enfriadora, Modelización, Macros, Refrigeración.





## Abstract

The present Bachelor's Degree Final Project consists in the design, selection of real components and modeling of a propane chiller for atmospheric steam condensation applications.

The starting point of the project is the thermodynamics analysis of the steam compression cycle, from which the main components of the system can be selected.

Once the components have been defined, an Excel model is developed in which different operating points can be simulated automatically. For components whose manufacturers provide polynomial curves, these curves shall be used for their modelling. In case the curves are not available, macros have been implemented in VBA the allow interaction between the model in Excel and the calculation programs of the manufacturers in an automated way.

Based on this model, and once the real components have been selected, it is possible to simulate the theoretical operating map of the chiller by analyzing key parameters such as the coefficient of performance and the cooling capacity it can provide. In addition to evaluating the chiller's behavior under various operating conditions, this also enables future studies aimed at optimizing the system and selecting more efficient configurations.

This project aims to facilitate and speed up the analysis of chiller behavior. Thus, it integrates knowledge in refrigeration and thermodynamics with programming tools aimed at automating the process.

## Keywords

Propane, Chiller, Modeling, Macros, Refrigeration.





## Agradecimientos

No puedo decir que estos años han sido tan buenos como imaginaba que iban a ser. De hecho, esta etapa me ha hecho ser una persona totalmente diferente. En parte, estoy contenta porque no he estado sola en el camino, mis padres siempre han estado ahí apoyándome y confiando en mí desde el minuto uno. Si a alguien le debo estar escribiendo hoy esto, es a ellos, con sus frases típica, como *“tranquila, el trabajo duro da su fruto”* o cuando conseguía algo *“¿Ahora no lloras no?”*, les debo todo y no tendré vida para devolverle todo lo que han hecho y hacen por mí.

En mitad de todo el caos y lo que conlleva convivir con desconocidos fuera de casa, llegó Antonio para salvarme, porque literalmente es lo que hizo. Él también tiene gran parte de culpa de que haya llegado hasta aquí, la persona que se ha tragado todos mis llantos, enojos, desesperación y a pesar de todo siempre ha estado ahí dándome ánimos, sin dejar que decayera.

También quiero agradecer a mis amigas porque a pesar de no vernos durante meses, siempre me han hecho saber lo orgullosas que están de mí, ellas saben que el camino no ha sido fácil, ni académica ni personalmente, y contar con su apoyo siempre ha sido esencial para mí.

A mis abuelas, porque casi tenían más ganas de que terminará que yo, me hace feliz saber que podrán verme terminar la carrera.

Finalmente, me gustaría hacer mención especial a Bernardo, mi tutor. Gracias porque es de los pocos profesores que me alegro de haber encontrado en este camino. También quiero agradecerle por escucharme y aconsejarme, tanto en lo académico como en lo personal.





## Lista de acrónimos

AWG	Atmospheric Water Generator (Generador Atmosférico de Agua)
CFC	Clorofluorocarbono
COP	Coefficient of Performance (Coeficiente de Rendimiento)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Calentamiento Global)
HC	Hidrocarburos
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
HP	High Pressure Side (lado de alta presión)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)
LP	Low Pressure Side (lado de baja presión)
PCA	Potencial de Calentamiento Atmosférico
TEWI	Total Equivalent Warming Impact (Impacto Total Equivalente del Calentamiento Global)
VBA	Visual Basic for Applications
VBE	Editor Visual Basic
VEA	Válvula de expansión automática
VEE	Válvula de expansión electrónica
VET	Válvula de expansión termostática





## Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Alcance	5
1.5 Descripción del documento	6
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Enfriadoras de propano	7
2.2 Marcas comerciales	9
2.2.1 Compresores	9
2.2.1.1 Danfoss	14
2.2.1.2 Copeland	15
2.2.1.3 Bitzer	15
2.2.1.4 Frascold	15
2.2.2 Evaporador	16
2.2.2.1 SWEP	20
2.2.2.2 Alfa Laval	20
2.2.2.3 Danfoss	20
2.2.2.4 Deltacoils	20
2.2.3 Baterías	21
2.2.3.1 Deltacoils	22
2.2.3.2 Alfa Laval	22
2.2.3.3 Kelvion	22
2.2.4 Válvulas	23
2.2.5 Componentes extra	26
2.2.6 Generadores atmosféricos de agua	32
2.2.6.1 Genaq	32
2.2.6.2 Aquaer Generator	33
2.2.6.3 Watergen	33
2.3 Condensación de vapor atmosférico	33
2.4 Proceso de desescarche	39
2.5 Normativa	41
2.5.1 Normativa de seguridad de refrigerantes inflamables	41
2.5.2 Normativa sobre equipos a presión y seguridad	41
2.5.3 Normativa medioambiental y gases refrigerantes	41
2.5.4 Normativa sobre eficiencia energética	42



CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA	43
3.1 Condiciones de diseño	43
3.2 Modelado del ciclo	43
3.3 Procedimiento de diseño de componentes	51
3.3.1 Compresor	51
3.3.1.1 Copeland	51
3.3.1.2 Danfoss	52
3.3.1.3 Frascold	53
3.3.1.4 Bitzer	54
3.3.2 Evaporador	63
3.3.3 Condensador	70
3.3.4 Válvula	76
3.3.5 Tuberías	81
3.3.6 Ventilador	84
3.4 Desescarche	86
3.5 Metodología de modelado del ciclo	86
3.5.1 Modelo	86
3.5.2 Procedimiento de cálculo	87
3.5.3 Programación de macros	88
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	97
4.1 Selección de componentes	97
4.2 Mapeado de funcionamiento en distintas condiciones de operación	99
4.3 Presupuesto	106
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXO 1	117
ANEXO 2	119
ANEXO 3	125
ANEXO 4	129
ANEXO 5	131
ANEXO 6	135
ANEXO 7	143

## Índice de figuras

Figura 1. Efecto temperatura para diferentes refrigerantes.	2
Figura 2. Coeficiente de rendimiento para diferentes refrigerantes.	2
Figura 3. Clasificación refrigerantes.	8
Figura 4. Tipos de compresores.	9
Figura 5. Compresor alternativo o de pistón.	10
Figura 6. Compresores herméticos.	11
Figura 7. Compresor semihermético.	11
Figura 8. Compresor abierto.	12
Figura 9. Compresor de paleta estacionaria.	13
Figura 10. Compresor scroll.	13
Figura 11. Compresor de tornillo.	14
Figura 12. Evaporador Microcanal.	17
Figura 13. Evaporador de tubo y aletas.	17
Figura 14. Evaporador de Placas.	18
Figura 15. Evaporador de tubos descubiertos.	18
Figura 16. Evaporador de tubos coaxial.	19
Figura 17. Evaporador carcasa – tubos.	19
Figura 18. Tubo capilar.	24
Figura 19. Válvula de expansión termostática.	25
Figura 20. Válvula de expansión electrónica.	25
Figura 21. Válvula de expansión automática.	26
Figura 22. Termostato.	27
Figura 23. Válvula solenoide normalmente abierta.	28
Figura 24. Presostato.	28
Figura 25. Filtro deshidratador.	29
Figura 26. Visor de líquido.	29
Figura 27. Válvula de seguridad.	30
Figura 28. Sonda de temperatura.	30
Figura 29. Transductor de presión.	31
Figura 30. Obús.	31
Figura 31. Válvula antirretorno.	32
Figura 32. Diagrama psicrométrico.	35

Figura 33. Temperatura de bulbo seco.	35
Figura 34. Temperatura de bulbo húmedo.	36
Figura 35. Temperatura de punto de rocío.	36
Figura 36. Humedad específica (g/kg).	37
Figura 37. Humedad relativa (%).	37
Figura 38. Curva de saturación.	38
Figura 39. Entalpía (kcal/kg).	38
Figura 40. Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg).	39
Figura 41. Diagrama de Mollier R-290.	45
Figura 42. Ciclo teórico.	49
Figura 43. Puntos ciclo termodinámico con Excel.	50
Figura 44. Condiciones Copeland.	51
Figura 45. Lista compresores Copeland Scroll.	52
Figura 46. Condiciones CoolSelector2.	52
Figura 47. Lista compresores herméticos Danfoss.	53
Figura 48. Lista compresores de tornillo semiherméticos Danfoss.	53
Figura 49. Condiciones Frascold.	53
Figura 50. Compresor Frascold.	54
Figura 51. Condiciones Bitzer semihermético.	55
Figura 52. Lista compresores semiherméticos Bitzer.	56
Figura 53. Condiciones Bitzer scroll.	56
Figura 54. Lista compresores scroll Bitzer.	57
Figura 55. Límites compresor GSP80485ZL-40S.	58
Figura 56. Información compresor GSP80485ZL-40S.	59
Figura 57. Compresor a 75 Hz.	60
Figura 58. Coeficientes polinomio compresor.	60
Figura 59. Parámetros polinomio compresor.	61
Figura 60. Resultados frecuencia interpolada.	62
Figura 61. Salidas compresores.	62
Figura 62. Composición de anticongelante.	64
Figura 63. Datos de entrada SWEP.	65
Figura 64. Lista opciones evaporadores.	66
Figura 65. Información evaporador B35TH4.	67
Figura 66. Parámetros de entrada Macro SWEP.	69

Figura 67. Parámetros de salida macro SWEP.	69
Figura 68. Datos del ciclo tras ejecución macro evaporador.	70
Figura 69. Parámetros entrada Deltacoils.	71
Figura 70. Calculo caudal de aire condensador.	71
Figura 71. Cálculo Deltacoils.	72
Figura 72. Resultados Deltacoils.	73
Figura 73. Datos de salida software Deltacoils.	74
Figura 74. Comparativa resultados.	75
Figura 75. Parámetros salida macro Deltacoils.	75
Figura 76. Parámetros de entrada software Carel.	77
Figura 77. Lista VEE carel.	78
Figura 78. VEE E2V35ZSM03 Carel.	79
Figura 79. Capacidad para un % de trabajo.	79
Figura 80. Kv Carel.	80
Figura 81. Selección tuberías. Línea de líquido.	81
Figura 82. Opciones tubería línea de líquido.	82
Figura 83. Opciones tubería. Línea de descarga.	82
Figura 84. Opciones tubería. Línea de aspiración.	83
Figura 85. Carga de refrigerante.	84
Figura 86. Punto óptimo ventilador.	85
Figura 87. Entradas y salidas modelo.	87
Figura 88. Procedimiento de cálculo.	88
Figura 89: Código Python coordenadas.	89
Figura 90: Coordenadas Deltacoils.	90
Figura 91. Código pegar en Excel Deltacoils.	90
Figura 92. Código principal Deltacoils.	91
Figura 93. Código pegar en Excel SWEP.	92
Figura 94. Código principal SWEP.	93
Figura 95. Macro lista parámetros entrada Deltacoils.	95
Figura 96. Base de datos condensador.	96
Figura 97. Circuito frigorífico.	98
Figura 98. COP frente $P_{\text{cond}}$ y $P_{\text{evap}}$ .	99
Figura 99. Trabajo compresores frente potencia frigorífica.	100
Figura 100. Potencia frigorífica frente frecuencias.	101



Figura 101. COP frente temperatura ambiente por frecuencia.	102
Figura 102. Rendimiento isentrópico frente frecuencias.	103
Figura 103. Rendimiento isentrópico frente ratio de presiones.	104
Figura 104. Rendimiento isentrópico y global frente relación de presiones.	105



## Índice de tablas

Tabla 1. Datos de partida.	44
Tabla 2. Punto salida evaporador saturado.	46
Tabla 3. Punto entrada compresor.	46
Tabla 4. Punto saturado salida de condensador.	46
Tabla 5. Punto entrada válvula de expansión.	47
Tabla 6. Punto entrada evaporador.	47
Tabla 7. Punto 2 isentrópico.	48
Tabla 8. Punto entrada condensador.	48
Tabla 9. Tabla datos glicol al 40%.	68
Tabla 10. Comparativa datos teóricos y SWEF.	68
Tabla 11. Cálculo Kv.	80
Tabla 12. Componentes.	97
Tabla 13. Presupuesto.	107



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Las preocupaciones han ido variando a lo largo de los años en lo que a la industria de refrigeración concierne, tomando en los últimos años gran valor la preocupación por la contaminación medioambiental y los compromisos internacionales para la reducción de emisiones contaminantes. Por ello, se estableció en un primer lugar el **Protocolo de Montreal**, con una prohibición progresiva de los refrigerantes que contribuían al agotamiento de la capa de ozono, como son los CFC y HCFC. Como sustitución a estos surgieron lo HFC, siendo menos perjudiciales que los anteriores ya que no dañan la capa de ozono, sin embargo, contribuyen al efecto invernadero, debido a su elevado GWP.

Se buscaron nuevas soluciones y con ellas llegaron nuevas normativas, a nivel internacional y europeo. Entre estas destacan la normativa **F-Gas** [1], el Pacto Verde Europeo (**European Green Deal**) y el paquete legislativo conocido como **Fit for 55**, formado por una serie de leyes interrelacionadas sobre clima y energía.

Estas regulaciones pretenden que en 2030 se hayan reducido las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% y en 2050 haber alcanzado la neutralidad climática. [2]

En este contexto, los refrigerantes naturales como el propano, amoníaco o dióxido de carbono, han ganado todo el protagonismo. Destacando por su bajo o nulo GWP, alta eficiencia energética y amplia disponibilidad. Sin embargo, estos refrigerantes tienen alta inflamabilidad lo que requiere un diseño que cumpla con las estrictas medidas de seguridad.

Haciendo un análisis entre distintos refrigerantes empleados en un ciclo de compresión de vapor se puede observar en la *Figura 1* como el R-290 presenta la mayor capacidad de refrigeración entre todos.

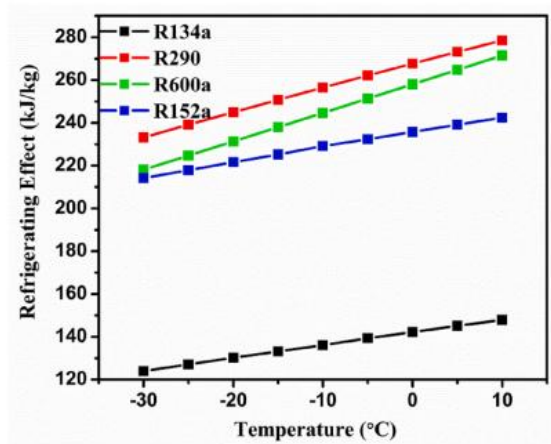


Figura 1. Efecto temperatura para diferentes refrigerantes.

Fuente: [3]

Si se examina el COP vuelve a destacar el mismo refrigerante, ya que es el que presenta el rango más amplio de valores con mejor COP.

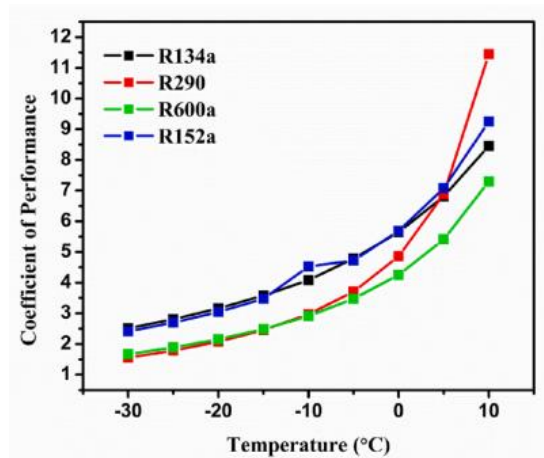


Figura 2. Coeficiente de rendimiento para diferentes refrigerantes.

Fuente: [3]

Por tanto, eso reafirma que el propano surge como una opción muy favorable para aplicaciones de refrigeración.

Dentro de este marco, se desarrollan tecnologías como la generación de agua atmosférica. No es ningún secreto que un gran problema mundial es la escasez de agua, actualmente hay 2300 millones de personas viviendo en lugares con estrés hídrico. Este

problema va en aumento, debido a los efectos del cambio climático y a la densidad de población.

Esta situación se intenta solucionar con proyectos como la desalinización del agua de mar o la construcción de más presas y pozos, sin embargo, esto no es suficiente. Se estima que en la atmósfera hay suficiente agua como para reducir los efectos de la escasez hidráulica. Por ello, se están haciendo estudios encaminados a encontrar formas de extraer el agua atmosférica, con el uso de materiales absorbentes y desecantes y ciclos de compresión de vapor. [4]

La generación de agua atmosférica es un proceso que extrae agua de la humedad presente en el aire ambiente, para ser apta para el consumo humano debe ser tratada mediante procesos de filtración y purificación ya que contiene impurezas. Este proceso no solo ayuda a disminuir el problema de la escasez de agua, sino que además no tiene ningún impacto negativo en el medio ambiente, ya que la humedad eliminada se repone de forma natural mediante el ciclo hidrológico. Para transformar este vapor de agua en líquido requiere su condensación, el vapor de agua se convertirá en agua enfriando el aire por debajo de su temperatura de rocío. El enfriamiento necesario para esta condensación se proporciona principalmente mediante sistemas convencionales de refrigeración por compresión de vapor. Además, se puede hacer uso de la recuperación de condensado de los sistemas HVAC durante su funcionamiento estacional para obtener agua como subproducto. [5]

La generación de agua depende directamente de la capacidad de refrigeración del ciclo de compresión de vapor y la cantidad y propiedades del aire que entra al sistema. Por ello, en condiciones climáticas adversas puede que no proporcionen la cantidad de agua necesaria y esta no sea la mejor solución.

## **1.2 Justificación**

Este Trabajo de Fin de Grado surge debido a unas prácticas realizadas anteriormente en una empresa llamada Genaq. Esta empresa iba a llevar a cabo el desarrollo de un proyecto con la participación de distintas universidades andaluzas. Se me presentó la oportunidad de participar en parte de este proyecto y consideré que era una oportunidad que no debía dejar pasar.

El proyecto combina la necesidad del diseño de una enfriadora eficiente y sostenible, con el uso de refrigerantes naturales. Además, tiene un aporte de valor añadido por su aplicación en tecnologías innovadoras como es la condensación de vapor atmosférico. No solo se busca cumplir con las regulaciones ambientales vigentes, sino también ofreciendo un alto rendimiento energético bajo condiciones de carga variable.

En este contexto, el propano es reconocido por sus ventajas medioambientales y termodinámicas, pero su aplicación optimizada en enfriadoras industriales con control de capacidad no está muy documentada hoy en día y mucho menos cuando se enfoca a la condensación atmosférica de agua.

Por tanto, en lo que a este Trabajo Fin de Grado se refiere, nace por la necesidad de estudiar y diseñar una enfriadora usando un refrigerante natural. En su diseño se busca obtener el mejor rendimiento posible en distintas condiciones de funcionamiento y una alta eficiencia. El interés reside en varios aspectos innovadores, como son el uso del propano, la utilización de un compresor con variador de frecuencia y el enfoque final en la condensación de vapor atmosférico, buscando siempre el mejor rendimiento en distintas condiciones de carga. También, es importante mencionar la modelización de este diseño buscando que se pueda llevar a cabo de forma automatizada.

De este modo, se contribuye al diseño y análisis de una solución más eficiente y sostenible que las alternativas convencionales.

### **1.3 Objetivos**

El principal objetivo del desarrollo de este trabajo es diseñar, modelar y analizar el rendimiento de una enfriadora utilizando como refrigerante propano. Para lograr estos propósitos, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- ❖ Análisis termodinámico del ciclo: una vez establecidas las condiciones nominales de diseño y haciendo uso de herramientas de cálculo como Excel y su librería CoolProp, determinar los estados y propiedades del refrigerante en los puntos clave del ciclo.
- ❖ Selección y dimensionamiento de componentes comerciales: identificar compresores, batería condensadora, evaporador y válvula de expansión a partir de catálogos y software de selección de fabricantes, asegurando su compatibilidad con R-290.

- ❖ Automatización del proceso: para hacer el proceso mucho más ágil se creará una macro en VBA Excel que ejecutará automáticamente los programas de selección de componentes.
- ❖ Mapeado y análisis del comportamiento del ciclo: para garantizar la eficiencia de la enfriadora en distintas condiciones de operación, se analiza su funcionamiento bajo distintas condiciones de carga, plena y parcial.

#### **1.4 Alcance**

El alcance de este trabajo estará marcado por el análisis teórico de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor aplicado al diseño y modelado de una enfriadora utilizando como refrigerante R-290.

En él se incluye en primer lugar el establecimiento de las especificaciones de diseño y condiciones de operación, así como los cálculos termodinámicos del ciclo de refrigeración. Posteriormente, se realiza la selección de manera justificada de los principales componentes y, por último, el rendimiento del sistema bajo distintas condiciones de carga.

Como apoyo al análisis del rendimiento del ciclo, he desarrollado un código en Excel mediante programación en macros VBA, que permite automatizar la extracción de datos de softwares y realizar simulaciones de forma sistemática. Esta parte ha supuesto una ampliación del trabajo, yendo más allá del diseño puramente teórico y facilitando la generación de una base de datos propia.

Cabe destacar que hay ciertos aspectos que quedan fuera del alcance de este trabajo, como son la construcción y ensayo del prototipo físico de la enfriadora, el diseño de sistema auxiliares como el circuito eléctrico, el cableado o la programación de controladores. Tampoco se contempla un análisis detallado mediante dinámica de fluidos computacional de los flujos internos de los componentes.

Aunque el proyecto llevado a cabo por Genaq y las distintas universidades abarca mucho más, como es la conexión fotovoltaica, sistema configurable según la energía solar disponible y control buscando el mayor uso de fotovoltaica, esto queda fuera del alcance de mi trabajo, centrándome exclusivamente en lo citado anteriormente.

## 1.5 Descripción del documento

El presente documento está estructurado en seis capítulos, donde se expone el desarrollo de cada uno de forma individual:

❖ Capítulo 1: Introducción.

Pone en contexto el trabajo justificando la elección de éste y su relevancia, además se explica cuál es la motivación del estudio, los objetivos principales y se establece una visión general de cuál es el alcance y su estructura.

❖ Capítulo 2: Estado del Arte.

En este capítulo se presentan las propiedades específicas del propano como refrigerante, las características tanto de los componentes principales del sistema como de la condensación de vapor atmosférico y algunas de las marcas comerciales. También se incluye información sobre la normativa a seguir para este tipo de sistemas y sobre los procesos de desescarche que pueden ser aplicados al mismo.

❖ Capítulo 3: Materiales y metodología.

Descripción de las condiciones de diseño y cálculo teórico del ciclo, a partir del cual se realiza la selección de los componentes, con ayuda además de distintos softwares. Asimismo, se detalla el procedimiento seguido para el modelado del ciclo, así como las herramientas utilizadas (Excel, CoolProp, etc.). Por otro lado, se presenta el esquema del modelo desarrollado, con sus correspondientes entradas y salidas principales, además de incluir el diagrama de flujo que explica el procedimiento iterativo de cálculo del ciclo.

❖ Capítulo 5: Resultados.

Este capítulo recoge la selección final de componentes y el análisis de funcionamiento del ciclo bajo distintas condiciones de operación. Por último, se realiza un presupuesto estimado del sistema.

❖ Capítulo 6: Conclusiones.

Este capítulo cierra el trabajo destacando los logros obtenidos y las posibles mejoras que se podrían realizar en futuros desarrollos.

Se concluye la memoria, exponiendo la bibliografía utilizada como referencia.

## CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Enfriadoras de propano

El uso de refrigerantes ha evolucionado debido a la necesidad de mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental. Esta evolución se puede clasificar en cuatro etapas.

En la primera etapa, se empleaban sustancias como el CFC, seleccionadas únicamente por su eficacia en la transferencia de calor. Un ejemplo de este tipo de refrigerantes es el R-12. En la segunda etapa, con el desarrollo de la industria de la refrigeración, se introdujeron los HCFC, los cuales destacaban por su estabilidad química y su seguridad, sin embargo, eran altamente dañinos para la capa de ozono. Dentro de este grupo podemos incluir al R-22. En la tercera generación de refrigerantes, se encuentran los HFC, que destacaban por no afectar a la capa de ozono, pero por otro lado tenían un elevado PCA<sup>1</sup>. Por último, la cuarta generación se compone de refrigerantes HC con muy bajo PCA y alta eficiencia energética. También se hace referencia a las diferentes etapas como:

- Etapa 1: “Lo que funcionaba”.
- Etapa 2: “Seguridad y durabilidad”.
- Etapa 3: Protección del ozono”.
- Etapa 4: “Reducción del calentamiento global”.

Dentro de esta última generación se encuentra el R-290 una opción que parece ser muy viable debido a su mínimo impacto ambiental y buen rendimiento termodinámico. Sin embargo, un aspecto negativo de éste es su alta inflamabilidad, lo cual según la norma **UNE-EN 378:2017** lo clasifica como refrigerante A3. Los refrigerantes de clase 1 se caracterizan por no ser propagadores de llama, todo lo contrario a los de tipo 3. [6]

---

<sup>1</sup> El PCA se puede definir como una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, por lo general dióxido de carbono.

Clases de Seguridad		Por toxicidad	
		Baja toxicidad	Alta toxicidad
Por inflamabilidad	Sin propagación de llama	A1	B1
	Baja inflamabilidad	A2L	B2L
	Media inflamabilidad	A2L	B2L
	Alta inflamabilidad	A3	B3

Figura 3. Clasificación refrigerantes.

Fuente: [7]

Es importante destacar que la evolución de los refrigerantes ha sido marcada también por distintos acuerdos internacionales. Entre ellos destacan el **Protocolo de Montreal (1987)** el cuál estableció una reducción de producción y consumo de sustancias que dañaran la capa de ozono. Además, prohibió el comercio con los países que no fuesen partes del protocolo y estableció un sistema de licencias para la importación y exportación de sustancias controladas. Más tarde, en 1997 surgió el **Protocolo de Kioto**, éste se centró en reducir las emisiones de GEI. Actualmente el protocolo de Kioto ha sido reemplazado por el **Acuerdo de París (2015)**, su objetivo es reducir el calentamiento global a 1,5 grados centígrados.

El R-290 se ha posicionado como una opción muy viable debido a su alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Además, sus propiedades físicas, como una baja densidad del líquido, permite reducir la carga de refrigerante en los sistemas en comparación con otros gases. Otra propiedad importante es su alto calor latente de vaporización, lo que se traduce como que absorbe más energía al evaporarse, favoreciendo así la eficiencia de los intercambiadores de calor. También debido a lo anterior, el tamaño de las tuberías puede verse reducido en sistemas que utilizan este refrigerante, sin un aumento significativo en la caída de presión [8]. Sin embargo, no todo es positivo, la alta inflamabilidad de este gas supone ciertos desafíos en la seguridad y diseño del sistema.

He dicho anteriormente que el R-290 tiene un PCA prácticamente nulo, lo cual lo hace muy atractivo, no obstante, para evaluar el impacto ambiental total del sistema no basta con tener en cuenta solo las emisiones directas de refrigerante, sino también de su eficiencia energética. Para ello se emplea el TEWI.

Estudios recientes han demostrado que, en comparación con refrigerantes como el R-22 (HCFC) o el R-404a (HFC), el R-290 ofrece un COP superior, temperaturas de descarga más bajas y un menor costo de refrigerante. [9]

## 2.2 Marcas comerciales

Dentro de este apartado se comentarán y describirán los tipos principales de los componentes básicos del ciclo de refrigeración. Además, se enumerarán distintas marcas de cada uno de ellos, para posteriormente recurrir a estas para la selección de los componentes.

### 2.2.1 Compresores

La finalidad de este componente es comprimir el refrigerante de tal manera que se produzcan cambios de presión en este, provocando que se desplace por todo el circuito frigorífico. Debido a estos cambios de presión y también de temperatura, el refrigerante va cambiando de estado a su paso por los demás componentes del ciclo, como son evaporador, condensador y válvula de expansión. El compresor por tanto es el encargado de que el refrigerante recorra todo el circuito, aumentado la presión y la temperatura, provocando en los demás elementos cambios de estado, es por tanto el elemento principal del ciclo. [10]

Los tipos de compresores son:

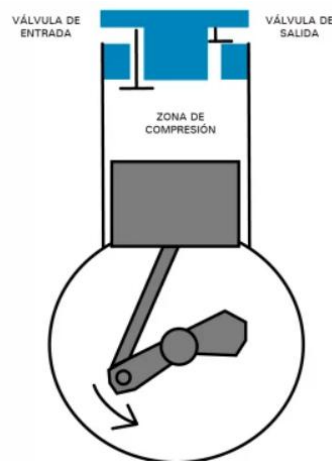


Figura 4. Tipos de compresores.

Fuente: [10]

### Compresores alternativos o de pistón:

Sus elementos principales son un pistón, cigüeñal y válvula de entrada. Para comprimir el refrigerante se acciona por medio de un motor eléctrico el cigüeñal, haciendo que el pistón tenga un desplazamiento alternativo. Al retroceder el pistón, se abre la válvula de entrada produciendo de esta forma la aspiración del refrigerante. Una vez el pistón llega al final de carrera, cambia su sentido, se cierra la válvula de entrada y de esta forma comprime el gas. Cuando el pistón llegue al extremo contrario, la válvula de descarga se abrirá debido a la fuerza del gas comprimido, dejando salir el vapor a alta presión.



*Figura 5. Compresor alternativo o de pistón.*

*Fuente: [10]*

### Compresores herméticos:

Como se puede observar en la *Figura 6* tienen una carcasa, que recubre tanto al compresor como al motor de accionamiento. Dicha carcasa está totalmente sellada lo que conlleva aspectos positivos y negativos. Por un lado, evita posibles fugas de refrigerante, pero por otro además de restringir los refrigerantes que pueden usarse, ya que no pueden deteriorar los materiales que lo componen, no puede repararse en caso de avería.



*Figura 6. Compresores herméticos.*

*Fuente: [10]*

#### Compresores semiherméticos:

Al contrario que los herméticos, este tipo de compresores permiten el acceso al mantenimiento y reparación, ya que están formados por dos carcasas independientes. Por otro lado, son restrictivos a la hora de elegir un refrigerante y existe un mayor riesgo de fugas.



*Figura 7. Compresor semihermético.*

*Fuente: [10]*

### Compresores abiertos:

En este tipo se encuentran en partes diferentes el motor y el compresor, y son unidos por una transmisión mecánica. Una ventaja respecto a los dos anteriores es su accesibilidad total para ser reparados, además de poder usar cualquier refrigerante sin restricciones. No obstante, tienen mayor riesgo de fugas. [10]



*Figura 8. Compresor abierto.*

*Fuente: [11]*

### Compresores rotativos:

Este tipo de compresores no cuentan con válvulas de aspiración, se caracterizan por un flujo continuo de compresión. Además, uno de sus componentes más importantes es el aceite, ya que es el encargado de lubricar y de la estanqueidad. [10]

### Compresores de paleta estacionaria:

Funciona con un rotor excéntrico y paletas deslizantes dentro de un cilindro. El rotor gira dentro de un cilindro fijo y las paletas se encuentran dentro de este rotor, estas se deslizan hacia afuera debido a la fuerza centrífuga. El refrigerante entra en el espacio que queda entre el rotor y la carcasa. A medida que el rotor gira, las paletas atrapan el gas y lo comprimen, finalmente el gas comprimido se descarga a alta presión.

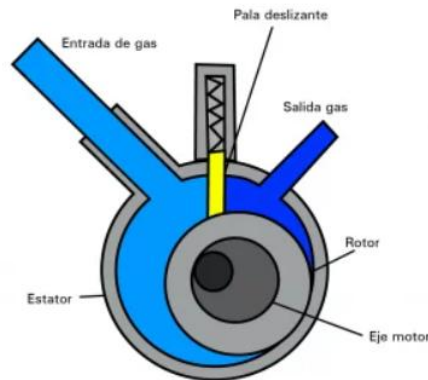


Figura 9. Compresor de paleta estacionaria.

Fuente: [10]

Compresores tipo scroll:

Está formado por dos espirales idénticas encajadas, una superior fija y otra móvil. La móvil es accionada por un motor eléctrico y rota sobre la primera. A medida que una rota, el espacio entre ambas es cada vez menor, comprimiendo el gas y dirigiéndolo hacia el centro de la espiral fija, aumentando su presión y posteriormente es expulsado hacia el condensador.

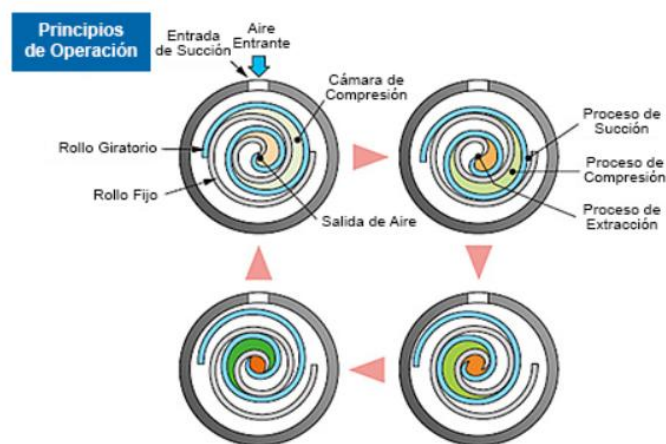


Figura 10. Compresor scroll.

Fuente: [12]

### Compresores de tornillo:

Este tipo de compresores suelen usarse en el diseño de ciclos de potencias medias y altas. Está compuesto por dos rotores acoplados entre sí, uno de ellos macho, con forma de lóbulos y conectado al motor eléctrico, y otro hembra cuyas hendiduras encajan perfectamente con los lóbulos del rotor macho. Tiene una capacidad de regulación que va del 10 al 100% gracias a una pieza llamada corredera, que abre o cierra la apertura del fluido a los rotores. Estos compresores son lubricados mediante inyección de aceite, el cual se separa del gas comprimido antes de salir del sistema mediante un separador de aceite, permitiendo que el refrigerante continúe limpio en el ciclo.



*Figura 11. Compresor de tornillo.*

*Fuente: [13]*

Una vez conocidos los principales tipos de compresores lo siguiente será saber que marcas comerciales existen para posteriormente elegir entre ellas el compresor más conveniente.

En el mercado existen numerosas marcas de fabricantes de compresores de distinta potencia, tecnología, rango de aplicación, etc. Entre ellas podemos destacar las siguientes.

#### **2.2.1.1 Danfoss**

Esta marca de Dinamarca proporciona compresores para una amplia gama de aplicaciones comerciales, como por ejemplo para máquinas de fabricación de hielo, cámaras frigoríficas, vitrinas, refrigeración de procesos, etc. Ofrecen compresores de velocidad variable

e inversor para obtener así un mayor control de parámetros como temperatura y humedad y una mayor eficiencia. Tienen distintos tipos de compresores según el tipo de refrigerante a utilizar clasificados como compresores para tipos de refrigerante A1, A2L y refrigerantes naturales. Además, disponen de un software de cálculo a partir del cual se puede obtener tanto el compresor que más se adapte a los parámetros de entrada como otros componentes del sistema, ya sean válvulas, tuberías, etc. [14]

### **2.2.1.2 Copeland**

Es una marca de Estados Unidos con más de 100 años de experiencia en el mercado. Sus compresores ofrecen la posibilidad de controlar la capacidad a través de la temperatura y eficiencia del sistema, también cuentan con un sistema de inyección de vapor el cual incrementa la eficiencia del sistema y capacidad frigorífica. Su electrónica integrada ayuda a controlar el consumo, además de facilitar la solución a posibles problemas. Esta marca también ofrece su propio software de cálculo. [15]

### **2.2.1.3 Bitzer**

Esta marca alemana es una de las más reconocidas a nivel mundial, ofrece una amplia gama de compresores tanto para aplicaciones industriales como comerciales, así como también para todo tipo de refrigerantes. Muchos de sus modelos son aptos para velocidades variables mediante variadores de frecuencia. Cuentan con su propio software a partir del cual se puede obtener el modelo más adecuado para las condiciones de trabajo y obtener información detallada para el compresor seleccionado en dicho punto. [16]

### **2.2.1.4 Frascold**

Esta marca italiana ofrece compresores para aplicaciones de refrigeración y climatización, industriales y comerciales. Sus modelos son compatibles con refrigerantes tradicionales, de bajo PCA y naturales, como por ejemplo el propano. También, ofrece una herramienta para la selección de compresores según las necesidades específicas del sistema. [17]

## 2.2.2 Evaporador

Consiste en un intercambiador de calor compacto a través del cual se transfiere calor entre dos circuitos, uno por el que circula el líquido refrigerante, fluido primario, y otro de agua u otro fluido secundario que evite la congelación, como por ejemplo agua glicolada.

Este componente es el encargado de transmitir con la máxima eficiencia posible, la energía térmica desde el ambiente a enfriar, en este caso el fluido secundario, al fluido que se está evaporando, es decir al refrigerante principal. [18]

Las formas de clasificar los evaporadores pueden ser varias, entre ellas:

### Función del medio a enfriar:

- ❖ **Aire – Refrigerante:** son los empleados en sistemas de expansión directa, utilizados en la mayoría de las cámaras frigoríficas. El aire a enfriar circula a través de un serpentín<sup>2</sup>, que contiene refrigerante en fase de expansión. El refrigerante absorberá el calor del aire haciendo que se reduzca su temperatura.
- ❖ **Refrigerante – Refrigerante:** este tipo de evaporadores son usados cuando las diferencias de temperatura de condensación y evaporación son considerablemente elevadas.
- ❖ **Líquido – Refrigerante:** empleados cuando el medio a enfriar es un líquido, como agua o mezclas de glicol. Se usa para instalaciones que utilizan un circuito secundario cuya función es ser anticongelante.

### Función de las condiciones de salida del refrigerante:

- ❖ **Inundados:** En este tipo de evaporadores el refrigerante no se evapora totalmente, lo que da lugar a una mezcla bifásica en la salida del evaporador, presentando muy buena transferencia de calor.
- ❖ **Secos:** El refrigerante si se evapora totalmente en el interior del evaporador y suele haber recalentamiento del vapor generado. Son los más utilizados.

---

<sup>2</sup> Se denomina serpentín o serpentina a un tubo de forma frecuentemente espiral, utilizado comúnmente para enfriar vapores provenientes de la destilación en un calderín y así condensarlos en forma líquida. [71]

Función de las características constructivas:

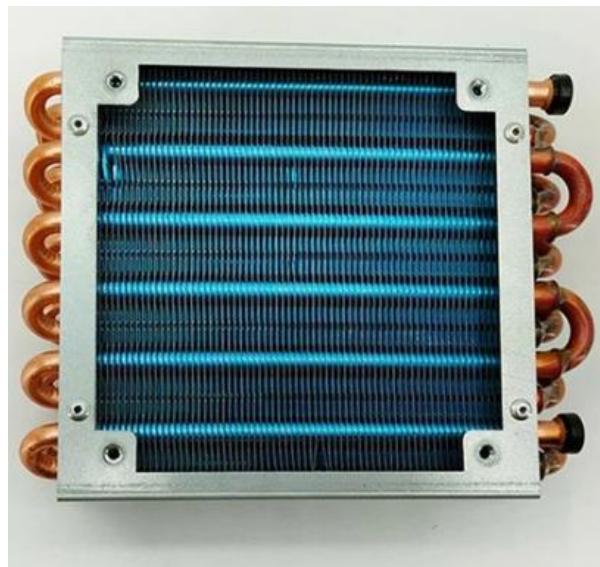
- ❖ **Microcanal:** está compuesto por tubos de microcanal y aletas, el refrigerante circula por los microcanales y el intercambio de calor con el aire se produce a través de las aletas.



*Figura 12. Evaporador Microcanal.*

*Fuente: [19]*

- ❖ **Tubos y aletas:** utilizan aire como fluido secundario. El refrigerante se evapora en el interior de los tubos y las aletas sirven para aumentar el área de transferencia de calor. Son utilizados mayormente en cámaras frigoríficas.



*Figura 13. Evaporador de tubo y aletas.*

*Fuente: [20]*

- ❖ **Placas:** al contrario que el tipo anterior, usa placas en lugar de tubos como elemento de transferencia de calor. Se utiliza como fluido secundario líquido o refrigerante, por tanto, las placas de metal sirven como medio de separación entre los dos fluidos.



*Figura 14. Evaporador de Placas.*

*Fuente: [21]*

- ❖ **Tubos descubiertos:** está formado por tubos sin aletas ni aislamiento, en cuyo interior circula el refrigerante. Este entra en estado líquido y finalmente se evapora por medio de absorción de calor del líquido que se encuentra en contacto con el exterior del tubo.



*Figura 15. Evaporador de tubos descubiertos.*

*Fuente: [22]*

- ❖ **Tubos coaxiales:** se compone de dos tubos concéntricos, por el tubo interior circula el refrigerante y la transferencia de calor se produce por la pared que separa ambos fluidos. Tienen buena capacidad de transferencia térmica y su diseño es bastante compacto.



Figura 16. Evaporador de tubos coaxial.

Fuente: [23]

- ❖ **Carcasa – Tubos:** este tipo se compone de una carcasa cilíndrica que cubre una serie de tubos. Por el interior de estos tubos circula el refrigerante y alrededor de ellos se encontrará el agua o mezcla glicolada. Este tipo de evaporadores tienen una eficiencia muy alta, por ello se usan comúnmente en aplicaciones industriales.

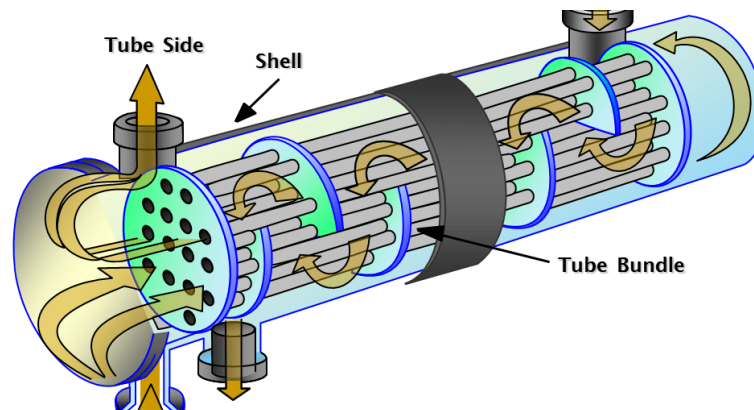


Figura 17. Evaporador carcasa – tubos.

Fuente: [24]

Esta podría ser una clasificación general de los tipos de evaporadores. Por otro lado, las marcas comerciales más utilizadas en este tipo de sistemas serían, SWEP, Alfa Laval, Danfoss y Deltacoils, entre otras.

### **2.2.2.1 SWEP**

Esta marca con sede en Suiza es líder mundial en intercambiadores de calor de placas soldadas, utilizados tanto para aplicaciones industriales como de climatización (HVAC). Además, disponen de un software propio para la selección de modelos. [25]

### **2.2.2.2 Alfa Laval**

Es una empresa dedicada a proveer productos en las áreas de transferencia de calor, separación y manejo de fluidos. Cuenta con una gran variedad de evaporadores de placas, de tubos y aletas y de superficie raspada. Al igual que el anterior también ofrece un software para la selección de modelos. [26]

### **2.2.2.3 Danfoss**

Esta marca nombrada también en el apartado de compresores, 2.2.1.1, ofrecen intercambiadores de calor de placas soldadas, semisoldadas, diseñados para sistemas de amoníaco, y con juntas para aplicaciones de transferencia de calor y refrigeración. [27]

### **2.2.2.4 Deltacoils**

Es una marca especializada en el diseño y fabricación de baterías de intercambio térmico, como condensadores y evaporadores, para aplicaciones industriales, comerciales y de climatización. Cabe destacar que sus evaporadores tienen posibilidad de adaptación a configuraciones específicas, permitiendo así soluciones a medida según los requerimientos del sistema. [28]

### 2.2.3 Baterías

La batería condensadora es un componente esencial en los sistemas de refrigeración ya que desempeña dos funciones clave.

La primera función está relacionada con el gas refrigerante que sale del compresor en forma de gas caliente y alta presión. Su misión es condensar dicho gas refrigerante, dejándolo con unas propiedades adecuadas, menor temperatura y en estado líquido, una vez así estará preparado para entrar en la válvula de expansión. Realizar este cambio de estado del refrigerante es crucial, ya que la válvula de expansión está diseñada para trabajar exclusivamente con líquidos.

La segunda función de las baterías condensadoras está relacionada con el aire exterior. El aire experimenta un proceso de calentamiento sensible, es decir, este se encuentra a una temperatura más baja y cuando pasa a través de la batería condensadora se calienta, pero no experimenta ningún cambio de fase. Este aire caliente se expulsa posteriormente al ambiente, contribuyendo así a la disipación de calor y al equilibrio térmico del sistema. [29]

Una forma de clasificar los condensadores es según el mecanismo de refrigeración, puede ser por aire, agua o mezcla de ambos.

#### Condensadores refrigerados por aire:

Su funcionamiento es básicamente eliminar el calor del refrigerante empleando el aire exterior. Asimismo, para mejorar la transferencia de calor y aumentar el flujo de aire se suele añadir un ventilador. Normalmente este tipo de condensadores están compuestos por una serie de tubos y aletas, aumentando el área de transferencia de calor. [30]

#### Condensadores refrigerados por agua:

Al contrario que los anteriores, se utiliza agua en lugar de aire para enfriar el refrigerante. Su diseño también varía siendo éste de carcasa y tubos. Dentro de los tubos circula el agua, y alrededor de ellos el refrigerante, de esta manera el agua absorbe el calor del refrigerante y será expulsada al exterior posteriormente. Es cierto que el intercambio es más eficiente, pero es necesario suministrarle agua continuamente y precisa de un mantenimiento más estricto que evite el ensuciamiento y posibles obstrucciones. [30]

### Condensadores evaporativos:

Este tipo de condensadores es como una mezcla de los dos anteriores ya que funcionan haciendo pasar el refrigerante a través de una batería, sobre la cual se pulveriza agua además de existir un ventilador forzando a pasar aire a través del sistema. Las ventajas de este tipo es que consume menos agua que los condensadores refrigerados por agua y son muy eficientes, por ello son muy utilizados en grandes aplicaciones industriales donde la eficiencia es un factor clave. [30]

Las marcas especializadas en este tipo de componentes de refrigeración son: Deltacoils, Alfa Laval y Kelvion.

#### **2.2.3.1 Deltacoils**

Como ya se ha comentado anteriormente es una marca especializada en el diseño y fabricación de intercambiadores de calor personalizados, incluyendo baterías condensadoras con tubos y aletas. Ofrecen la posibilidad de configurar los equipos a medida según las condiciones de diseño, además de documentación detallada y soporte directo. [28]

#### **2.2.3.2 Alfa Laval**

Marca bien posicionada en el mercado debido al rendimiento durabilidad y eficiencia de sus equipos. Ofrecen soluciones en intercambiadores de placas, carcasas y tubos y condensadores evaporativos. [26]

#### **2.2.3.3 Kelvion**

En lo que concierne a esta marca incluye condensadores refrigerados por aire, intercambiadores de placas, de carcasas y tubos, así como soluciones personalizadas para sectores de la refrigeración industrial y HVAC, entre otros. Uno de sus puntos fuertes es su capacidad para diseñar equipos a medida, adaptándose por tanto a condiciones específicas de operación. [31]

## 2.2.4 Válvulas

La válvula es otro de los componentes de los sistemas de refrigeración. Es el encargado de reducir la presión del refrigerante líquido, proveniente del condensador, provocando su entrada al evaporador. A su paso por la válvula de expansión el refrigerante comenzará a evaporarse además gracias a ella se puede regular el caudal de refrigerante garantizando un funcionamiento eficiente y evitando que el líquido llegue al compresor.

Los dispositivos empleados en la refrigeración pueden dividirse en dos grupos:

- ❖ **Apertura fija:** la sección transversal que determina el caudal del fluido que lo atraviesa, queda inalterada a lo largo del tiempo.
- ❖ **Apertura variable:** la sección transversal, varía su tamaño en función del caudal de fluido necesario.

Dentro de estos dos grandes grupos, podemos diferenciar los siguientes tipos de válvulas:

### Tubo capilar:

Es un tubo considerablemente largo y de cobre, enrollado en forma de espiral. Tiene un pequeño orificio por donde entra el refrigerante en estado líquido a alta presión procedente del condensador. Este pequeño orificio hace que la presión se mantenga alta en un lado del tubo y baja en el lado opuesto. Dado que se trata de una abertura fija, es muy importante que el sistema tenga la carga de refrigerante adecuada sino el dispositivo podría romperse si hubiera a una presión excesiva debido a la presencia de refrigerante adicional en el sistema. [32]

Las ventajas de este tipo de dispositivos de expansión es que tienen bajo coste de fabricación y no tienen mantenimiento. Además, cuando el sistema se encuentra en el tiempo de parada como el tubo está siempre abierto las presiones en el lado de alta y de baja se equilibran. Por consiguiente, el par de arranque necesario del motor se ve reducido, ya que debe de arrancar con la misma presión tanto en el lado de baja presión como en el de alta presión.

Por otro lado, una de sus desventajas es que, en el mismo ciclo de parada, el refrigerante líquido se dirige al evaporador debido a la diferencia de presión entre evaporador y condensador. Esto podría dar lugar a que el evaporador se inunde y el refrigerante líquido

llegase al compresor, dañando el equipo en caso de arranque. Otro inconveniente es que debido a su pequeña dimensión es muy probable que se obstruya. [32]



Figura 18. Tubo capilar.

Fuente: [32]

#### Válvula de expansión termostática:

La válvula de expansión termostática controla la cantidad de refrigerante líquido que se inyecta en el evaporador de un sistema. Su funcionamiento está directamente relacionado con la temperatura y presión a la salida del evaporador.

Podemos diferenciar dos tipos dentro de las VET:

- ❖ **VET con igualación de presión interna:** trata de mantener un nivel estable de recalentamiento dentro del evaporador, ajustando el flujo másico de refrigerante, lo que se consigue mediante una membrana situada en el interior de la carcasa de la válvula, que compara la temperatura antes y después del evaporador. Mediante un elemento termostático que actúa como si fuese un sensor de temperatura se conecta la válvula de expansión, la diferencia de presión existente entre ese elemento y la entrada del evaporador se equilibra mediante un diafragma situado en el interior del cabezal de la válvula. [32]
- ❖ **VET con compensación de presión externa:** a este tipo se le añade además una línea de equalización externa (tubo capilar adicional). Para mejorar la precisión de control del valor de recalentamiento y que este se vea influido tanto por la temperatura como la presión, se instala a la salida del evaporador. El bulbo es el elemento que transmite la presión correspondiente del gas sobrecalentado. El bulbo se conecta a la carcasa de la válvula mediante el tubo capilar. [32]

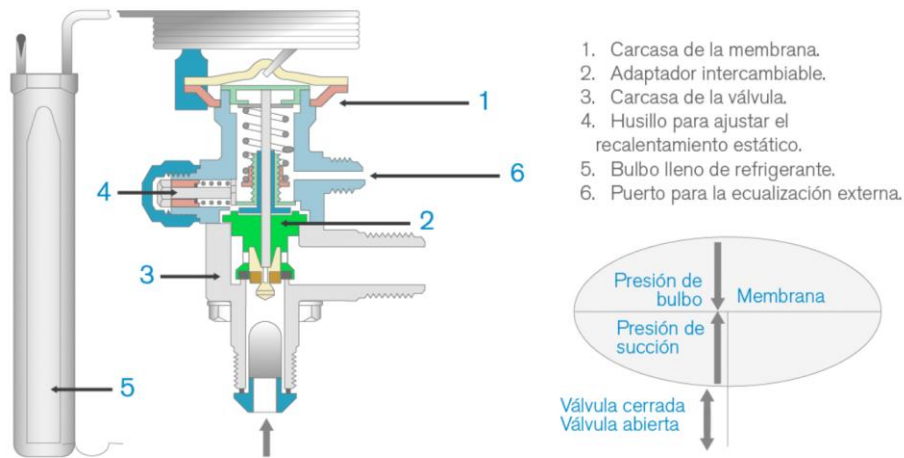


Figura 19. Válvula de expansión termostática.

Fuente: [32]

#### Válvula de expansión electrónica:

Las válvulas de expansión electrónicas son utilizadas sobre todo en sistemas muy grandes y sistemas con una gran demanda de regulación precisa [32]. A diferencia de las VET, estas utilizan sensores y controladores electrónicos para adaptarse dinámicamente a las condiciones del sistema, mejorando la eficiencia energética y el rendimiento general.

La VEE mediante un controlador electrónico que procesa señales de sensores de temperatura y presión situados en puntos clave del sistema, controla el grado de abertura de la válvula. [33]

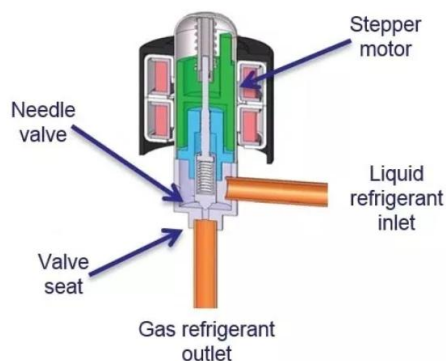


Figura 20. Válvula de expansión electrónica.

Fuente: [33]

### Válvula de expansión automática:

Físicamente la válvula de expansión automática es parecida a la VET, pero sin bulbo. Regula el flujo de refrigerante hacia el evaporador manteniendo la presión constante en su interior, sin tener en cuenta temperatura ni recalentamiento. Tiene un resorte interno que se calibra para mantener la presión fija en el evaporador, cuando la presión en el evaporador se encuentra por debajo del valor fijado, la válvula abre, si, por el contrario, la presión aumenta, la válvula cierra. Es utilizada sobre todo en sistemas de baja capacidad. [34]

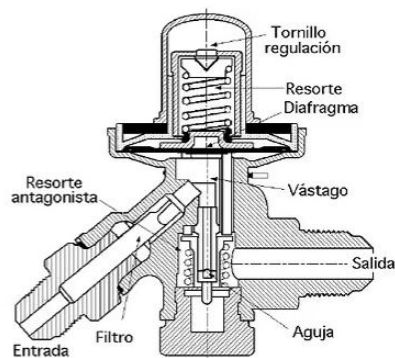


Figura 21. Válvula de expansión automática.

Fuente: [34]

Entre las principales marcas de válvulas de expansión están Danfoss, Carel, Castel y Sanhua, prácticamente todas tienen los mismos tipos de válvulas.

### 2.2.5 Componentes extra

Además de los elementos ya definidos previamente se necesitan algunos más para poder realizar el ciclo, entre ellos están el termostato, filtro deshidratador, válvula solenoide, transductores de presión y temperatura, presostatos, válvula de seguridad, sonda de temperatura, visor de líquido, válvula antirretorno y obuses.

Estos elementos se pueden encontrar en multitud de fabricantes, entre ellos los ya he nombrado anteriormente como Danfoss, Castel o Copeland.

### Termostato

Es un dispositivo preajustado usado para controlar la temperatura de manera que interrumpe o conecta el circuito en respuesta al cambio de temperatura del sistema. Es capaz de controlar esto gracias a señales de entrada, generalmente sensores de temperatura.



*Figura 22. Termostato.*

Fuente: [35]

### Válvula solenoide

La función principal es permitir o evitar el paso de refrigerante a través de ella. Se compone de dos elementos principales, un solenoide y un cuerpo de válvula. Tiene una bobina, la cual creará un campo magnético al energizarse debido al paso de corriente a través del solenoide. Como consecuencia se crea una atracción magnética con el émbolo, moviéndolo con mayor fuerza que el resorte que se opone. La válvula puede estar normalmente cerrada, cuando no circula refrigerante por ella o, por el contrario, normalmente abierta. Este tipo de válvulas se usa por ejemplo en el proceso de desescarche.

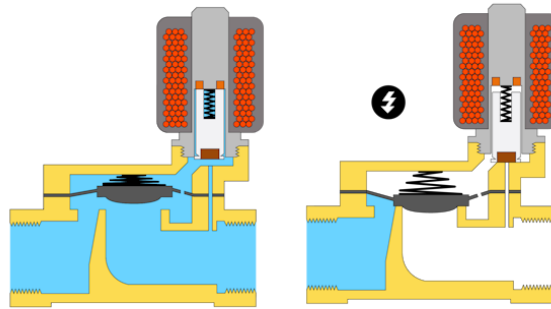


Figura 23. Válvula solenoide normalmente abierta.

Fuente: [36].

### Presostato

Es un elemento que abre o cierra un circuito eléctrico según la lectura de presión de un fluido. Dentro del presostato existe un pistón, si el fluido hace presión sobre él, se moverá hasta unir dos contactos. Si la presión baja, los contactos se separan por la actuación de un resorte que empuja al pistón en sentido contrario. Este elemento dispone de un tornillo que permite regular la sensibilidad del presostato, según este ajuste será necesario aplicar más o menos fuerza sobre el pistón. [37]

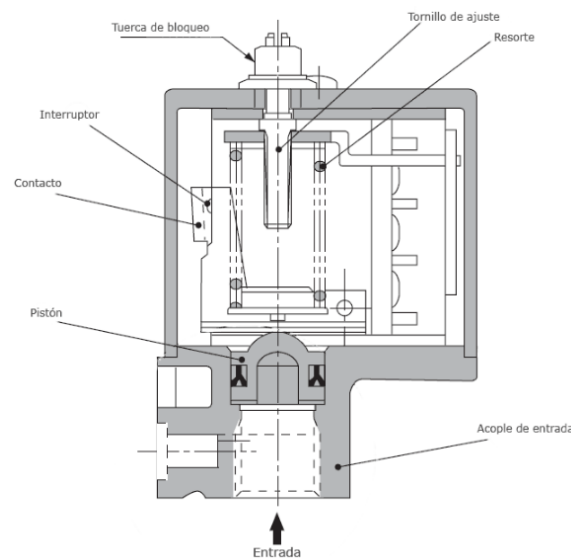


Figura 24. Presostato.

Fuente: [37]

### Filtro deshidratador

Actúa como dispositivo para filtrar impurezas y eliminar humedad. Por un lado, el filtro se encarga de evitar la entrada de partículas invasoras del sistema, y si consiguen entrar trata de eliminarlas, por otro lado, el dispositivo de secado elimina el exceso de humedad del refrigerante, garantizando un nivel adecuado de humedad dentro del sistema. [38]



Figura 25. Filtro deshidratador.

Fuente: [39]

### Visor de líquido

Trata de un elemento que tiene un cristal a través del cual se puede observar el interior del circuito, contiene un indicador de color que reacciona con la humedad. Por tanto, sirve para comprobar el correcto funcionamiento del filtro secador y también para asegurar que no hay humedad en el circuito ni partículas externas.

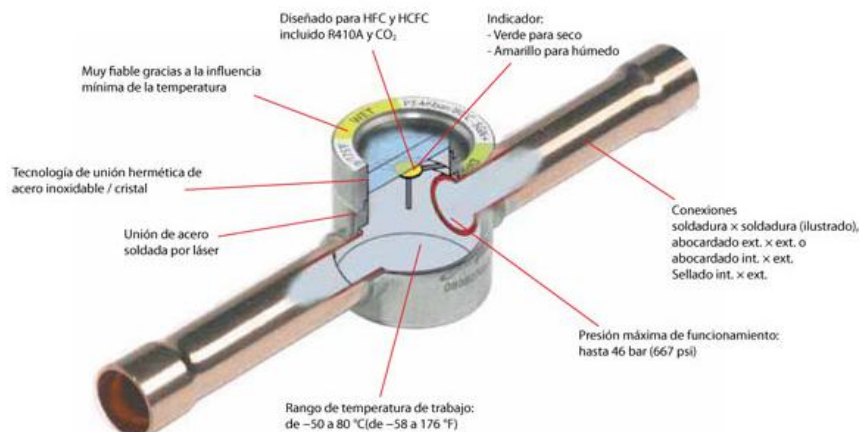
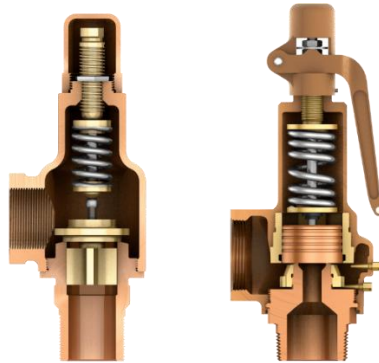


Figura 26. Visor de líquido.

Fuente: [40]

### Válvula de seguridad

Es el componente encargado de proteger al sistema frente a condiciones de operación anómalas. Si la presión sobrepasa un límite seguro, este elemento es el encargado de aliviar esta presión para que el sistema pueda seguir funcionando con normalidad.



*Figura 27. Válvula de seguridad.*

*Fuente: [41]*

### Sonda de temperatura

Este dispositivo mide la temperatura en un punto de interés y manda una señal con la información a la unidad de control.



*Figura 28. Sonda de temperatura.*

*Fuente: [42].*

### Transductor de presión o temperatura

Este elemento mide la temperatura o presión del refrigerante y lo convierte en una señal de salida eléctrica utilizada para controlar el sistema.

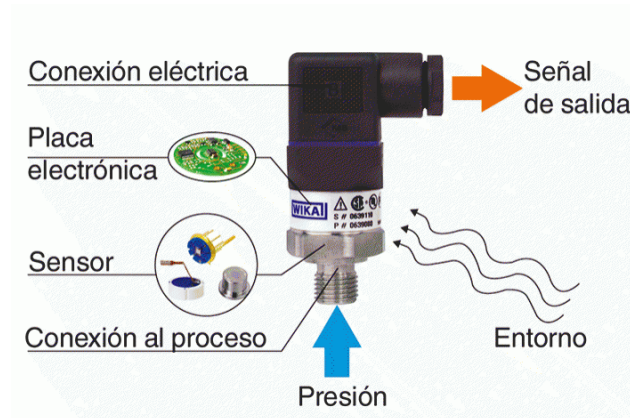


Figura 29. Transductor de presión.

Fuente: [43]

### Válvula Schrader

A esta válvula se le llama comúnmente obús. Sirve como punto de carga o descarga del refrigerante en el sistema y para conectar los manómetros con los que se pueden leer las presiones.

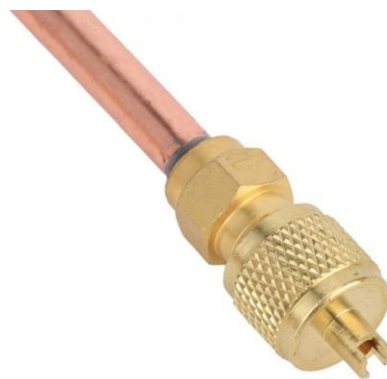


Figura 30. Obús.

Fuente: [44].

### Válvula antirretorno

También conocida como válvula de retención o unidireccional. Su función es evitar que el refrigerante invierta su sentido, dejándolo fluir solo en una dirección.

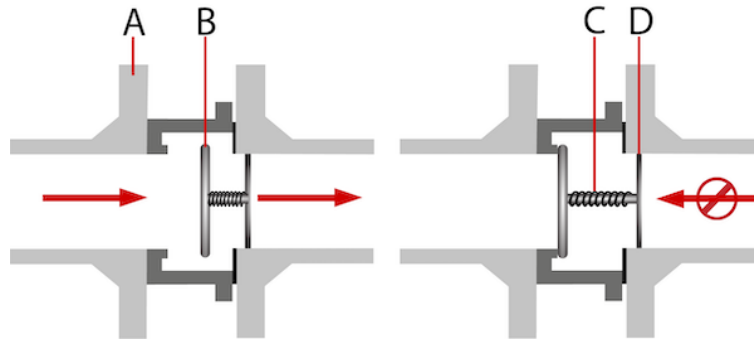


Figura 31. Válvula antirretorno.

Fuente: [45]

## 2.2.6 Generadores atmosféricos de agua

A pesar de ser una tecnología innovadora ya existen multitud de fabricantes en el mercado, entre ellos destacan los siguientes.

### 2.2.6.1 Genaq

Esta empresa surgió en 2017 aunque tiene gran capacidad financiera e industrial ya que pertenece a un grupo que cuenta con más de 35 años de experiencia en el sector de climatización y refrigeración. A pesar de no llevar muchos años en el mercado ya han suministrado sus equipos a más de 70 países distintos.

Con sus equipos buscan generar agua de la mayor calidad posible utilizando filtros que eliminan las partículas suspendidas en el aire y compuestos orgánicos que son solubles en el agua. Asimismo, evitan la generación de residuos y explotación de las fuentes naturales, buscando el mínimo impacto posible junto con la mayor eficiencia.

Desarrollan soluciones tanto para proyectos de mayor envergadura como para cubrir las necesidades domésticas. Tienen equipos capaces de generar desde 20 litros de agua al día

hasta equipos que generan 5000 l/día. No obstante, son capaces de generar equipos mayores para suministrar agua en procesos industriales, plantas embotelladores, suministro de agua residencial, etc. [46]

### **2.2.6.2 Aquaer Generator**

Esta empresa sevillana recalca su situación geográfica, ya que las altas temperaturas suponen un desafío y demuestran la eficiencia de sus generadores. Disponen de sistema de generación capaces de generar más de 100000 l/día.

Sus generadores son totalmente operativos en lugares sin acceso a la red eléctrica, ya que son compatibles con fuentes de energía solar

### **2.2.6.3 Watergen**

Empresa de origen israelí fue fundada en 2009 inicialmente su enfoque era proporcionar agua a tropas militares, aunque posteriormente amplió su enfoque a zonas de escasez de agua y situaciones de emergencia.

Su generador más pequeño es de 20 l/día y es portátil, por lo que se puede llevar a cualquier lugar, y el mayor de s catálogo produce 6000 l/día.

## **2.3 Condensación de vapor atmosférico**

La escasez de agua se ha convertido en uno de los principales problemas globales en la actualidad. Aunque el agua llena el 70% de nuestro planeta, solo el 2,5% está disponible como agua dulce. Según un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud, alrededor de un tercio de la población mundial carece de agua potable y más de 3 mil millones de personas no tienen acceso a agua limpia para mantener la higiene en sus hogares. Este problema puede verse solucionado en gran medida debido a los nuevos avances tecnológicos sobre generación atmosférica de agua, es decir, un proceso que extrae agua de la humedad presente en el ambiente. Este proceso no afecta negativamente al medio ambiente porque la humedad eliminada se repone naturalmente mediante el ciclo hidrológico.

Las técnicas de refrigeración facilitan la condensación forzada y controlada del vapor de agua, pero a expensas de energía de alto rendimiento como la electricidad. El enfriamiento requerido por debajo de la temperatura de rocío del aire se realiza con técnicas de refrigeración convencionales. En lugar de realizar un sistema independiente, también se puede utilizar la recuperación de condensación del sistema HVAC durante su funcionamiento estacional para obtener agua como subproducto. El rendimiento de los sistemas AWG se evalúa generalmente en términos de cantidad de agua generada por unidad de tiempo y consumo específico de energía. [47]

Los sistemas AWG consumen mucha energía, por lo que su alimentación mediante fuentes de energía renovables es una opción muy llamativa.

Existen diversos métodos para la condensación de vapor. Los condensadores por contacto indirecto, como los de carcasa y tubos o tubos aleteados, usados normalmente en sistemas industriales donde el vapor se enfría mediante agua o aire frío. Por otro lado, los condensadores evaporativos, que combinan ambos medios, agua y aire, mejorando la eficiencia de intercambio térmico. [48]

Para determinar cuánta agua puede condensarse a partir del aire es fundamental hablar del diagrama psicrométrico. Este diagrama relaciona la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, el punto de rocío y el contenido de humedad absoluta (g/kg de aire seco). [49]

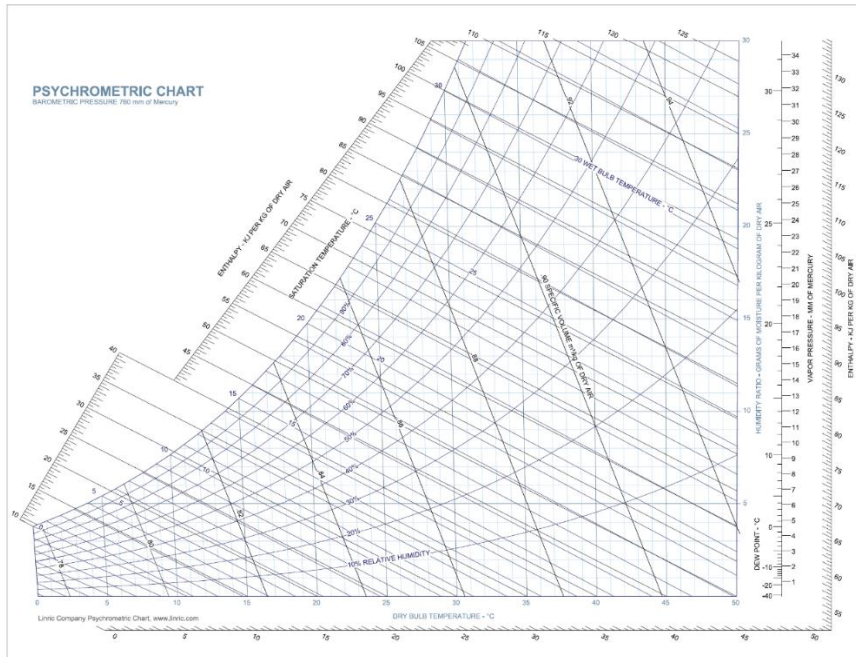


Figura 32. Diagrama psicrométrico.

Fuente: [50]

Para poder interpretar este diagrama es necesario saber que significan cada uno de los parámetros que intervienen:

- ❖ Temperatura de bulbo seco: temperatura que se lee en un termómetro común, sin que esté afectada por la humedad, al hacer pasar una corriente de aire. Aparece reflejada en el eje de abscisas. [51]

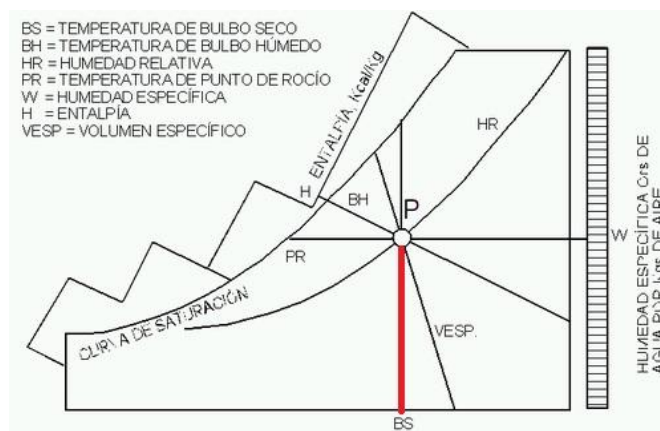


Figura 33. Temperatura de bulbo seco.

Fuente: [51]

- ❖ Temperatura de bulbo húmedo: Temperatura que lee un termómetro siendo afectada por la humedad del aire. Se calcula haciendo pasar una línea inclinada hasta la curva de saturación y buscando su proyección en el eje de abscisas. [51]

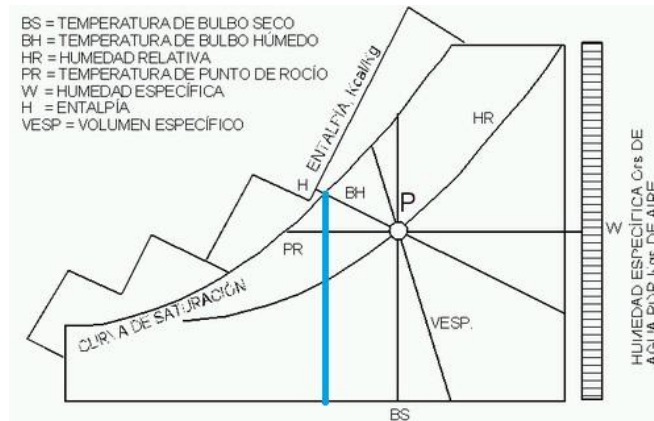


Figura 34. Temperatura de bulbo húmedo.

Fuente: [51]

- ❖ Temperatura de punto de rocío: temperatura a la que comienza a condensar el vapor de agua contenido en el aire [51]. Se calcula haciendo pasar una línea horizontal por un punto dado hasta la curva de saturación y buscando su proyección en el eje de abscisas.

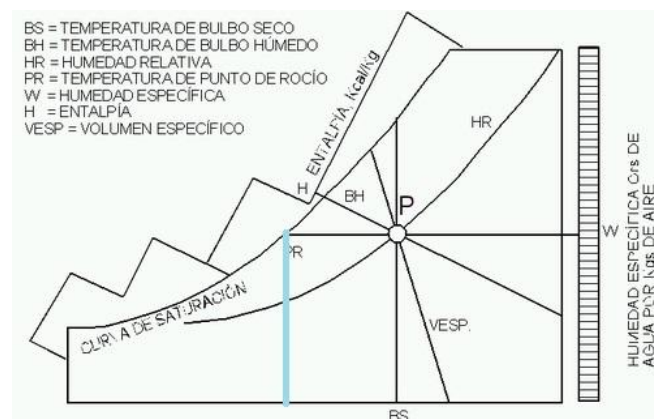


Figura 35. Temperatura de punto de rocío.

Fuente: [51]

- ❖ Humedad específica: indica la cantidad real de agua contenida en el aire. Se mide en gramos de vapor de agua por kilo de aire seco (g/kg).

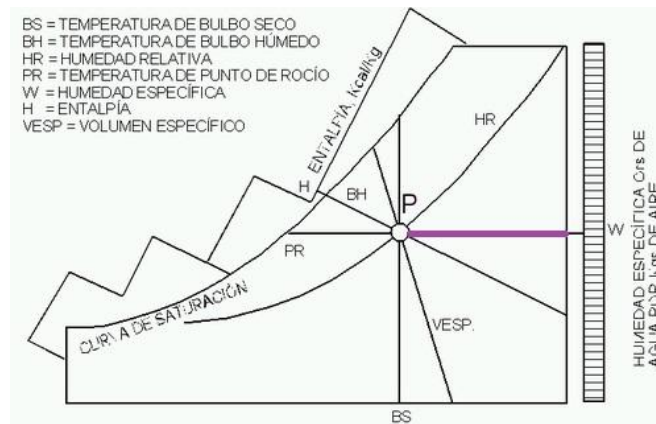


Figura 36. Humedad específica (g/kg).

Fuente: [51]

- ❖ **Humedad relativa:** es el cociente entre la humedad específica y la presión de vapor de saturación que podría contener a la misma temperatura. En el diagrama aparece representado mediante curvas que van de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. Se mide en tanto por ciento (%). [51]

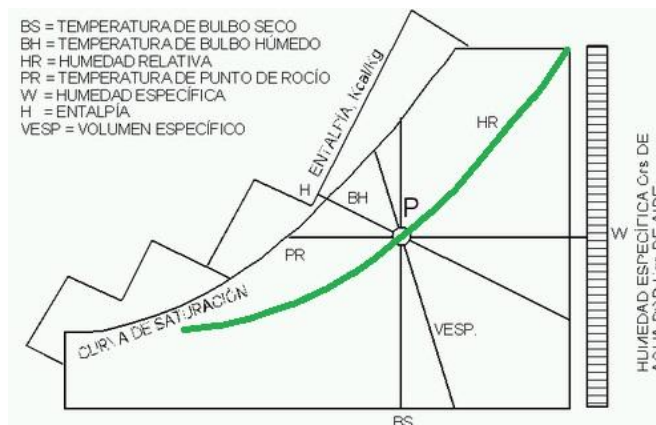


Figura 37. Humedad relativa (%).

Fuente: [51]

- ❖ **Curva de saturación:** esta curva básicamente representa la humedad relativa al 100%.

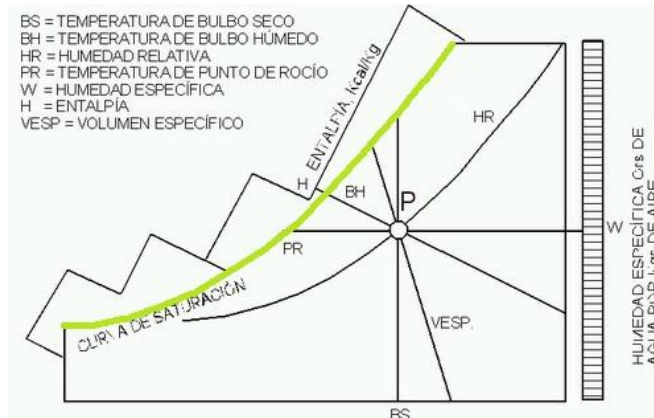


Figura 38. Curva de saturación.

Fuente: [51]

- ❖ Entalpía: se define como la cantidad de energía que contiene el aire húmedo a una determinada temperatura superior a los 0°C. Se calcula proyectando la línea inclinada hasta las de entalpía que aparecen a la izquierda de la curva de saturación. [51]

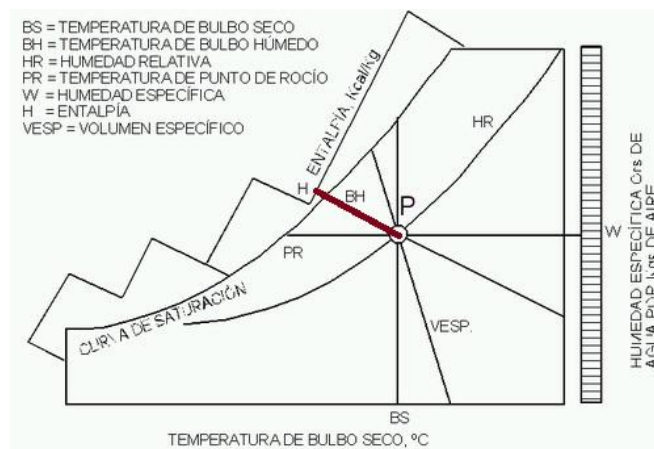


Figura 39. Entalpía (kcal/kg).

Fuente: [51]

- ❖ Volumen específico: es el volumen que ocupa el aire en un metro cúbico por kilogramo de aire seco. En el diagrama se lee mediante líneas inclinadas con origen en el eje de abscisas de derecha a izquierda y de abajo hacia arriba. [51]

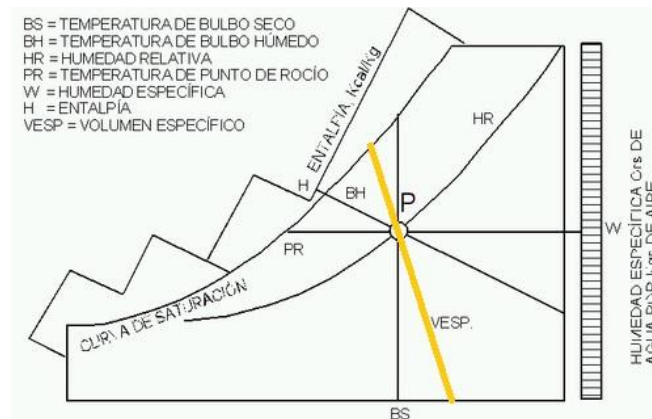


Figura 40. Volumen específico ( $m^3/kg$ ).

Fuente: [51]

Por tanto, si partimos de un punto A que se encuentra a cierta temperatura y humedad, y enfriamos el aire hasta llegar a un punto B, con menor temperatura, el aire a esa temperatura y humedad no es capaz de almacenar toda la cantidad de vapor de agua. Se puede hacer un símil con una esponja, a mayor temperatura, la esponja puede absorber más agua, pero al enfriarse su capacidad disminuirá. Si en ese estado la humedad relativa supera el 100% el exceso de vapor se condensará en forma de agua líquida.

## 2.4 Proceso de desescarche

Cuando un ciclo opera a muy bajas temperaturas de evaporación puede dar lugar a la producción de escarcha en el evaporador. La acumulación de escarcha disminuirá el rendimiento del evaporador al ensuciar la superficie exterior, además la escarcha en sí tiene baja conductividad térmica. Para solucionar este problema se pueden emplear varios métodos, como son el desescarche por aire, por resistencias eléctricas, gas caliente mareando el gas, etc.

### Desescarche por aire

En este caso se utiliza el calor del aire circundante para fundir la escarcha acumulada en el evaporador. En primer lugar, debe cesar el flujo de refrigerante hacia el evaporador, para ello se detiene el compresor. De esta manera, el evaporador dejará de producir más escarcha de la ya existente y además su temperatura superficial comenzará a aumentar debido al aire

circundante. A medida que la escarcha comienza a fundir se convertirá en agua, esta agua debe ser recogida por una bandeja de drenaje que se sitúa debajo del evaporador.

#### Desescarche por resistencias eléctricas

Este método consiste en integrar resistencias eléctricas dentro del evaporador, de esta manera y por efecto joule la superficie llena de escarcha se calentará y la derretirá. El proceso que sigue es detener el compresor y cerrar la VEE para evitar el paso de refrigerante hacia el evaporador. Además, los ventiladores del evaporador también deben detenerse para evitar que el calor generado por las resistencias se disipe y sea un proceso más ineficiente. Después, las resistencias eléctricas, accionadas por un relé o contactor, se calientan y transfieren su calor al serpentín del evaporador haciendo aumentar la temperatura de la superficie del evaporador y derritiendo la escarcha.

#### Desescarche por gas caliente mareando el gas

El principio de funcionamiento que sigue es básicamente desviar una parte del refrigerante de la salida del compresor, que se encuentra caliente y a alta presión, a la entrada del evaporador. Esta conexión se hace mediante una tubería equipada con una válvula solenoide.

Durante el ciclo de desescarche la válvula de expansión electrónica se cierra deteniendo así el refrigerante frío que circula hacia el evaporador. Posteriormente, se abre la válvula solenoide de gas caliente permitiendo así que fluya el refrigerante caliente de salida del compresor hacia el evaporador. El gas caliente circulará por el evaporador transfiriendo su calor a las paredes del intercambiador, provocando el deshielo de la escarcha acumulada en ellas. Este ciclo se repetirá hasta que un temporizador u otros controles, como sensores de temperatura, por ejemplo, que se establezcan terminen la secuencia de deshielo [52]. Cuanto mayor sea la expansión en la zona de descarga antes de la entrada del evaporador, donde se realiza el desescarche, mejor es. Aunque la temperatura disminuya considerablemente y se tenga gran pérdida de presión, el vapor tiene calor y temperatura suficiente para realizar el proceso de desescarche sin ningún problema, de esta forma se reduce la posibilidad de entrar dentro de la zona de líquido en el evaporador. [53]

## 2.5 Normativa

El diseño y construcción de una enfriadora con refrigerante natural propano debe acogerse a un conjunto de normas técnicas, directivas europeas y reglamentaciones nacionales que garantizan la seguridad, sostenibilidad y eficiencia energética del sistema. A continuación, se exponen las principales normativas que afectan al diseño de estos sistemas.

### 2.5.1 Normativa de seguridad de refrigerantes inflamables

El propano es clasificado con un refrigerante tipo A3, por su baja toxicidad y alta inflamabilidad, como tal, debe cumplir una serie de requisitos que están recogidos en la norma **UNE-EN 378:2017** – “*Sistema de refrigeración y bombas de calor. Requisitos de seguridad y medioambientales*”.

### 2.5.2 Normativa sobre equipos a presión y seguridad

Dado que los componentes del sistema operan a presión se den cumplir las siguientes normas: **Directiva 2014/68/UE (PED)** – “*Equipos a presión*” y **Real Decreto 809/2021**.

Por otro lado, también se debe cumplir el **Real Decreto 552/2019** que establece las normas de seguridad para instalaciones frigoríficas.

### 2.5.3 Normativa medioambiental y gases refrigerantes

Aunque el propano no entra dentro del grupo de gases fluorados, su uso debe cumplir una serie de normas marcadas por las políticas europeas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Dichas normas son el **Reglamento (UE) 2024/573** que impulsa el uso de refrigerantes naturales. Y por otro lado también debe regirse por el **Acuerdo de París (2015)** y **Protocolo de Kioto (1997)**.

#### 2.5.4 Normativa sobre eficiencia energética

Dentro de este campo la norma a seguir es: **Reglamento (UE) 2016/2281** que establece el requisito “*de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía, en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos de calentamiento de aire, los productos de refrigeración, los enfriadores de procesos de altas temperaturas y los ventilos convectores.*” [54]

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 3.1 Condiciones de diseño

Las condiciones que se establecen para llevar a cabo el diseño y modelado de la enfriadora son:

#### Especificaciones generales:

El refrigerante del circuito primario será R-290. Se ha elegido este refrigerante por su eficiencia energética, adaptabilidad climática, rendimiento, amplio rango de aplicación, menor carga de refrigerante, su bajo GWP y además no causa daños a la capa de ozono.

Por otro lado, como se verá más adelante la temperatura de evaporación es bastante baja por lo que existe riesgo de congelación en el evaporador. Para evitar este problema se usará agua glicolada en el circuito secundario ajustando el tanto por ciento de esta según corresponda. Además, se busca siempre optimizar el COP en cualquier punto de funcionamiento.

#### Restricciones y entorno de trabajo:

El rango de temperatura de condensación en el circuito frigorífico se encuentra entre 15°C y 45°C. Además, la temperatura impulsión del sistema, es decir la temperatura a la que la enfriadora impulsa el fluido frío al circuito externo que lo va a utilizar, será de aproximadamente -15°C.

La potencia frigorífica nominal se establece en 40kW a la temperatura exterior de 30°C y frecuencia de 50Hz.

Por otro lado, el compresor debe tener una frecuencia variable entre 35 y 70 Hz.

### 3.2 Modelado del ciclo

En primer lugar, es necesario establecer una serie de condiciones de operación para así obtener los datos del ciclo termodinámico y proseguir con una preselección de los componentes del equipo. Estas condiciones de operación derivan de las especificaciones y restricciones de diseño nombradas en el apartado 3.1.

Datos de partida	
$\dot{Q}_{\text{evap}}(\text{kW})$	40
$T_{\text{evap}}(^{\circ}\text{C})$	-25
$T_{\text{cond}}(^{\circ}\text{C})$	40
$\Delta T_{\text{rec}}(\text{K})$	5
$\Delta T_{\text{sub}}(\text{K})$	5
Fluido	R-290

Tabla 1. Datos de partida.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura exterior es un parámetro muy importante ya que va a afectar de manera directa al rendimiento de la enfriadora y a la temperatura de condensación. El condensador tiene la función de disipar hacia el exterior el calor absorbido en el evaporador más el calor debido al trabajo del compresor, para que se pueda producir esta transferencia de calor la temperatura del refrigerante caliente ( $T_{\text{cond}}$ ) debe ser mayor que la temperatura exterior o ambiente. A mayor temperatura exterior más difícil será esta transferencia de calor. Como la temperatura exterior se ha definido en  $30^{\circ}\text{C}$ , he estimado la temperatura de condensación en unos  $40^{\circ}\text{C}$  inicialmente.

El subenfriamiento del líquido refrigerante a la salida del condensador se ha estimado inicialmente en 5 K, este subenfriamiento sirve para mejorar la eficiencia del ciclo además de hacer que el refrigerante llegue del condensador a la válvula de expansión de forma líquida.

La justificación para la temperatura de evaporación supuesta es por la restricción de la temperatura de impulsión del agua glicolada. Al igual que en el condensador, para que se produzca una transferencia de calor debe existir una diferencia de temperatura, en este caso será el refrigerante el que absorba calor del fluido secundario. Por ello, la temperatura de evaporación debe ser menor que la temperatura de salida del glicol. La he supuesto inicialmente inferior a  $10^{\circ}\text{C}$  la de impulsión, ya que si las temperaturas fueran más próximas se necesitaría un evaporador más caro y sobredimensionado y una temperatura de evaporación mucho más baja conllevaría una disminución del COP.

El recalentamiento es necesario para evitar los golpes de líquido en el compresor, lo he estimado también en 5 K. Un recalentamiento excesivo sería negativo para el sistema ya que reduciría la eficiencia volumétrica al aumentar la temperatura de descarga del compresor.

Para el cálculo teórico se utiliza el modelo de ciclo de compresión de vapor. En este estudio se van a tener 8 puntos. De los cuales se pueden obtener las propiedades termodinámicas a partir del diagrama de Mollier para el refrigerante R-290. Este diagrama es una herramienta visual que se utiliza para representar el comportamiento de un fluido a lo largo de su ciclo de refrigeración y calefacción [55]. En él se puede visualizar la relación entre la entalpía, entropía, presión y temperatura del gas refrigerante.

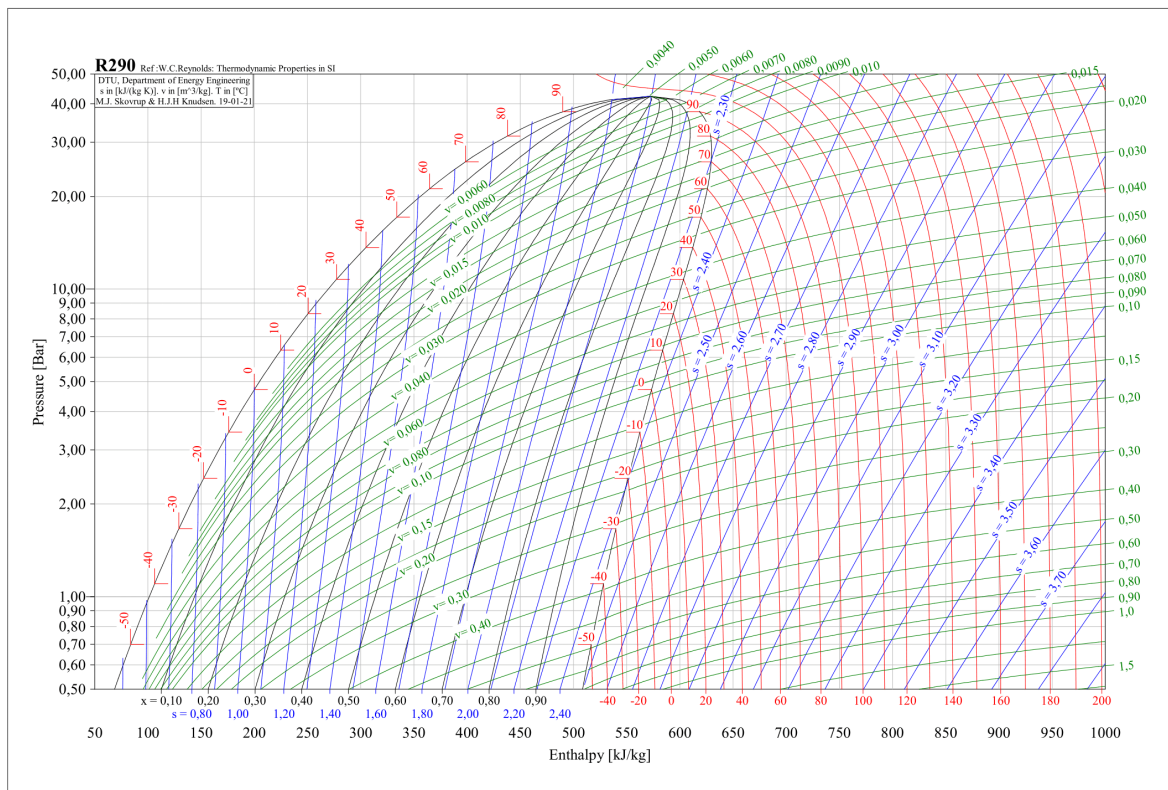


Figura 41. Diagrama de Mollier R-290.

Fuente: [56]

Punto 1 saturado: Salida del evaporador saturado.

En dicho punto he establecido la temperatura de  $T_{\text{evap}} = -25^{\circ}\text{C}$ , para obtener las demás propiedades de este punto podemos recurrir al diagrama de Mollier ya que también conozco que este punto tiene un título de vapor igual a 1. Obtengo, por tanto:

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)	Q
-25	2,0	546	2,41	1

Tabla 2. Punto salida evaporador saturado.

Fuente: Elaboración propia.

Punto 1: Entrada compresor.

La temperatura de este punto se calcula como la temperatura de salida del evaporador saturado más el recalentamiento, es decir:  $-25^{\circ}\text{C} + 5\text{ K} = -20^{\circ}\text{C}$ . La presión en dicho punto será igual a la del punto anterior ya que se encuentran en la misma isóbara, quedando:

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)	Q
-20	2,0	554	2,40	-1

Tabla 3. Punto entrada compresor.

Fuente: Elaboración propia.

El título de vapor lo he puesto como -1 ya que no se conoce exactamente puesto que no es un punto saturado.

Ahora como no tengo datos suficientes para el cálculo de salida del compresor paso al cálculo del punto de salida de condensador saturado.

Punto 3 saturado: Salida condensador saturado.

De este punto conozco que la temperatura estimada es de  $40^{\circ}\text{C}$  y el título de vapor es 0, por tanto, puedo obtener todas sus propiedades mediante el diagrama de Mollier.

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)	Q
40	13,7	307	1,36	0

Tabla 4. Punto saturado salida de condensador.

Fuente: Elaboración propia.

Punto 3: Entrada válvula de expansión.

La temperatura en este punto es temperatura del punto 3 saturado menos el subenfriamiento, por tanto:

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg-K)	Q
35	13,7	292,8	1,3	-1

*Tabla 5. Punto entrada válvula de expansión.*

*Fuente:* Elaboración propia.

Punto 4: Entrada evaporador.

Este punto se encuentra a la misma entalpía que el punto 3 puesto que la válvula es isoentálpica y también conozco la presión, ya que se encuentra en la misma isóbara que el punto 1, obteniendo así:

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg-K)	Q
-25	2,0	292,8	1,4	-1

*Tabla 6. Punto entrada evaporador.*

*Fuente:* Elaboración propia.

Ahora tengo datos suficientes para calcular los puntos de salida del compresor, para ello cálculo primero un punto ficticio isentrópico, con la misma entropía que el punto 1.

Punto 2 isentrópico: Salida compresor isentrópico.

De este punto solo es necesario calcular la entalpía ya que conozco la entropía, igual que la del punto 1 y la presión, que es la misma que la del punto 3 ya que se encuentra en la misma isóbara.

P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)
13,7	646,24	2,4

Tabla 7. Punto 2 isentrópico.

Fuente: Elaboración propia.

Punto 2: Entrada condensador.

De este punto conozco la presión que es la misma que la del punto calculado en la *Tabla 7* y puedo obtener la entalpía suponiendo un rendimiento isentrópico aproximado del compresor de 0,5.

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}, \text{ despejando de aquí } h_2, \text{ se obtiene:}$$

T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)	Q
96,2	13,7	735,9	2,7	-1

Tabla 8. Punto entrada condensador.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores calculados para este punto son aproximados ya que he estimado un rendimiento isentrópico de 0,5 pero puede que no sea exactamente este. De igual manera, se comparará con el valor obtenido con cálculos posteriores.

Con estos datos se podría dibujar el ciclo en el diagrama de Mollier de manera que sea mucho más visual.

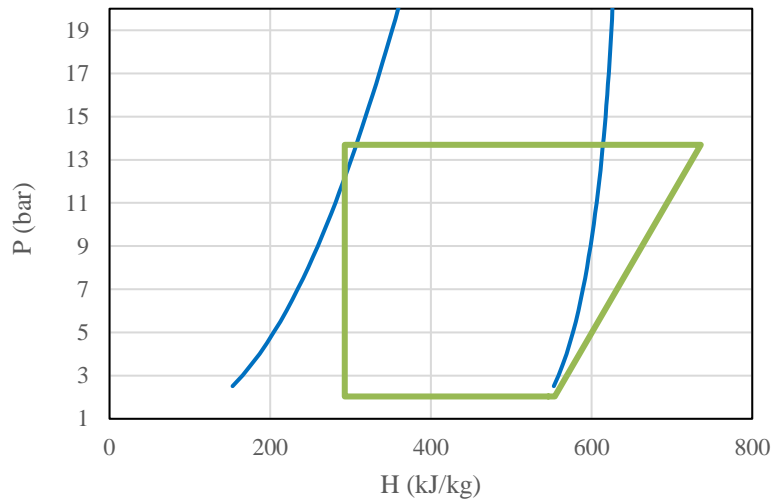


Figura 42. Ciclo teórico.

Fuente: Elaboración propia.

Como ya conozco todos los puntos del ciclo puedo calcular el trabajo del compresor, el COP, el caudal de refrigerante para la potencia de 40kW requerida, el calor disipado en el condensador y la potencia necesaria del compresor.

Caudal másico,  $\dot{m}$ :

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{(h_1 - h_4)} = \frac{40}{554 - 292,8} = 0,153 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

Potencia del compresor,  $\dot{W}_{\text{comp}}$ :

$$\dot{W}_{\text{comp}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 0,153 \cdot (735,9 - 554) = 27,9 \text{ kW} \quad (2)$$

Calor disipado en el condensador,  $\dot{Q}_{\text{cond}}$ :

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 0,153 \cdot (735,9 - 292,8) = 67,9 \text{ kW} \quad (3)$$

Por último, el coeficiente de rendimiento, COP:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{W}_{\text{comp}}} = \frac{40}{27,9} = 1,43 \quad (4)$$

Otra forma para obtener toda esta información siendo mucho más precisa sería mediante una hoja de cálculo en Excel, haciendo uso de la librería CoolProp. Esta herramienta permite obtener propiedades termodinámicas del refrigerante seleccionado de manera precisa y automática a partir de las variables de estado. Por ejemplo, para obtener la entalpía específica de un determinado punto del ciclo se utiliza la función:

$$\text{PropsSI}(H; T; T + 273,15; P; P; "R290") \quad (5)$$

Donde H indica que se desea obtener la entalpía específica en J/kg, T y P son variables ya conocidas de temperatura y presión, y R-290 es el refrigerante utilizado. Las variables conocidas son cambiantes, por ejemplo, si se está ante un punto de vapor saturado la variable conocida puede ser el título de vapor que se denota como Q, será 1 si es vapor saturado, 0 si es líquido saturado y -1 si no es conocido. Se procede de manera similar para las demás variables de estado.

	T (°C)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·K)	Q	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1_sat	-25	2,0	546	2,41	1	4,6
1	-20	2,0	554,0	2,4	-1,0	4,5
2	96,2	13,7	735,9	2,7	-1,0	22,3
3_sat	40	13,7	307	1,36	0	467,5
3	35	13,7	292,8	1,3	-1,0	476,7
4	-25,0	2,0	292,8	1,4	0,377	12,1

Figura 43. Puntos ciclo termodinámico con Excel.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 43 para cada punto se tienen dos propiedades subrayadas en blanco y el resto en gris. Esto es porque a partir de las dos subrayadas en blanco, que se conocen directamente, se puede hallar el resto.

Una vez realizados estos cálculos ya se tiene el modelo del ciclo termodinámico del equipo, procedo a la selección de componentes.

### 3.3 Procedimiento de diseño de componentes

#### 3.3.1 Compresor

Para la selección del compresor primero comparo cual es la mejor opción entre las marcas comerciales enumeradas en el punto 2.2.1.

##### 3.3.1.1 Copeland

Al ejecutar este software la primera selección que se debe hacer es entre compresores tipo scroll o semiherméticos.

Si selecciono compresores tipo scroll e introduzco las condiciones de operación, como se pueden ver en la *Figura 44*:

**Condiciones**

**Preferencias**

Refrigerante: R290

temperatura de Referencia: Punto Rocío

Alimentación: 50 Hz

modelos: Todos los modelos

**Valor solicitado/Selección**

Req. de capacidad: 40.00 kW

Selección Manual: ZB12KCU-TFD

**Condiciones de trabajo**

T. Evap. °C: -25.00

Recal. Aspiración K: 5.00

T. Condensación °C: 40.00

Subenfriamiento K: 5.00

EN AHRI

Figura 44. Condiciones Copeland.

Fuente: [57]

Obteniendo la siguiente lista de compresores:

Compresor	Capacidad frigorífica	Potencia	C.O.P.	Intensidad	Caudal másico de succión	Desplazamiento
	kW	kW		A	g/s	m³/h
ZB12KCU-TFD	1,62	1,02	1,59	2,29	6,22	5,76
ZB17KCU-TFD	2,26	1,40	1,62	2,86	8,67	8,04
ZB20KCU-TFD	2,78	1,86	1,50	3,72	10,65	10,0
ZB25KCU-TFD	3,26	2,11	1,54	4,72	12,50	11,7
ZB31KCU-TFD	4,06	2,60	1,56	6,20	15,55	14,4
ZB37KCU-TFD	4,90	2,93	1,67	6,56	18,75	17,1
ZB49KCU-TFD	6,43	4,02	1,60	7,39	24,60	21,4
YB56K1G-TFD	6,81	4,84	1,41	10,89	26,10	25,7
YB64K1G-TFD	8,15	5,58	1,46	12,21	31,20	28,8
YB81K1G-TFD	9,30	7,44	1,25	15,68	35,60	36,4
YB97K1G-TFD	11,05	8,94	1,23	18,97	42,20	43,3

Figura 45. Lista compresores Copeland Scroll.

Fuente: [57]

Se puede observar como la potencia que ofrecen los compresores tipo scroll de esta marca es muy pequeña, necesitando por tanto 4 o 5 compresores para llegar a la potencia requerida en el ciclo.

### 3.3.1.2 Danfoss

El software de esta marca ofrece la opción de elegir compresores herméticos o compresores de tornillo semiherméticos. Procedo de igual manera que en el caso anterior, estableciendo primeramente las condiciones de funcionamiento y obteniendo posteriormente una lista de compresores.

Condiciones de funcionamiento

Capacidad requerida:

Capacidad de refrigeración:  kW

Mostrar todos los m

Mostrar:  modelos

Condiciones nominales:

Evaporación:

Temperatura:  °C

Recalentamiento útil:  K

Recalentamiento adicional:  K

Temperatura del gas de retorno:  °C

Condensación:

Temperatura:  °C

Subenfriamiento:  K

Subenfriamiento adicional:  K

Subenfriamiento total:  K

Temperatura del líquido:  °C

Figura 46. Condiciones CoolSelector2.

Fuente: Software CoolSelector2.

Bloquear selección:  Selección: **NST42NA, R290. El porcentaje de coincidencia (4,7%) es inferior al mínimo (90%).**

Seleccionado	Modelo	Tecnología	Configuración	Refrigerante	Control de capacidad	Velocidad [rpm]	Refrigeración [kW]	COP refrigeración [W/W]	Calefacción [kW]	COP calefacción [W/W]	Potencia [kW]	Corriente [A]	Frecuencia [Hz]	Alimentación	Caudal máxico [kg/h]	Coincidencia
<input type="radio"/>	NST34RA	Recp. hermético	Simple	R290	Velocidad fija	3000	1,337	1,28	2,378	2,28	1,041	7,385	50	220 - 240 V 1 ph	18,42	3%
<input type="radio"/>	NST34LA	Recp. hermético	Simple	R290	Velocidad fija	3000	1,469	1,60	2,387	2,60	0,918	4,345	50	220 - 240 V 1 ph	20,24	4%
<input type="radio"/>	NST34NG	Recp. hermético	Simple	R290	Velocidad fija	3000	1,505	1,60	2,444	2,60	0,940	5,518	50	208 - 220 V 1 ph	20,74	4%
<input type="radio"/>	NST38NG	Recp. hermético	Simple	R290	Velocidad fija	3000	1,640	1,51	2,728	2,51	1,088	7,143	50	208 - 220 V 1 ph	22,60	4%
<input checked="" type="radio"/>	NST42NA	Recp. hermético	Simple	R290	Velocidad fija	3000	1,864	1,56	3,061	2,56	1,198	6,229	50	220 - 240 V 1 ph	25,69	5%

Figura 47. Lista compresores herméticos Danfoss.

Fuente: Software CoolSelector2.

Bloquear selección:  Selección: **KZFHO410F, R290. El porcentaje de coincidencia (289,3%) es superior al máximo (110%).**

Seleccionado	Modelo	Tecnología	Configuración	Refrigerante	Control de capacidad	Velocidad [rpm]	Refrigeración [kW]	COP refrigeración [W/W]	Calefacción [kW]	COP calefacción [W/W]	Potencia [kW]	Corriente [A]	Frecuencia [Hz]	Alimentación	Caudal máxico [kg/h]	Coincidencia
<input checked="" type="radio"/>	KZFHO410F	De tornillo semiherméticos	Simple	R290	Velocidad fija	3000	115,7	1,59	188,7	2,59	72,95	122,4	50	380 - 400 V (H15 V) 3 ph**	1595	289%
<input type="radio"/>	KZFHO410F	De tornillo semiherméticos	Simple	R290	Velocidad fija	3000	119,3	1,63	192,7	2,63	73,40	122,8	50	380 - 400 V (H15 V) 3 ph**	1644	295%
<input type="radio"/>	KZFHO480F	De tornillo semiherméticos	Simple	R290	Velocidad fija	3000	131,3	1,55	215,9	2,55	84,56	145,1	50	380 - 400 V (H15 V) 3 ph**	1810	325%
<input type="radio"/>	KZFHO480F	De tornillo semiherméticos	Simple	R290	Velocidad fija	3000	139,6	1,65	224,1	2,65	84,43	144,9	50	380 - 400 V (H15 V) 3 ph**	1925	349%
<input type="radio"/>	KZFHO560F	De tornillo semiherméticos	Simple	R290	Velocidad fija	3000	153,2	1,54	252,8	2,54	99,59	169,2	50	380 - 400 V (H15 V) 3 ph**	2112	383%

Figura 48. Lista compresores de tornillo semiherméticos Danfoss.

Fuente: Software CoolSelector2.

Como se puede observar la propia aplicación lanza mensajes de error con ambos tipos de compresores, ya que ninguno es capaz de satisfacer las condiciones de este proyecto.

### 3.3.1.3 Frascold

Siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores:

Modalidad de selección: Refrigeración / Acondicionamiento	Alimentación: 400/3/50	<input checked="" type="checkbox"/> Selección automática de la conexión
Refrigerante: R290	Capacidad en el evaporador: 40,000 kW	<input type="button" value="Cold Room Calculation"/>
Temperatura de referencia: Temperatura en el punto de rocío	Temperatura de evaporación (punto de rocío): -25,00 °C	Temperatura de condensación (punto de rocío): 40,00 °C
	Temperatura de aspiración: -20,00 °C	Sub-enfriamiento: 5,0 K
	Fracción útil de recalentamiento: 100 %	

Figura 49. Condiciones Frascold.

Fuente: Software Frascold.

		Total	S12-42AXHT (FS x1)	S12-42AXHT (VS x4)
▶ Capacidad frigorífica	kW	43,989	8,798	35,191
Capacidad frigorífica [ *ref ]	kW	-	8,379	33,514
Capacidad en el evaporador	kW	43,989	8,798	35,191
Potencia absorbida	W	24070	4814	19256
Capacidad en el condensador, t...	kW	68,06	13,612	54,448
Corriente	A	49,08	9,82	39,26
COP/EER	W/W	1,83	1,83	1,83
Caudal másico	kg/h	606	121	485
Frecuencia de alimentación	Hz	50	50	50
Alimentación	-	400/3/50/PWS	400/3/50/PWS	400/3/50/PWS
Modalidad de selección	-	Refrigeración / Acondicionami...	Refrigeración / Acondicionamiento	Refrigeración / Acondicionamiento
Modo operativo	-	ver detalles...	100% de la capacidad	Inverter
Presión de evaporación	bar	2,03	2,03	2,03
Recalentamiento en aspiración	K	5	5	5
Temperatura de aspiración	°C	-20	-20	-20
Temperatura de descarga	°C	78,09	78,09	78,09
Presión de condensación	bar	13,69	13,69	13,69
Temperatura del líquido	°C	35	35	35
Relación (%)	%	100,0%	20,0%	80,0%
Nota	-			
Caudal aceite	l/min	-	-	-
Intercambiador (Enfriador aceiter)	kW	-	-	-
Temperatura salida de aceite de...	°C	-	-	-
Certificado por	-	ver detalles...	Fracold tentative data	Fracold tentative data

Figura 50. Compresor Frascold.

Fuente: Software Frascold.

Se puede comprobar que este compresor sería totalmente viable para este proyecto.

### 3.3.1.4 Bitzer

Elijo primeramente compresores semiherméticos, pero da error ya que dice que el sobrecalentamiento de gas de succión debe ser mínimo 10°C. Como esto es un cálculo estimado lo aumento a 10°C y posteriormente según el compresor que se elija habrá que tener en cuenta este cambio.

**Reciprocating Compressors, Semi-Hermetic** ▾

Mode: Refrigeration and air conditioning ▾  
Refrigerant: R290 ▾ ⓘ  
Reference temperature: Dew point temp. ▾  
Compressor type: Single Compressor ▾  
Series: Standard ▾  
Motor version: all ▾

**Compressor selection** ▲  
 Cooling capacity: 40 kW  
 Compressor model: ▾  
 Incl. former types

**Operating point** ▲  
Evaporating SST: -25 °C  
Condensing SDT: 40 °C

**Operating conditions** ▲  
Liq. subc. (in condenser): ▾ 5 K  
Suct. gas superheat: ▾ 10 K  
 Useful superheat: 100 % ⓘ  
Operating mode: Auto ▾

**Capacity control** ▲  
 without  
 External FI: Auto ⓘ  
 VARISTEP: Auto ⓘ  
 Stepped: 100% ▾

**Power supply** ▲  
Supply frequency: 50Hz ▾  
Supply voltage: Standard (400V) ▾

Figura 51. Condiciones Bitzer semihermético.

Fuente: [58]

Compressor	6FEP-44Z-40P	8GEP-50Z-40P
Capacity steps	100%	100%
Cooling capacity	38,4 kW	44,4 kW
Cooling capacity *	39,1 kW	44,5 kW
Evaporator capacity	38,4 kW	44,4 kW
Power input	20,3 kW	23,7 kW
Current (400V)	42,4 A	54,1 A
Voltage range	380-420V	380-420V
Condenser capacity	58,7 kW	68,1 kW
COP/EER	1,90	1,87
COP/EER *	1,93	1,87
Mass flow	515 kg/h	595 kg/h
Operating mode	Standard	Standard
Discharge gas temp. w/o cooling	80,4 °C	81,3 °C

Figura 52. Lista compresores semiherméticos Bitzer.

Fuente: [58]

Procediendo de igual manera, pero ahora para compresores de tipo scroll

**Scroll Compressors, Hermetic**

Mode: Refrigeration and air conditioning

Refrigerant: R290

Reference temperature: Dew point temp.

Compressor type: Single Compressor

Series: ORBIT PRO

---

**Compressor selection**

Cooling capacity: 40 kW

Compressor model

---

**Operating point**

Evaporating SST: -25 °C

Condensing SDT: 40 °C

---

**Operating conditions**

Liq. subc. (in condenser): 5 K

Suct. gas superheat: 5 K

Useful superheat: 100 %

---

**Capacity control**

without

External FI: Auto

---

**Power supply**

Supply frequency: 50Hz

Supply voltage: Standard (400V)

Figura 53. Condiciones Bitzer scroll.

Fuente: [58]

Compressor	GSP80485ZL-40S	
Capacity steps	100%	
Cooling capacity	22,6 kW	
Cooling capacity *	21,5 kW	
Evaporator capacity	22,6 kW	
Power input	15,41 kW	
Current (400V)	31,7 A	
Voltage range	380-420V	
Condenser capacity	38,0 kW	
COP/EER	1,46	
COP/EER *	1,40	
Mass flow	312 kg/h	
Discharge gas temp. w/o cooling	93,2 °C	

Figura 54. Lista compresores scroll Bitzer.

Fuente: [58]

Ahora que hay varios modelos de compresores de distintas marcas es conveniente compararlos y hacer la selección de uno de ellos. Cabe destacar que otro factor importante para la selección del compresor es que se pueda regular el caudal para así ajusta la capacidad de éste según la demanda del sistema. Hay dos formas de regulación del caudal:

#### Variador de frecuencia o Inverter

Es un variador electrónico que cambia la frecuencia de alimentación eléctrica del motor de esta forma, el compresor gira más lento o rápido ajustando así el caudal de refrigerante que recorre el sistema. Este ajuste es muy preciso además de ser altamente eficiente.

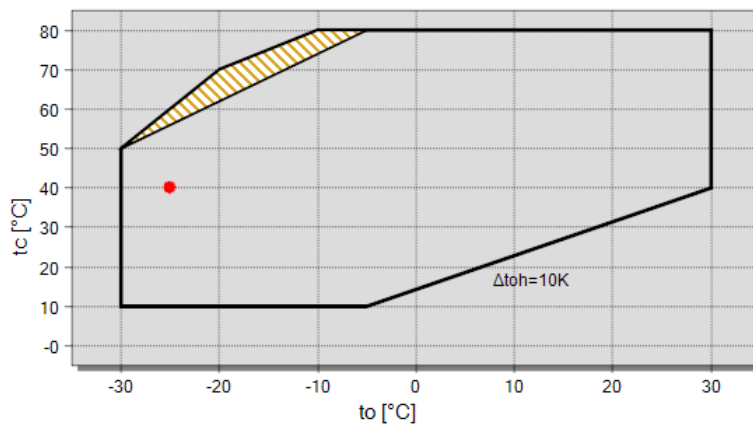
#### Sectorización por pistones

Esta forma de regulación es un control por etapas. En los compresores alternativos el caudal depende del número de pistones activos, por tanto, se regulará el caudal activando o desactivando algunos pistones. Este sistema es más económico que el anterior pero no es una regulación continua, no tiene tanta precisión y puede generar más ruido y vibraciones.


Siguiendo con la selección tras este breve inciso, los modelos de Copeland quedan descartados, porque como he comentado anteriormente ofrecen una potencia muy pequeña y para que fueran capaces de alcanzar la potencia requerida habría que poner 5 compresores

en paralelo, lo cual no es la mejor opción entre las existentes. Por otro lado, de los compresores de Danfoss ninguno cumple satisfactoriamente los requerimientos del proyecto, por lo que quedan descartados también. En cuanto al compresor de Frascold sí que cumple las condiciones del proyecto, sin embargo, el problema es que la regulación de caudal no se realiza con un variador de frecuencia, sino a través de la sectorización del compresor en diferentes partes según su número de pistones. Como he explicado anteriormente la regulación con variador de frecuencia es mejor solución. Por último, Bitzer ofrece varias opciones que cumplen con las condiciones del sistema, por lo que procedo a analizarlas.

En primer lugar, se tiene dos compresores semiherméticos, uno ofrece una potencia de 38,4kW y otro de 44,4kW, el inconveniente de ambos es que la regulación de caudal también se realiza por sectorización del compresor. Por último, el modelo scroll de Bitzer ofrece una potencia de 22,6kW además de la opción de regulación de caudal con variador de frecuencia. Sin embargo, no ofrece la potencia mínima requerida por el equipo así que la mejor solución es colocar dos compresores de este último modelo en paralelo. Por tanto, el modelo seleccionado es GSP80485ZL-40S.



### Legend

 suction gas superheat = 5K

 A

Figura 55. Límites compresor GSP80485ZL-40S.

Fuente: [58]

Technical Data	
Displacement (2900rpm 50 Hz)	77,2 m³/h
Displacement (3500rpm 60 Hz)	93,2 m³/h
Weight	160 kg
Max. pressure (LP/HP)	31 / 45bar
Connection suction line	
Direct brazing connection	1 5/8 (Standard "B" version)
Rotalock adapter	2 1/4(Option)
Rotalock shut-off valve	2 1/4(Option)
Connection discharge line	
Direct brazing connection	1 3/8 (Standard "B" version)
Rotalock adapter	1 3/4(Option)
Rotalock shut-off valve	1 3/4(Option)
Oil type R290	BSG68K (Standard)
Motor Data	
Motor voltage (more on request)	380-420V Y-3-50Hz
Max. operating current	63.0 A
Starting current (Rotor locked)	274.0 A
Max. power input	49,0 kW
Extent Of Delivery (Standard)	
Oil charge	5,3 dm³
Motor protection	SE-B3
Enclosure class	IP54
Available Options	
Oil heater	140 W
Discharge gas temperature sensor	Option
Motor protection	SE-E1
Vibration dampers	Option
Sound Measurement	
Sound power level (+5°C / 50°C)	84,9 dB(A) @50 Hz
Sound pressure level @ 1m (+5°C / 50°C)	76,9 dB(A) @50 Hz

Figura 56. Información compresor GSP80485ZL-40S.

Fuente: [58]

Además de esta información sobre el compresor, el software facilita datos de este trabajando a diferentes frecuencias, por ejemplo, a 75 Hz proporciona 29,0kW un solo compresor.

Compressor	GSP80485ZL-40S
Compressor frequency	75,0 Hz
Cooling capacity	29,0 kW
Cooling capacity *	27,7 kW
Evaporator capacity	29,0 kW
Power input	22,5 kW
Current (400V)	34,2 A
Voltage range	380-420V
Condenser capacity	51,5 kW
COP/EER	1,29
COP/EER *	1,23
min. cooling capacity	14,95 kW (35 Hz)
max. cooling capacity	29,0 kW (75 Hz)
Mass flow	401 kg/h
Discharge gas temp. w/o cooling	103,9 °C

Figura 57. Compresor a 75 Hz.

Fuente: [58]

Ya que he calculado el ciclo termodinámico teórico del sistema con Excel es interesante modelizar también los componentes elegidos e integrarlos en dicho Excel. Para ello Bitzer proporciona el polinomio del compresor con el que se puede obtener las curvas de funcionamiento. Los datos importados del software de Bitzer son los siguientes:

Polinomio:  $y = c1 + c2 \cdot to + c3 \cdot tc + c4 \cdot to^2 + c5 \cdot to \cdot tc + c6 \cdot tc^2 + c7 \cdot to^3 + c8 \cdot tc \cdot to^2 + c9 \cdot to \cdot tc^2 + c10 \cdot tc^3$ , siendo “tc” la temperatura de condensación y “to” la temperatura de evaporación.

Por otro lado, los coeficientes que aparecen en el polinomio son:

Coefficients:	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10
Q [W]	110987,1438	73732,0871821	-458,728633	50,550365022	-12,8507997	-6,04660637	0,288183499	-0,30466304	-0,15611169	0,00896770752668091000
P [W]	6662,760556	-88,2883655	610,1726296	-4,97239781	8,245739849	-7,63675727	-0,09261339	0,126347321	-0,05958368	0,08995745804549390000
m [kg/h]	1016,495743	30,48758070	1,903256834	0,362013533	0,090274947	-0,02452719	0,002482500	-0,00020768	-0,00082674	-0,0002422
I [A]	9,953003384	-0,1019097	1,042199155	-0,00784852	0,009905249	-0,01668777	-0,00013729	0,00020402	-4,778E-05	0,0001936

Figura 58. Coeficientes polinomio compresor.

Fuente: [58]

El rango de validez del polinomio es para una temperatura de evaporación de entre  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ , una temperatura de condensación de 10 a  $80^{\circ}\text{C}$ , de acuerdo con la normativa [59] la cual establece las condiciones de los compresores refrigerantes volumétricos.

Una vez conocida toda esta información se está en disposición de modelar el comportamiento del compresor, solo debo de tener en cuenta que en el polinomio no aparece ningún parámetro que incluya la frecuencia de giro por lo que será necesario discretizar el comportamiento de este según diferentes opciones disponibles en el software del fabricante. Cabe destacar, como he mencionado anteriormente, que se utilizarán dos compresores en paralelo, uno trabajará a frecuencia constante de 50 Hz, es decir sin variador de frecuencia, mientras que el otro se ajustará a los requerimientos del equipo en cada momento con una frecuencia variable entre 35 Hz y 75 Hz.

Lo primero es extraer datos del compresor trabajando a diferentes frecuencias, para ello hay que descargar los parámetros del polinomio para cada frecuencia, estableciendo la temperatura de condensación, evaporación y por último calculo el polinomio.

Compresor 2 - F variable													
tc	40												
to	-25												
		Frecuencia Real (Hz)			51,5815								
f (Hz)	Magnitudes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Resultados	
35	P [W]	2581,4561	-132,20023	258,24608	-6,0440147	8,351015129	-4,83260939	-0,0797194	0,15303	-0,1171957	0,073203	10799,7867	
	m [kg/h]	517,48828	15,654482	0,0388713	0,1964032	0,071883078	0,02214368	0,0011361	-0,0003128	-0,001051	-0,0004367	202,500314	
40	P [W]	3437,9787	-98,424178	257,93173	-4,7721709	6,059095555	-4,13294907	-0,0600076	0,1234361	-0,0865927	0,0673797	12360,9573	
	m [kg/h]	602,63444	18,164349	-0,0221239	0,2224974	0,061523938	0,01944278	0,0013442	-0,0003833	-0,0009161	-0,0004142	235,838925	
50	P [W]	5092,7499	-20,080753	266,39888	-1,1706251	0,381678326	-2,70396446	0,0006469	0,0389684	-0,0084108	0,0515546	15411,0913	
	m [kg/h]	777,0297	23,209989	-0,0389608	0,2708925	0,029358024	0,00514723	0,0017937	-0,0005172	-0,0004788	-0,0002661	304,569142	
60	P [W]	5633,3043	-88,015858	378,95176	-3,4047833	3,66322291	-4,21517077	-0,0196416	0,0884144	-0,036985	0,0653623	18636,134	
	m [kg/h]	962,80212	29,013692	-0,6447882	0,334348	0,006494143	0,00397709	0,0021289	-0,0007309	-0,0004669	-0,0002166	373,780542	
75	P [W]	6777,3484	-80,288964	599,76528	-4,779971	7,846017492	-7,36908133	-0,0911021	0,1223423	-0,055132	0,087891	22463,4812	
	m [kg/h]	990,71275	29,608468	1,8326656	0,3466812	0,086900518	-0,02321065	0,002312	-0,0002145	-0,0007862	-0,0002421	390,912052	

Figura 59. Parámetros polinomio compresor.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos estos datos, se interpola y obtiene la potencia y caudal para la frecuencia establecida, en este caso 51,58 Hz ya que como se verá se obtendrá un número redondo en la potencia frigorífica.

	Resultados	Lógica	Resultado
35	10799,787	0	15921,13181
	202,50031	0	315,5149247
35 < f ≤ 40	15977,097	0	
	313,06115	0	
40 < f ≤ 50	15893,47	0	
	315,43883	0	
50 < f ≤ 60	15921,132	15921,132	
	315,51492	315,51492	
60 < f ≤ 75	16488,099	0	
	364,16577	0	

Figura 60. Resultados frecuencia interpolada.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, se ha añadido una columna que da un valor booleano, 0 o 1, según se encuentra la frecuencia entre los valores recogidos. Si se intenta calcular valores de potencia y caudal para una frecuencia que está fuera de estos 5 rangos, no se obtendrá ningún valor.

A modo de resumen, uno de los compresores trabajará a velocidad fija por tanto las entradas para este serán temperatura de condensación y evaporación, el otro trabajará con velocidad variable siendo las entradas temperatura de evaporación y condensación y frecuencia real de giro.

Compresor 1 - Todo/Nada												Results
tc	40											15411.09
to	-25											304.57
Frecuencia (Hz)	Magnitudes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Results
50	P [W]	5092.7499	-20.080753	266.39888	-1.1706251	0.381678326	-2.70396446	0.0006469	0.0389684	-0.0084108	0.0515546	15411.09
	m [kg/h]	777.0297	23.209989	-0.0389608	0.2708925	0.029358024	0.00514723	0.0017937	-0.0005172	-0.0004788	-0.0002661	304.57

Compresor 2 - F variable												Resultados
tc	40											10799.7867
to	-25											202.500314
f (Hz)	Magnitudes	Frecuencia Real (Hz)			C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Resultados
		C1	C2	C3								
35	P [W]	2581.4561	-132.20023	258.24608	-6.0440147	8.351015129	-4.83260939	-0.0797194	0.18303	-0.1171957	0.073203	10799.7867
	m [kg/h]	517.48828	15.654482	0.0388713	0.1964032	0.071883078	0.02214368	0.0011361	-0.0003128	-0.001051	-0.0004367	202.500314
40	P [W]	3437.9787	-98.424178	257.89179	-4.7721709	6.059095555	-4.13294907	-0.0600076	0.1234361	-0.0865927	0.0673707	12360.9573
	m [kg/h]	602.63444	18.164349	-0.0221239	0.2224974	0.061523938	0.01944278	0.0013442	-0.0003893	-0.0009161	-0.0004142	235.838225
50	P [W]	5092.7499	-20.080753	266.39888	-1.1706251	0.381678326	-2.70396446	0.0006469	0.0389684	-0.0084108	0.0515546	15411.0913
	m [kg/h]	777.0297	23.209989	-0.0389608	0.2708925	0.029358024	0.00514723	0.0017937	-0.0005172	-0.0004788	-0.0002661	304.569142
60	P [W]	5633.3043	-80.015858	378.95176	-3.4047833	3.66322291	-4.21517077	-0.0196416	0.0884144	-0.036985	0.0653623	18636.134
	m [kg/h]	962.80212	29.013692	-0.6447882	0.334348	0.006494143	0.00397709	0.0021289	-0.0007309	-0.0004669	-0.0002166	373.780542
75	P [W]	6777.3484	-90.288964	599.76528	-4.779971	7.846017492	-7.36908133	-0.0911021	0.1223423	-0.055132	0.087891	22463.4812
	m [kg/h]	990.71275	29.608468	1.8326656	0.3466812	0.086900518	-0.02321065	0.002312	-0.0002145	-0.0007862	-0.0002421	390.912052

	Resultados	Lógica	Resultado
35	10799,787	0	15921,13181
	202,50031	0	315,5149247
35 < f ≤ 40	15977,097	0	
	313,06115	0	
40 < f ≤ 50	15893,47	0	
	315,43883	0	
50 < f ≤ 60	15921,132	15921,132	
	315,51492	315,51492	
60 < f ≤ 75	16488,099	0	
	364,16577	0	

Figura 61. Salidas compresores.

Fuente: Elaboración propia.

Ya con esto se está en disposición de calcular la potencia que ofrece el compresor y el caudal de refrigerante necesario:

### Compresor de velocidad fija

$$\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \frac{\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600} = \frac{304,57}{3600} = 0,0846 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{\text{comp}} = \frac{P[\text{W}]}{1000} = \frac{15411,09}{1000} = 15,412 \text{ kW} \quad (7)$$

### Compresor velocidad variable (a 51,58Hz)

$$\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \frac{\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600} = \frac{315,514}{3600} = 0,0876 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad (8)$$

$$\dot{W}_{\text{comp}} = \frac{P[\text{W}]}{1000} = \frac{15921,132}{1000} = 15,921 \text{ kW} \quad (9)$$

Por tanto, el caudal de refrigerante total necesario será  $\dot{m} = 0,1722 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$  ofreciendo una potencia total de  $\dot{W}_{\text{comp}} = 31,33 \text{ kW}$ .

### 3.3.2 Evaporador

Para la selección de este componente lo primero sería calcular la potencia frigorífica que arroja el sistema con la carga de refrigerante que ofrece el compresor ya que en un principio se estimó la carga de refrigerante teórica a partir de la especificación del proyecto de 40kW de potencia frigorífica, pero con los datos obtenidos del compresor, este valor puede haber variado.

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 0,1722 \cdot (554 - 292,8) = 45 \text{ kW} \quad (10)$$

Como se puede ver la potencia frigorífica que se obtiene es mayor que la especificada inicialmente en el trabajo, esto es debido a que en la selección del compresor se escogió un modelo un poco mayor de lo necesario y también por la elección del valor de la frecuencia de uno de los compresores, pero esto es conveniente ya que así se trabaja con cierto margen de seguridad.

Para la selección del evaporador he optado directamente por hacerlo con el software de SWEP. Dado que en las especificaciones del proyecto se establece que la temperatura de

impulsión del fluido de intercambio en el circuito secundario ha de ser igual a  $-15^{\circ}\text{C}$  es necesario utilizar algún tipo de anticongelante para evitar que se produzca la congelación de este. Se opta por usar agua glicolada, pero hay que determinar cuánto debe ser el porcentaje de ésta.

% Propilenglicol	Temperatura de Congelación $^{\circ}\text{C}$
0%	0
10%	-3
20%	-8
30%	-14
40%	-22
50%	-34
60%	-48
100%	-59

*Figura 62. Composición de anticongelante.*

*Fuente: [60]*

Por seguridad es adecuado elegir agua glicolada con una composición del 40% de anticongelante, asegurando así que en todo momento durante el funcionamiento del equipo nunca se alcance condiciones de congelación.

Ahora se deben introducir estos datos en el software de SWEP.

DESIGN	PERFORMANCE	RATING
Fluido Side 1	R290 (Propano)	
Fluido Side 2	Etilen glicol - agua	40 % mass
Flow type	Counter current	
Intercambiadores	B35TH4 × FI-Types × PI-Types × V-Types × P-Types ×	
	<b>Lado 1</b>	<b>Lado 2</b>
Heat load	45,00 kW	
Temp. del líq. subenfriado	35,0 °C	
Inlet vapor quality		
Outlet vapor quality	1	
Temp. de entrada		-10,0 °C
Evaporator temp.	-25,0 °C	
SuperHeating	5,0 K	
Temp. de salida		-15,0 °C
Fluir	kg/s	kg/s
Max pressure drop	50,0 kPa	50,0 kPa
Número de placas		
Oversurfacing		%
Rendimiento automático		<input type="checkbox"/>
Input units		Metric US
<b>Filters</b>		
Factories	All factories ×	
Materials	All materials ×	
Pressures	All pressures ×	
Warehouses		
^		
<b>CALCULAR</b>		

Figura 63. Datos de entrada SWEF.

Fuente: [61]













...	NoUnits	BPHE	A [m <sup>2</sup> ]	DP1 [kPa]	DP2 [kPa]
 	1	P80ASx62	3.60	32.3	50.5
 	1	P85ASx90	5.28	26.1	51.1
 	1	P80x76	4.44	16.2	50.9
 	1	V80x76	4.44	20.8	51.0
	1	PI190x44	4.32	25.3	49.0
 	1	B35TH4x36	3.20	22.8	44.2
	1	P250ASx36	4.41	27.9	50.4

Figura 64. Lista opciones evaporadores.

Fuente: [61]

Los evaporadores de tipo P, son diseñados para aplicaciones con baja caída de presión en el lado del refrigerante, eficientes para evaporadores de expansión directa y muy usados en sistemas de refrigeración tradicionales. Los de tipo V son diseñados para una alta eficiencia térmica, son optimizados para condensadores. Por otro lado, los tipos PI están pensados para un rango amplio de aplicaciones, son como un diseño mejorado del tipo P. Por último, el evaporador tipo B están pensados para sistemas de expansión directa, ideales para trabajar cerca del punto de ebullición del refrigerante, mejoran la eficiencia del ciclo y son muy útiles para equipos de refrigeración industrial.

Tanto el tipo B como el P podrían ser útiles para el diseño de la enfriadora, aunque si se quiere aprovechar mejor el rendimiento del refrigerante lo ideal sería elegir el evaporador tipo B. Por consiguiente, se elige el modelo B35TH4, del cual podemos modificar el número de placas hasta obtener un equilibrio entre capacidad térmica y pérdida de carga. He optado por definir el número de placas en 50, no obstante, se debe comprobar que los datos extraídos de SWEP para este evaporador se ajustan correctamente a los valores obtenidos en un principio mediante el modelo termodinámico del sistema en condiciones nominales de funcionamiento.

SSP alias:		B35TH4	
REQUERIMIENTOS		CIRC. 1	CIRC. 2
Fluido		R290 (Propano)	Etilen glicol - agua (40.0 mass%)
Tipo de flujo		Contracorriente	
Circuito		Interior	Exterior
Potencia	kW		45.00
Temp. del liq. subenfriado	°C	35.00	
Calidad de vapor de entrada		0.377	
Calidad de vapor de salida		1.000	
Temperatura de entrada	°C	-23.4	-10.0
Temperatura de evaporación (rocío)	°C	-25.0	
Sobrecalentamiento	K	5.0	
Temperatura de salida	°C	-20.0	-15.0
Caudal	kg/s	0.1723	2.678
• vapor de entrada	kg/s	0.06493	
Fluido evaporado	kg/s	0.1074	
INTERCAMBIADOR A PLACAS		CIRC. 1	CIRC. 2
Area de transferencia de calor	m <sup>2</sup>		4.51
Flujo de calor	kW/m <sup>2</sup>		10.0
Diferencia de temperatura media	K		12.1
Overall heat transfer coefficient necesario	W/m <sup>2</sup> ·°C		823
Pérdida de carga - total*	kPa	13.7	24.8
- en puertos (Entrada/Salida)	kPa	-0.0781/0.458	0.371
Pérdida de carga en distribución fluida	kPa	0.000 - 0.000	
Presión de operación - salida	kPa	204	
Número de canales por paso		24	25
Numero de platos		50	
Sobredimensionamiento	%	21	
Factor ensuciamiento	m <sup>2</sup> ·°C/kW		0.215
Diámetro de las conexiones (arriba/abajo)	mm	61.0/61.0	61.0/61.0
Diámetro de la conexión de entrada recomendado	mm	26.1 - 41.2	
Diámetro de la conexión de salida recomendado	mm	42.6 - 95.3	
Número de Reynolds			85.12
Velocidad en conexiones – outlet	m/s	12.7	0.855
Velocidad en canal	m/s	3.25	0.210
Tensión de corte	kPa		0.0753
La mayor diferencia de temperatura de la pared	K		0.4
Min/ Máx. temperatura de pared	°C	-20.0/-11.8	-19.8/-11.7

\* Excluyendo caída de presión en las conexiones.

Figura 65. Información evaporador B35TH4.

Fuente: [61]

Antes de seguir es conveniente calcular en el modelo la cantidad de caudal necesario en el circuito secundario, es decir el caudal de glicol. Para ello vuelvo a hacer uso del complemento CoolProp de Excel, primero defino la mezcla de agua con etilenglicol al 40%, la temperatura de entrada y salida del circuito secundario. Una vez introducidos estos parámetros se obtiene el calor específico de esta mezcla, con la ayuda de la siguiente función:

$$propsSI(C; T; PROMEDIO(C51: C52) + 273,15; P; 100000; \$C\$50) * (0,001) \quad (11)$$

Donde se calcula el calor específico con el promedio de las temperaturas de entrada y salida (en Kelvin), y la presión. La celda C50 hace referencia a la mezcla de agua con etilenglicol y se multiplica por 0,001 para obtener unidades de kJ/kg·K. Por último, para calcular el caudal de glicol se aplica la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{(T_e - T_s) * c_{p_w}} = \frac{45}{(-10 + 15) \cdot 3,3785} = 2,6639 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (12)$$

Fluido	INCOMP::MEG[0.4]
Te (°C)	-10
Ts (°C)	-15
cp_w (kJ/kgK)	3,3785
m (kg/s)	2,6639
DT (K)	5

Tabla 9. Tabla datos glicol al 40%.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la potencia frigorífica utilizada es la calculada una vez conocido el caudal proporcionado por el compresor, no la definida en las condiciones del proyecto.

Para que se observen más fácilmente las diferencias y similitudes entre el modelo termodinámico y los valores proporcionados por el evaporador seleccionado se mostrarán en la siguiente tabla:

	Modelo teórico		Datos SWEP	
	R290	Glicol (40%)	R290	Glicol (40%)
Q_evap (kW)	45		45	
Temp. Líq. Subenfriado (°C)	35		35	
Título vapor de entrada	0,377		0,377	
Título vapor de salida	1		1	
Temperatura de entrada (°C)	-25	-10	-23,4	-10
Temperatura de evaporación (rocío) (°C)	-25		-25	
Sobrecalentamiento (K)	5		5	
Temperatura de salida (°C)	-20	-15	-20	-15
Caudal (kg/s)	0,17225	2,6639	0,1723	2,678
Pérdida de carga (kPa)	-		13,7	

Tabla 10. Comparativa datos teóricos y SWEP.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver como las diferencias entre el modelo termodinámico y los datos extraídos de SWEP son mínimas por tanto se puede considerar como correcta la selección de este evaporador para el sistema.

El siguiente paso sería integrar el comportamiento real del evaporador seleccionado dentro del modelo del ciclo termodinámico, para así poder evaluar su rendimiento bajo distintas condiciones de operación, más allá de las nominales. No obstante, el software SWEP DThermX, no proporciona expresiones analíticas como polinomios, por ejemplo, que describan el funcionamiento del evaporador en función de las variables de entrada.

Con el fin de darle una solución a esta limitación, se ha desarrollado un macro en VBA, Excel. Con esta herramienta se puede automatizar la interacción entre el software SWEP DThermX, introduciendo de forma automática los parámetros de entrada definidos previamente en Excel y extrayendo los resultados de salida. Estos resultados se vuelcan directamente en la hoja Excel donde está implementado el modelo termodinámico.

#### Macro VBA de SWEP DThermX

Las entradas necesarias para que pueda ejecutarse esta macro son la potencia de evaporación requerida (kW), temperatura de líquido subenfriado (°C), temperatura de entrada del glicol en el evaporador (°C), temperatura de evaporación (°C), sobrecalentamiento (°C) y por último la temperatura de salida del glicol en el evaporador (°C).

Q_evap (kW)	T_liq_sub (°C)	T_entrada (°C)	T_evap (°C)	$\Delta T_{rec}$ (°C)	T_salida (°C)
45	35	-10	-25	5	-15

Figura 66. Parámetros de entrada Macro SWEP.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las salidas que interesan para hacer un proceso iterativo que terminará cuando los datos de salida del software sean lo más parecidos a los calculados por el modelo termodinámico del ciclo, son el título de vapor de entrada en el evaporador, temperatura de entrada del refrigerante (°C), temperatura de salida del refrigerante (°C), caudal de refrigerante (kg/s) y caudal de agua glicolada (kg/s).

Inlet Vapor Quality	Tentrada_ref (°C)	Tsalida_ref (°C)	Caudal_ref (kg/s)	Caudal_glicol (kg/s)
0,377	-23,4	-20,0	0,1723	2.678

Figura 67. Parámetros de salida macro SWEP.

Fuente: Elaboración propia.

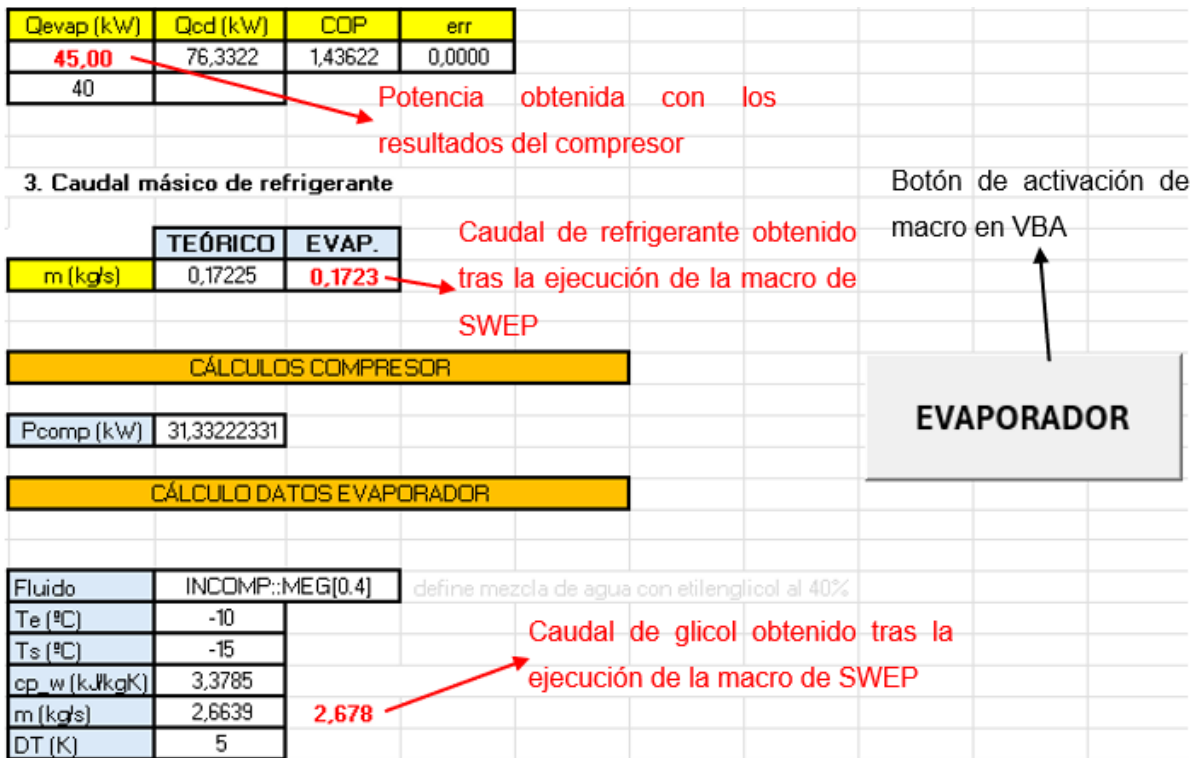


Figura 68. Datos del ciclo tras ejecución macro evaporador.

Fuente: Elaboración propia.

De este modo voy comparando los resultados obtenidos de cada componente con los calculados inicialmente, utilizando las salidas calculadas como nuevas entradas en el ciclo termodinámico, generando así el proceso iterativo.

### 3.3.3 Condensador

Para la selección de este componente he optado por un condensador aire-refrigerante, en el cual se produce el intercambio térmico entre el refrigerante en estado de vapor saturado y el aire ambiente que circula por el haz de tubos y aletas. Eligiendo como fabricante Deltacoils, el cual proporciona un software para la selección de dicho componente.

Los parámetros que necesita este software para el cálculo son los siguientes:

T_seca (°C)	HR (%)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Tcond (°C)	Tdescarga(°C)
30	60	23668,23311	40	96,2

Figura 69. Parámetros entrada Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura seca del aire de entrada como se comentó en las restricciones se considera en 30°C, para la humedad relativa he establecido un 60%, aunque ambos parámetros pueden cambiar según las condiciones.

Para conocer el caudal de aire necesario hay que realizar una serie de cálculos anteriores. En primer lugar, he obtenido el calor específico del aire para unas determinadas temperaturas de entrada y salida del condensador, para ello uso de nuevo el complemento CoolProp de Excel.

$$\text{propsSI}(C; T; \text{PROMEDIO}(T_e: T_s) + 273,15; P; 100000; \text{Air}) * (0,001) \quad (13)$$

Fluido	Air
Te (°C)	30
Ts (°C)	40
Hre (%)	60
Hrs (%)	35
P_aire (Pa)	101325
cp_w (kJ/kgK)	1,0067
m (kg/s)	7,5826
DT (K)	10
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1,153332578
Q (m <sup>3</sup> /h)	23668,23311

Figura 70. Calculo caudal de aire condensador.

Fuente: Elaboración propia.

El último cálculo necesario, antes de determinar el flujo másico de aire es la potencia térmica a disipar por el condensador, es decir:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{ref}} \cdot (h_2 - h_3) = 0,17225 \cdot (735,9 - 292,8) = 76,3239 \text{ kW} \quad (14)$$

Una vez calculado el calor específico del aire en dichas condiciones, calculo el flujo másico de aire necesario, a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{c_{p_w} \cdot (T_s - T_e)} = \frac{76,3239}{1,0067 \cdot (40 - 30)} = 7,5826 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (15)$$

El único problema es que el software de Deltacoils pide este dato en otras unidades, por tanto, necesito calcular la densidad y a partir de ahí el caudal.

$$\rho = \text{Densidad}(T_e; H_{re}; P_{\text{aire}}) = \text{Densidad}(30; 60; 101325) = 1,1533 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (16)$$

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot 3600 = 23668,2331 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (17)$$

Por último, la temperatura de condensación y la temperatura del gas caliente son conocidas, la temperatura de condensación es una condición inicial que supuse y la temperatura de gas caliente fue calculada en el modelo teórico. Una vez conocidos todos los valores se procede a calcular en el software de Deltacoils.

Hay dos formas de proceder para el cálculo, la primera es añadiendo también el valor de la potencia frigorífica, así se obtendrán una serie de resultados. La segunda es sin añadir la potencia frigorífica, pero añadiendo las dimensiones y geometría de la batería condensadora.

Air side				Dimensional and geometric data										
<b>In air</b>		<b>Out air</b>		<b>Geometry</b>										
Dry bulb temp. [°C]	30	Dry bulb temp. [°C]		-										
Wet bulb temp. [°C]	23,8	Dry bulb temp. [°C]		<b>Fin</b>										
R.H. [%]	60	Jout [kJ/kg]	77,1	type	C	Material	Al							
Jin [kJ/kg]	71,0			Thick [mm]	0,100	Step [mm]	2,5							
Altitude [m]	0			<b>Tube</b>										
				type	R	Material	CuR							
<b>Flow rate [m3/h]</b>	23668	<b>Flow rate [kg/h]</b>	26982	Thick [mm]								Safety [%]	0	
<b>Velocity [m/s]</b>	6,6	<b>Density [kg/m3]</b>	1,14					Headers n.	1					
<b>Cooling capacity [kW]</b>	45													
Fluid side														
<b>Fluid type</b>		<b>Condensing temp. Dew [°C]</b>												
R290 (propane)		40												
		<b>Warm gas [°C]</b>												
		96,2												
		<b>Subcooling TD [K]</b>												
		5												
<b>Max pressure drop [kPa]</b>		<b>Flow rate [kg/h]</b>												
30														
CODE	R [%]	Qt [KW]	DBTout [°C]	Rhout [%]	Vel [m/s]	dpa [Pa]	Tc [°C]	qf [kg/h]	dpf [kPa]	dpf [°C]				
25 x 21.65 3/8 - CR 40NT 4NR 1000A 2,5P 11NC	9,4	45,0	36,0	43	6,57	263,1	40,0	365	26	0,75				
25 x 21.65 5/16 - CR 40NT 4NR 1000A 2,5P 16NC	2,3	45,0	36,0	43	6,57	207,5	40,0	365	23	0,65				
25 x 21.65 7mm - CR 40NT 5NR 1000A 2,5P 20NC	17,1	45,0	36,0	43	6,57	226,8	40,0	365	26	0,76				
25 x 25 3/8 - CR 40NT 5NR 1000A 2,5P 12NC	12,3	45,0	36,0	43	6,57	286,9	40,0	365	25	0,71				
30 x 25.98 12mm - CR 33NT 4NR 1000A 2,5P 7NC	15,8	45,0	36,0	43	6,64	299,1	40,0	365	24	0,72				

Figura 71. Cálculo Deltacoils.

Fuente: Software Deltacoils.

Como se puede observar se obtienen distintas geometrías posibles como opciones viables para el proyecto.

Entre ellas he elegido la geometría 25x21.65 7mm como la más adecuada ya que tiene tubos más finos que otros modelos, por ejemplo, frente a los 3/8” o los 12 mm de otros. Ahora una vez que está definida la geometría, se elimina el valor de la potencia frigorífica y hago los cálculos variando el paso entre aletas y también el número de filas y circuitos. Un paso menor entre aletas da lugar a mejor intercambio, pero también a más pérdida de carga. Al aumentar el número de filas la superficie de intercambio será mayor pero también existirá mayor resistencia al paso de aire. Por último, cuanto mayor sea el número de circuitos, menor será la caída de presión.

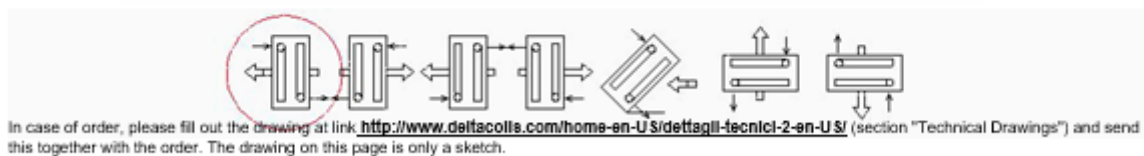
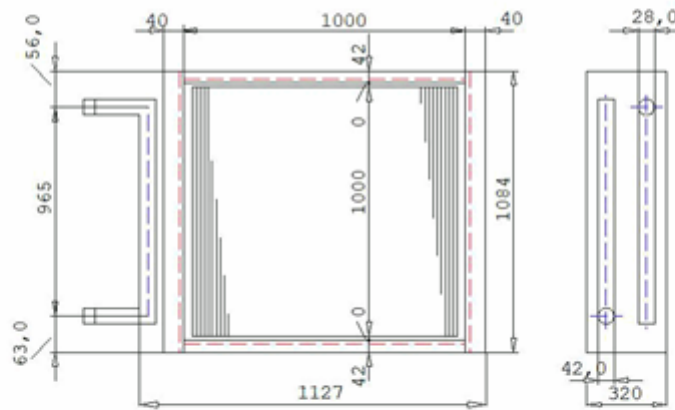
Si ahora realizo los cálculos añadiendo restricciones de geometría, en lugar de la potencia frigorífica, y teniendo en cuenta la potencia que debe disipar el condensador, la geometría óptima sería la siguiente:

Air side				Dimensional and geometric data											
<b>In air</b>		<b>Out air</b>		<b>Geometry</b> 25 x 21.65 7mm											
Dry bulb temp. [°C]	30	Dry bulb temp. [°C]	40	<b>Fins</b>											
Wet bulb temp. [°C]	23,8	Dry bulb temp. [°C]	40	type	C	Material	Al								
R.H. [%]	60	Jout [kJ/kg]	81,3	Thick [mm]	0,100	Step [mm]	3,2								
Jin [kJ/kg]	71,0			<b>Tube</b>											
Atitude [m]	0			type	R	Material	CuR								
				Thick [mm]											
<b>Flow rate [m3/h]</b>	23668	<b>Flow rate [kg/h]</b>	26982	N. tube	40	Safety [%]	0								
<b>Velocity [m/s]</b>	6,6	<b>Density [kg/m3]</b>	1,14	Height (B) [mm]	1000	Headers n.	1								
<b>Cooling capacity [kW]</b>				Rows N.	12										
<b>Fluid side</b>				Length (A) [mm]	1000										
<b>Fluid type</b>	R290 (propane)	Condensing temp. Dew [°C]	40	Circuits N.	40										
		Warm gas [°C]	96,2	Empty tubes [N.]											
		Subcooling TD [K]	5	Exchanger surface [m²]	161,1										
<b>Max pressure drop [kPa]</b>	30	Flow rate [kg/h]		Volume [lt]	15,9										
				Weight [kg]	72,7										
				Ø collectors [mm]	42/28										
				<input type="checkbox"/> Connection in opposite side.											
CODE	R [%]	Qt [KW]	DBTout [°C]	Rhout [%]	Vel [m/s]	dpa [Pa]	Tc [°C]	qf [kg/h]	dpf [kPa]	dpf [°C]					
25 x 21.65 7mm - CR 40NT 12NR 1000A 3,2P 40NC	3,4	75,3	40,0	35	6,57	483,4	40,0	612	22	0,59					

Figura 72. Resultados Deltacoils.

Fuente: Software Deltacoils.

Condensing coil: 25 x 21.65 7mm - CR 40NT 12NR 1000A 3,2P 40NC CuR-AI					
<b>AIR</b>		Sea Level		0 m	Barometric pressure
					1,0133 mBar
Air Volume Flow	23668 m <sup>3</sup> /h	Mass Flow	26982 kg/h	Density Air	1,100 kg/m <sup>3</sup>
		Velocity	6,57 m/s	Pressure drop dry air	483 Pa
Air IN - Dry bulb	30,0 °C	Air OFF - Dry bulb	40,0 °C	Capacity	75,3 kW
Air IN - Humidity	60 %	Air OFF - Humidity	35 %		
Air IN - Enthalpy	71,0 kJ/kg	Air OFF - Enthalpy	81,3 kJ/kg		
Air IN - Water content	16,0 g/kg	Air OFF - Water content	16,04 g/kg		
<b>REFRIGERANT</b>		<b>R290 (propane)</b>			
Hot Gas Temperature	96,2 °C	Pressure Drop	22,01 kPa	Refrigerant mass flow	0612 kg/h
Condensing Temperature	40,0 °C			Refrigerant volume flow	27 m <sup>3</sup> /h
Liquid Temperature	35,0 °C				
Subcooling Temperature	5,0 K				



Weight	79,6 kg	Volume	15,9 lit
Surface	161,1 m <sup>2</sup>	Header	42/28 mm

Figura 73. Datos de salida software Deltacoils.

Fuente: Software Deltacoils.

Una vez obtenidos los resultados mediante el software de Deltacoils comparo los datos obtenidos con la selección de esta batería condensadora con los datos del modelo.

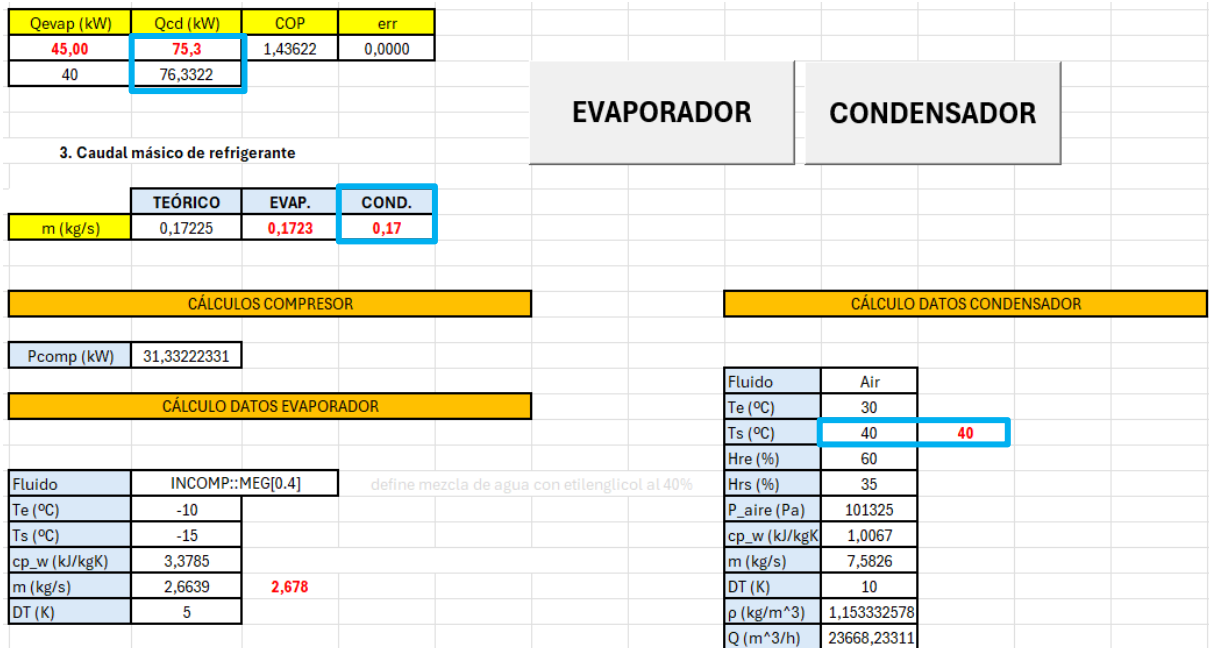


Figura 74. Comparativa resultados.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se puede ver marcado en un recuadro azul los datos obtenidos con el condensador elegido (en rojo) frente a los obtenidos con el modelo termodinámico inicialmente. Se puede apreciar que el condensador elegido es totalmente válido ya que los valores son muy similares entre sí.

Para este equipo igual que ocurría para el evaporador he necesitado crear una macro en VBA para extraer el comportamiento del condensador en diferentes condiciones operacionales ya que el software de DeltaCoils no ofrece la posibilidad de extraer curvas polinómicas.

En dicha macro, los parámetros de entrada son los mostrados en la Figura 69 y los de salida son los que se pueden ver en la siguiente imagen.

R. (%)	Potencia(kW)	Tseca_salida(°C)	HR_salida(%)	Vel_paso(m/s)	dPaire(Pa)	Tcond (°C)	Flujo másico ref(kg/h)	dPref(kpa)	dPf(°C)
3,4	75,3	40	35	6,57	483,4	40	612	22	0,59

Figura 75. Parámetros salida macro Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

Donde  $R$  [%] hace referencia al grado de sobredimensionamiento de la batería, luego aparece la potencia térmica liberada en el condensador en kW, seguido por la temperatura seca del aire de salida del condensador ( $^{\circ}\text{C}$ ), después la humedad relativa del aire de salida del condensador (%). La siguiente columna hace referencia a la velocidad del paso del aire por el condensador, posteriormente la caída de presión del aire en el condensador (Pa), temperatura de condensación ( $^{\circ}\text{C}$ ), seguida del caudal de refrigerante en el condensador (kg/h), en penúltimo lugar la caída de presión de refrigerante en el condensador (kPa) y por último la caída de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Las salidas devueltas una vez ejecutada la macro serán utilizadas como nuevas entradas en el ciclo termodinámico, realizando así un proceso iterativo.

### 3.3.4 Válvula

Entre todos los tipos de válvula he decidido utilizar una válvula de expansión electrónica por varios motivos. Entre ellos es que, al tener dos compresores, uno con frecuencia fija y otro con frecuencia variable, se va a modificar constantemente la capacidad frigorífica según la demanda térmica, por lo que se necesita que la válvula responda en tiempo real para regular el caudal de refrigerante. Además, con este tipo de válvula se mantiene un sobrecalentamiento óptimo en todo momento, ya que permite un ajuste dinámico en función de las condiciones de carga. Por otro lado, se consigue un rendimiento mucho más alto a carga parcial, esto significa que tendrá un mejor COP y menos consumo eléctrico.

Para seleccionar este componente he hecho uso del software online de Carel, ya que disponen de gran variedad de válvulas de expansión electrónicas y es una marca reconocida.

Cooling	
Cooling Capacity	45 kW
Evaporating Temp	-25 °C
Condensing Temp	40 °C
Pressure Drops	HP Side: 0.27 bar, LP Side: 0.18 bar
Subcooling at valve's inlet	5 K

Calculate

Figura 76. Parámetros de entrada software Carel.

Fuente: Software online [62]

De los parámetros introducidos en la *Figura 76*, tanto la potencia frigorífica, temperatura de evaporación y temperatura de condensación son conocidos ya que han sido utilizados para el cálculo de los componentes anteriores. En lo que respecta a las caídas de presión en el lado de alta y de baja se calculan de la siguiente manera:

Por un lado, se tiene LP, que se refiere a la caída de presión total después de la válvula de expansión hasta la aspiración del compresor. Por tanto, se debe sumar la caída de presión en el evaporador y la caída de presión en la línea de aspiración, este último valor se puede estimar entre unos 0,03 y 0,05 bares. La caída de presión en el evaporador es un dato que da SWEP, se puede ver en la *Figura 65*.

Para HP, es la caída de presión desde la salida del compresor hasta la entrada a la válvula de expansión. Se suma la caída de presión en el condensador, la caída de presión en la línea de descarga y en la línea de líquido. Igual que en el caso anterior se puede estimar la caída de presión en las líneas entre 0,03 y 0,05 bares. La caída de presión en el condensador también la proporciona Deltacoils, se puede ver en la *Figura 73*.

Tras haber introducido estos parámetros en el software online de carel y haber procedido al cálculo he obtenido una lista de 58 válvulas de expansión que podrían servir para este proyecto. Para sesgar la búsqueda de la válvula más conveniente he reducido el rango de trabajo entre un 63% y un 86%. Lo he decidido así porque si el punto de trabajo es menos de un 60% podría ocasionar problemas cuando el equipo tenga poca demanda y si es muy alto

significa que la válvula está trabajando en su punto máximo de capacidad, lo cual no es conveniente.

**Reset filters**

Working point (%)  
63 - 86

Valve Family

E2V  E3V  
 E4V  E5V  
 E6V  E7V

Body

HERMETIC  
 DEMOUNTABLE

Fitting Unit

SAE  SI

Fitting Material

BRASS  
 COPPER  
 BRASS/COPPER  
 STAINLESS STEEL

Package

ONE PACK  
 MULTIPACK

Certification

CE  UL

Sight Glass

Yes  No

Connection Types

ODF  FLARE  
 IDM

Technical leaflets may not be updated. Please visit [carel.com/electronic-expansion-valve](http://carel.com/electronic-expansion-valve) for a thorough view of available documentation.

Increase the quantity if you want to select the valves and/or the accessories

**Reset Quantity**

Total Valves: 14											
Code	Description	Sight Glass	Stator Included	Motor Type	Max Temp. (°C)	Fitting	Cable (m)	Working point (%)	Maximum capacity (kW)	Quantity	Capacity
E2V35ZSM03	BIPOLAR E2V35Z WHOLESALE 16MM(5/8 IN.) WITH SIGHT GLASS - 0.3M CABLE - IP67 SUPERSEAL CONNECTOR	with SG	YES	BIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	0.3	81	73.0	0	<a href="#">View</a>
E2V35ZSM13	BIPOLAR E2V35Z WHOLESALE 16MM(5/8 IN.) W/O SIGHT GLASS - 0.3M CABLE - IP67 SUPERSEAL CONNECTOR	w/o SG	YES	BIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	0.3	81	73.0	0	<a href="#">View</a>
E2V35ZSMB0	E2V35 SMART WITH INTEGRATED ORIFICE 16(5/8")-16(5/8") ODF W/O SIGHT GLASS - W/O STATOR COIL	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	-	81	73.0	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5M10	E3V45B BIPOLAR 16-16 (5/8"-5/8") ODF	w/o SG	YES	BIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5M50	E3V45B UNIPOLAR 16-16 (5/8"-5/8") ODF CABLE 2M	w/o SG	YES	UNIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	2.0	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5M70	E3V45B UNIPOLAR 16-16 (5/8"-5/8") ODF CABLE 0,3M IP67	w/o SG	YES	UNIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	0.3	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5MC1	E3V45B 16-16 (5/8"-5/8") ODF W/O ELECTRICAL COIL 10 PCS	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	70	Ø16 mm (5/8") ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5R10	E3V45B BIPOLAR 22-22 ODF	w/o SG	YES	BIPOLAR	70	Ø22-Ø22 mm ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45B5SRC1	E3V45B 22-22 ODF W/O ELECTRICAL COIL 10 PCS	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	70	Ø22-Ø22 mm ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45BWR10	E3V45B BIPOLAR 7/8"-7/8" ODF	w/o SG	YES	BIPOLAR	70	7/8" - 7/8" ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45BWR0C	E3V45B 7/8"-7/8" ODF W/O ELECTRICAL COIL	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	70	7/8" - 7/8" ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45BWR1C	E3V45B 7/8"-7/8" ODF W/O ELECTRICAL COIL 10 PCS	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	70	7/8" - 7/8" ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45KWRC0	E3V45K 7/8"-7/8" ODF W/O ELECTRICAL COIL	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	100	7/8" - 7/8" ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>
E3V45KWRC1	E3V45K 7/8"-7/8" ODF W/O ELECTRICAL COIL 10 PCS	w/o SG	NO	UNIPOLAR OR BIPOLAR	100	7/8" - 7/8" ODF	-	74	88.4	0	<a href="#">View</a>

Figura 77. Lista VEE carel.

Fuente: software online [62]

Con una válvula trabajando al 81% de su capacidad parece un buen margen, por ello he selecciona la primera válvula de la lista, es decir, el modelo exacto sería el E2V35ZSM03.



Figura 78. VEE E2V35ZSM03 Carel.

Fuente: Página web [63]

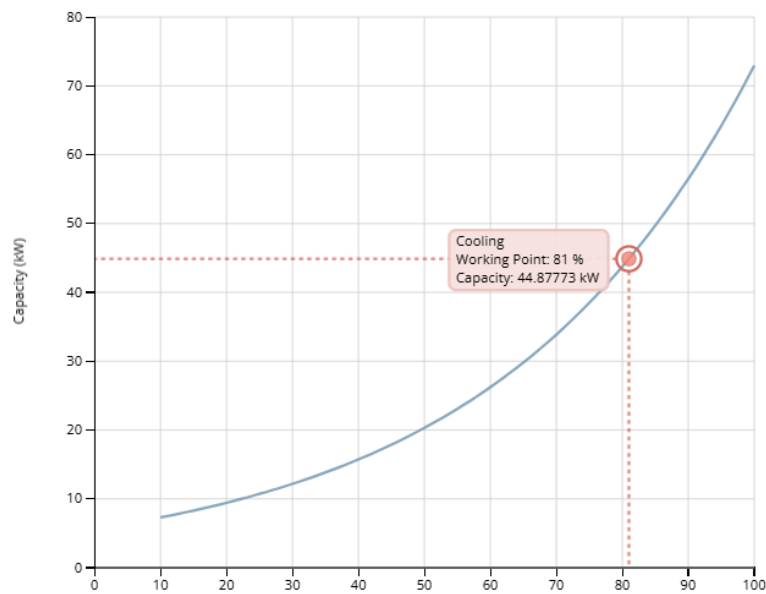


Figura 79. Capacidad para un % de trabajo.

Fuente: Software online [62]

Además, también se debe comprobar si el Kv proporcionado por la válvula seleccionada es compatible con el requerido en el sistema. Para ello he empleado la siguiente fórmula:

$$Kv = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho_r}{\Delta P}} \quad (18)$$

Q: caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/h.

$\rho_r$ : densidad del refrigerante dividida entre densidad del agua.

$\Delta P$ : diferencia de presión en bar.

$\rho_{ref}$ (kg/m <sup>3</sup> )	476,7
m (kg/s)	0,17225
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,0004
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,3008
$\rho_{agua}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_{rel}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,4767
$\Delta P$	11,6599
KV (m <sup>3</sup> /h)	0,2630

Tabla 11. Cálculo Kv.

Fuente: Elaboración propia.

En los catálogos comerciales se define el Kv<sup>3</sup> en base al caudal de agua en m<sup>3</sup>/h con una caída de presión de 1 bar a 20°C, por ello se utiliza esa densidad relativa. Si comparo el Kv obtenido con el Kv de la válvula seleccionada se puede observar que cumple con bastante margen.

	Valve Type <sup>(1)</sup>	Key words	Drive type	Performance					
				Capacity <sup>(2)</sup> [kW] [Tons]	KV [m <sup>3</sup> /h] [GPM]	MWP <sup>(3)</sup> [barg] [PSIg]	MOPD <sup>(4)</sup> [bar] [PSI]	Refrigerant Temperature [°C] [°F]	Environment Temperature [°C] [°F]
E2V - F		OEM design Hermetic SS Body	Unipolar or Bipolar	0.08÷66 0.02÷19	0.004÷0.37 0.005÷0.43	45 (UL) - 60 (PED) 650 (UL) - 870 (PED)	35 508	-40÷70 -40÷158	-30÷70 -22÷158
E2V - Z		Demountable Modular install IP69k stator OneBodySize Filter included	Unipolar or Bipolar	0.16÷80 0.05÷23	0.012÷0.44 0.014÷0.51	45 (UL) - 80 (PED) 650 (UL) - 870 (PED)	35 508	-40÷70 -40÷158	-30÷70 -22÷158
E3V - B		All application Hermetic SS Body	Unipolar or Bipolar	6÷192 1.7÷55	0.31÷1.27 0.36÷1.46	45 (UL) - 60 (PED) 650 (UL) - 870 (PED)	40 580	-40÷70 -40÷158	-30÷70 -22÷158

Figura 80. Kv Carel.

Fuente: [64]

<sup>3</sup> El Kv se puede definir como un coeficiente que indica el caudal que puede atravesar la válvula.

### 3.3.5 Tuberías

Para llevar a cabo la estimación de las tuberías del sistema hice uso del software CoolSelector2 de Danfoss, además consideré su cálculo por metro de longitud de modo que se tendría que redimensionar en un futuro.

Se divide el circuito en tres tramos distintos, por los cuales el refrigerante circula a una presión y velocidad adecuada, teniendo las mínimas pérdidas posibles. Los tramos son:

#### Línea de líquido:

Es el tramo que se encuentra entre la salida del condensador y el inicio de la válvula de expansión.

#### Línea de aspiración:

Tramo de tubería que conecta la salida del evaporador con la entrada o aspiración del compresor. En este tramo se encuentra el gas a baja presión.

#### Línea de descarga:

Tubería que une la descarga del compresor con la entrada al condensador, por donde circula el gas caliente a alta presión.

Lo primero para calcular el diámetro de la tubería es seleccionar el tramo que se desea calcular y establecer los parámetros de entrada necesarios, que son los siguientes:

Sistema: Secca

Haga clic en el diagrama para seleccionar la línea:  
Línea seleccionada: Línea de líquido

Condiciones de funcionamiento

Capacidad:	Evaporación:	Condensación:	Adicional:
Capacidad de refrigerar: 45,00 kW	Temperatura: -25,0 °C	Temperatura: 40,0 °C	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatura de descarga: 96,2 °C
Caudal másico en la línea: 620,3 kg/h	Recalentamiento útil: 5,0 K	Subenfriamiento: 5,0 K	
Capacidad de calefacción: 76,36 kW	Recalentamiento adicional: 0 K	Subenfriamiento adicional: 0 K	

Criterios de selección:

<input type="radio"/> Caída de presión: Predeterm. bar	<input checked="" type="radio"/> Caída de temperatura de saturaci
<input type="radio"/> Velocidad: 1,00 m/s	0,020 K/m

Criterios de selección adicionales:

Longitud: 1,00 m
Ángulo: 0

Línea de líquido (Sistema de expansión seca. R290. Tuberías).

Figura 81. Selección tuberías. Línea de líquido.

Fuente: Software CoolSelector2.

También debo de seleccionar el tipo de tubería, entre las diferentes opciones, he optado por usar tuberías de cobre tipo DIN-EN, ya que son el tipo de tuberías que suelen usarse en Europa.

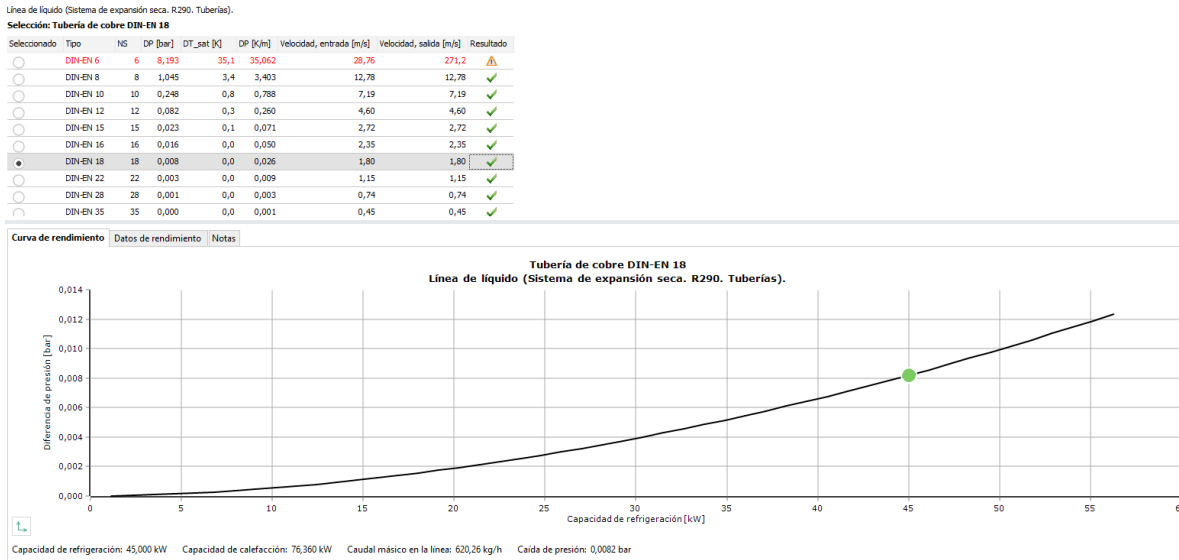


Figura 82. Opciones tubería línea de líquido.

Fuente: Software CoolSelector2.

Según el software el tramo de tubería más conveniente para la línea de líquido es de 18 mm de diámetro. Además, la velocidad del refrigerante a través de ésta es de 1,8 m/s por lo que está dentro del rango normal esperado que es entre 1 m/s y 3 m/s para este tramo.

Siguiendo ahora con la línea de descarga, los parámetros de entrada son los mismos que en la Figura 81, y obtengo las siguientes opciones:

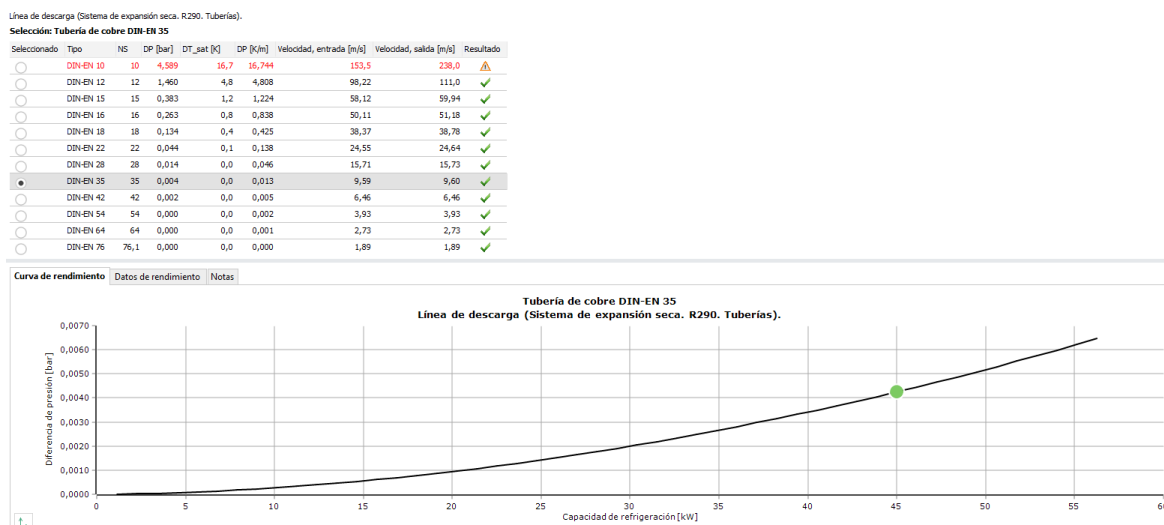


Figura 83. Opciones tubería. Línea de descarga.

Fuente: Software CoolSelector2.

El diseño elegido es el DIN-EN 35, teniendo una velocidad de 8,57 m/s lo cual entra dentro del rango típico de este tramo. Además, la pérdida de carga es de 0,004 bares, una pérdida muy poco notable.

Para la línea de aspiración las opciones son:

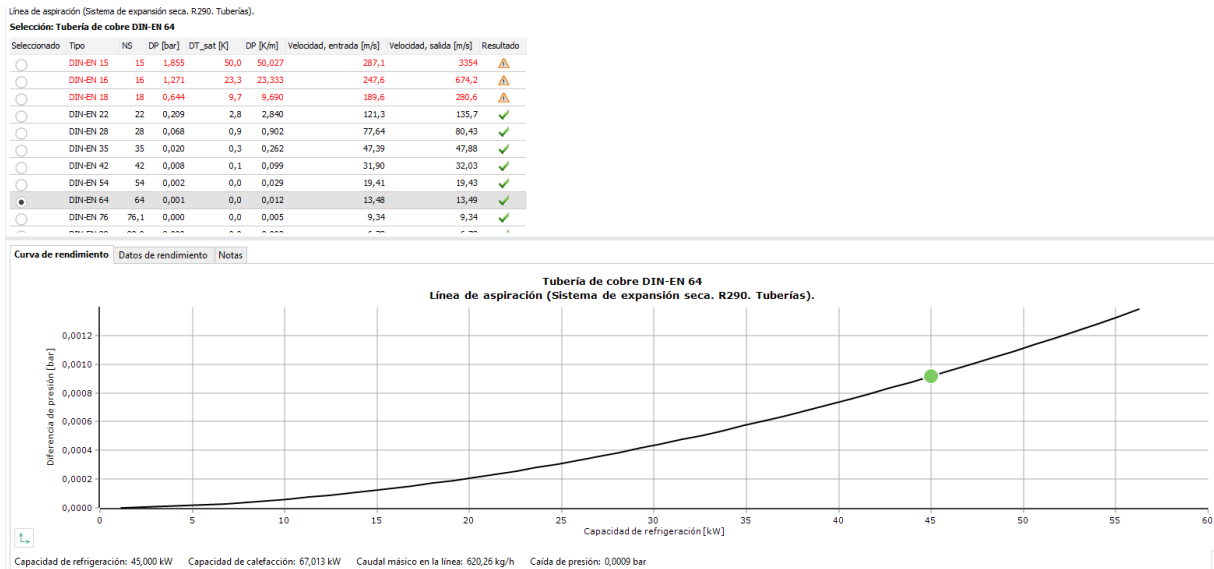


Figura 84. Opciones tubería. Línea de aspiración.

Fuente: Software CoolSelector2.

En este caso la tubería seleccionada sería la DIN-EN 64, con una velocidad de 13,48 m/s, algo mayor que en los otros dos casos, pero dentro de los límites normales que suelen ser entre 5 m/s y 15 m/s.

También se puede calcular la carga de refrigerante, aunque está variará al redimensionar la longitud de las tuberías ya que para las líneas de descarga, aspiración y líquido se calcula de la siguiente manera:

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad (19)$$

Y para el condensador y evaporador se obtiene el volumen directamente de los datos proporcionados por el fabricante al seleccionar el equipo.

Voy a realizar el proceso de obtener la cantidad de refrigerante para uno de los tramos y para el resto se obtiene de la misma manera. Por ejemplo, para la línea de líquido, se

establece la temperatura que es de 35°C, el diámetro de 16 mm y había supuesto por unidad de longitud. Se obtiene un volumen de 0,0002 m<sup>3</sup>. Seguidamente, apoyándome del complemento CoolProp de nuevo, he calculado la densidad del refrigerante en estas condiciones de la siguiente manera:

$$= \text{propsSI}(D; T; D129 + 273,15; P; 1369000; R290) \quad (20)$$

Con esa función se calcula la densidad (D) a través de la temperatura en Kelvin y la presión en ese punto que fue calculada al inicio en el ciclo termodinámico teórico.

Para obtener la carga basta con multiplicar la densidad por el volumen:

$$\text{Carga} = \rho \cdot V \quad (21)$$

Siguiendo el mismo procedimiento para los demás tramos y componentes, se obtiene lo siguiente:

Línea de líquido		Línea de aspiración		Línea de descarga	
T (°C)	35	T (°C)	-20	T (°C)	96,2
L (m)	1	L (m)	1	L (m)	1
D (mm)	16	D (mm)	64	D (mm)	35
V (m <sup>3</sup> )	0,0002	V (m <sup>3</sup> )	0,0032	V (m <sup>3</sup> )	0,0010
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	476,6927	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	4,5186	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	22,3293
Carga (kg)	0,0958	Carga (kg)	0,0145	Carga (kg)	0,0215
Evaporador		Condensador			
T (°C)	-25	T (°C)	40		
V (m <sup>3</sup> )	0,0031	V (m <sup>3</sup> )	0,0159		
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	4,6295	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	30,1516		
Carga (kg)	0,0142	Carga (kg)	0,4794	Carga total (kg)	0,62544

Figura 85. Carga de refrigerante.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.6 Ventilador

Para seleccionar un ventilador que sea capaz de mover el flujo de aire necesario en el condensador hay que tener en cuenta varios factores, entre ellos la presión estática, el nivel de ruido, la eficiencia energética y obviamente el flujo de aire.

Para la selección de este componente he consultado el catálogo de la marca Ebmpapst. Esta marca ofrece diferentes tipos de ventiladores como ventiladores compactos, axiales, centrífugos, etc.

Lo primero que he hecho ha sido comprobar el flujo de aire necesario, que lo puedo extraer de los datos obtenidos en Deltacoils. Dicho flujo es 23668 m<sup>3</sup>/h, una vez conocido el flujo he descartado los tipos de ventiladores que no son capaces de mover tal cantidad de corriente de aire. Los ventiladores compactos no son capaces de mover más de 11120 m<sup>3</sup>/h, por tanto, quedan descartados.

De entre los ventiladores axiales y centrífugos existen varios modelos capaces de mover una gran cantidad de aire, llegado este punto es importante tener en cuenta los demás factores, como por ejemplo que el ventilador seleccionado sea capaz de superar al menos una pérdida de carga de 483 Pa, dato extraído de Deltacoils y que se refiere a la caída de presión que experimenta el aire al atravesar el condensador.

He optado por seleccionar el modelo K3GA00-PV03-01, un ventilador centrífugo, ya que estos trabajan en un rango de presión mayor que los axiales los cuales tenían una presión insuficiente. Con este ventilador trabajando en su punto de eficiencia óptima se tienen los siguientes datos:

		Real	Solicitud 2015
Eficiencia general $\eta_e$		71,2	59,9
Grado de eficiencia N		73,3	62
Entrada de alimentación $P_e$	kW	6,35	
Corriente de aire $q_v$	m <sup>3</sup> /h	27600	
Aumento de presión pfs	Pa	570	
Velocidad n	min <sup>-1</sup>	750	

Datos en el punto de eficiencia óptima

Figura 86. Punto óptimo ventilador.

Fuente: Página web [65]

Como se puede observar supera la pérdida de carga que se produce en el condensador y es capaz de mover mayor flujo de aire que el necesario para el punto de funcionamiento establecido, lo cual es conveniente para trabajar así con margen de seguridad.

### 3.4 Desescarche

El ciclo diseñado opera a muy bajas temperaturas de evaporación, lo que da lugar a la producción de escarcha en el evaporador. Por ello, es conveniente utilizar alguno de los métodos de desescarche explicados en el apartado 2.4. En este caso, he elegido el desescarche por gas caliente mareado ya que es la opción más elegida en sistemas con temperatura de evaporación especialmente baja, como es este caso.

El proceso de desescarche puede aumentar la eficiencia de la enfriadora si se hace uso del hielo descongelado. Este hielo descongelado se puede acumular en un depósito con un serpentín por el que circula el refrigerante, que se situará justo antes del condensador.

Antes de que el refrigerante entre al condensador se producirá una transferencia de calor entre éste y el agua acumulada en el depósito, produciéndose una disminución de temperatura en el propano y por consiguiente una mayor eficiencia en el condensador ya que la diferencia de temperaturas entre el refrigerante y el aire en el condensador será menor, facilitando la condensación del refrigerante.

### 3.5 Metodología de modelado del ciclo

#### 3.5.1 Modelo

El modelo creado en Excel y el uso de las macros no tiene otro fin más que determinar el comportamiento de la enfriadora, pudiendo determinar su capacidad frigorífica, consumo energético y demás condiciones internas del ciclo.

En la *Figura 87* se puede observar cuáles son las entradas y salidas del modelo desarrollado para simular el rendimiento y comportamiento de la enfriadora diseñada. Las entradas principales son la temperatura del aire ambiente, temperatura y caudal másico del agua glicolada de entrada y la frecuencia tanto del compresor fijo como del variable. Una vez definidas las variables de entrada, el modelo calcula las condiciones internas del ciclo determinando parámetros como la potencia frigorífica, potencia eléctrica total consumida, COP, temperatura salida del agua glicolada y caudal de refrigerante, entre otras.

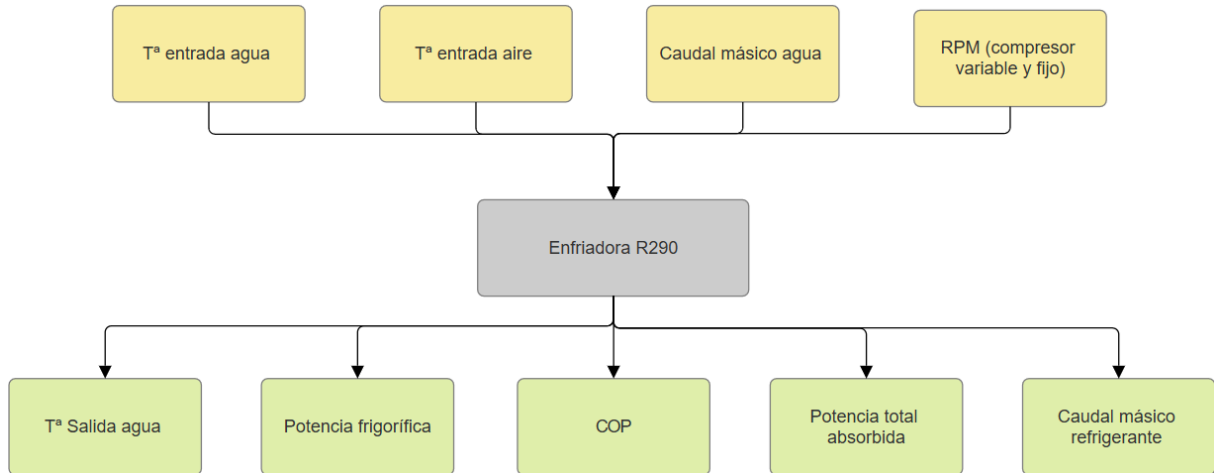


Figura 87. Entradas y salidas modelo.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 Procedimiento de cálculo

El diagrama de la *Figura 88* muestra visualmente el procedimiento que he seguido para el diseño de la enfriadora de este trabajo.

En primer lugar, se definen las variables de entrada y se estiman valores iniciales para poder comenzar con un primer cálculo, seguidamente se calculan los valores teóricos del ciclo de refrigeración para así poder comparar después con los valores obtenidos tras la selección de componentes. Una vez obtenido el ciclo teórico se procede a la selección de componentes, en el orden establecido en el diagrama. Posteriormente, se pueden obtener datos del ciclo como el coeficiente de rendimiento, potencia eléctrica, potencia frigorífica obtenida, etc. Se analizará si los parámetros obtenidos tras una primera iteración con la selección de componentes correspondiente son iguales o muy similares a los obtenidos teóricamente, si estos son iguales no es necesario repetir el proceso. Sin embargo, si no converge habrá que repetir el proceso, pero ya a través de las macros y con los componentes previamente definidos.

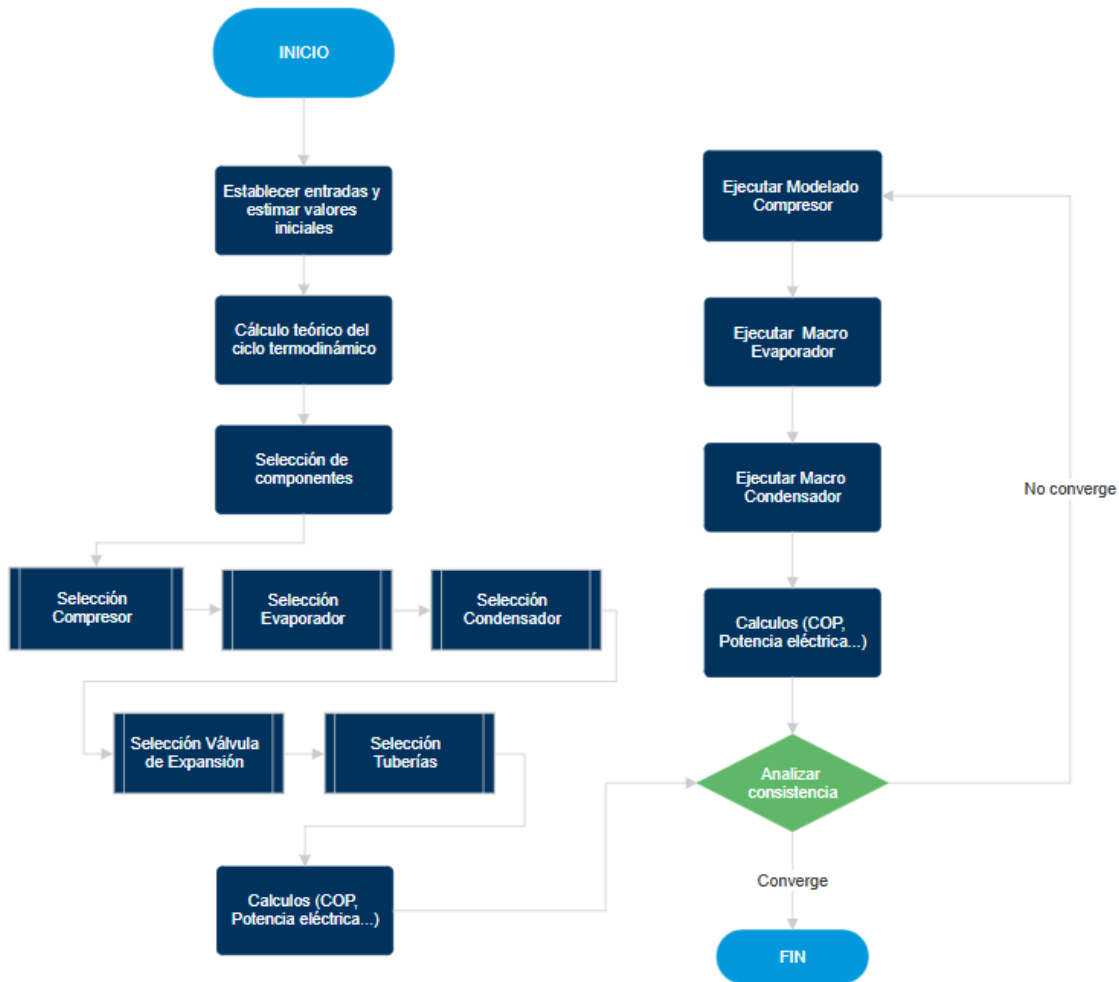


Figura 88. Procedimiento de cálculo.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3 Programación de macros

Como ya se ha comentado en apartados anteriores para modelizar algunos de los componentes del sistema se ha recurrido a hacer uso del lenguaje de programación incluido en Excel, Visual Basic for Applications. Este lenguaje permite automatizar tareas, estas pueden ser grabadas mientras se realizan y de ahí se crea directamente el código o puedes escribir el código de manera manual en el Editor de Visual Basic.

Lo que pretendo con estos códigos es que una vez definidos los parámetros de entrada en una hoja Excel, se ejecute la macro correspondiente, se introduzcan estos parámetros de manera automática en la aplicación que corresponda y obtener unos valores. Estos valores serán extraídos de nuevo a Excel obteniendo así información de cómo trabaja un determinado componente en unas condiciones definidas previamente.

Antes de nada, se ha realizado un código en la aplicación Visual Studio Code en lenguaje Python que al ejecutarlo proporciona las coordenadas x e y en cada instante.

```
#Configura la etiqueta para mostrar la posición
label = tk.Label(root, font=("Arial", 10), bg="yellow", padx=5, pady=2)
label.pack()

def actualizar_posicion():
    """Actualiza la posición de la ventana y la información del curso."""
    x, y = pyautogui.position() #Obtiene posición del ratón y mueve la ventana cerca del cursor
    label.config(text=f"X: {x}, Y: {y}") #Actualizar texto

    #Mover la ventana cerca del cursor
    root.geometry(f"+{x+15}+{y+15}") #La ventana se moverá al lado del cursor

    root.after(100, actualizar_posicion) #Se actualiza cada 100ms

#Iniciar la actualización de la posición
actualizar_posicion()
```

Figura 89: Código Python coordenadas.

Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 89* muestro un fragmento clave del código desarrollado. La finalidad de este código es crear una etiqueta de texto que muestre prácticamente en tiempo real las coordenadas x e y en las que se encuentra el cursor. Estas coordenadas se obtienen haciendo uso de una librería externa, *pyautogui*, la cual permite obtener la posición del cursor. La etiqueta creada se desplazará junto al cursor, facilitando así su visualización.

El siguiente paso sería abrir los softwares de cálculo sobre los que se desarrollarían las macros, con el objetivo de simular los movimientos que hace el ratón y registrar las coordenadas necesarias para automatizar el proceso. Por ejemplo, para realizar la macro del software Deltacoils, lo primero sería hacer clic en el apartado “Condensing” que como se puede observar en la *Figura 90* está situado en las coordenadas (74, 264).

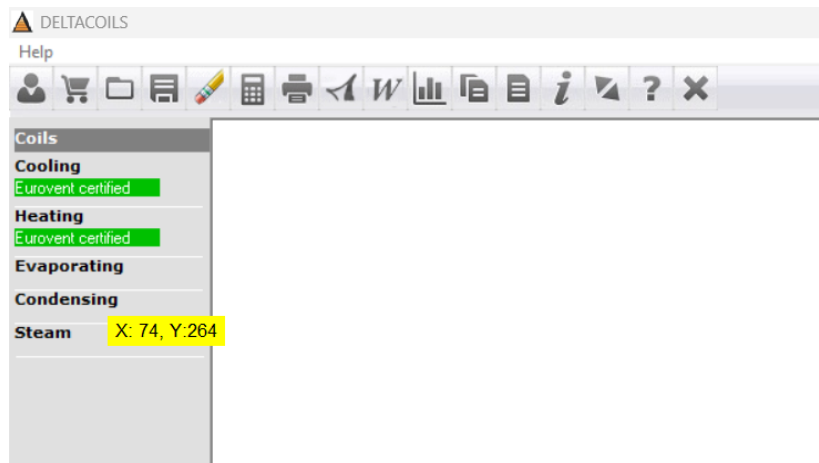


Figura 90: Coordenadas Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

Esto se repetiría para todos los demás parámetros que hay que configurar en el software. Una vez registradas todas las posiciones necesarias, desarrollé el código en VBE.

Una de las partes que más me costó fue comprender cómo podía extraer los datos del software y pegarlos en el Excel. Para ello tuve que implementar este código:

```
Sub PegarResultadosDeltaCoils()
' Asegurar que Excel está visible y en pantalla
Application.WindowState = xlNormal
AppActivate Application.Caption
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02")) ' Pequeña espera para evitar errores

' **Activar la hoja manualmente**
Sheets("Salidas Condensador").Activate
Sheets("Salidas Condensador").Select
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))

' **Seleccionar celda A1 y pegar**
Sheets("Salidas Condensador").Range("A1").Select
DoEvents ' Permitir que el sistema procese otras tareas

' **Intentar pegar con Ctrl + V**
On Error Resume Next
SendKeys "^v" ' Simula Ctrl + V
On Error GoTo 0

' **Limpia el modo de copia**
Application.CutCopyMode = False
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))
End Sub
```

Figura 91. Código pegar en Excel Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, el error se debía a que la hoja de cálculo no se activaba correctamente antes de ejecutar el pegado. Para solucionarlo, fue necesario introducir pausas temporales, asegurándome así que el Excel estuviera completamente activo antes de intentar pegar los datos.

```
' Mueve el cursor a la esquina superior izquierda (para evitar interferencias)
SetCursorPos 0, 0

' Seleccionar condensing
ClickEnPosicion 19, 262

' Selecciona el refrigerante Propano (R290)
Call SeleccionarPropano

' Seleccionar cosas predefinidas
Call PasosPrevios

' **BORRAR los datos actuales en DeltaCoils**
Call BorrarDatosEnDeltaCoils

Dim i As Integer
i = 0

' Función de clic y espera
Call ClickAndSendKeys(140, 360, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 1).value)
Call ClickAndSendKeys(143, 394, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 2).value)
Call ClickAndSendKeys(132, 422, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 1).value)
Call ClickAndSendKeys(528, 205, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 1).value)
Call ClickAndSendKeys(528, 249, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 2).value)
Call ClickAndSendKeys(528, 365, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 3).value)
Call ClickAndSendKeys(885, 533, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 4).value)
Call ClickAndSendKeys(885, 565, Sheets("Entradas Condensador").Cells(i + 2, 5).value)

' Realizar cálculo
Call ClickEnPosicion(220, 80) ' Ejecutar cálculo

' Esperar antes de copiar los resultados
Call EsperarYRealizarAccion

' Copiar los datos
Call ClickEnPosicion(425, 80) ' Hace
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02")) ' Espera 2 segundos
Call ClickEnPosicion(425, 80)
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02")) ' Espera 2 segundos
Call ClickEnPosicion(425, 80)
```

Figura 92. Código principal Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

Este es el código principal creado para la automatización de Deltacoils, que los pasos que sigue son:

1. Selecciona el apartado "Condensing".
2. Define el refrigerante y otros parámetros previos necesarios para la simulación.
3. Introduce dimensiones y geometrías correspondientes a la batería condensadora seleccionada con anterioridad.
4. Elimina los posibles datos antiguos que existan en los campos de entrada.
5. Inserta los nuevos datos directamente desde la hoja correspondiente de Excel.
6. Ejecuta el cálculo.
7. Copia múltiples veces los resultados generados, con el fin de no tener errores y asegurarme de que se copian los datos correctos.

Para realizar la macro del evaporador con el software de SWEP DThermX el procedimiento que seguí fue muy similar al empleado para Deltacoils, aunque con ciertas complicaciones adicionales que hicieron el desarrollo más complejo y laborioso.

Uno de los principales inconvenientes fue la estructura de la interfaz gráfica del software, la cual no presenta todos los campos y resultados visibles al mismo tiempo. Por ello, fue necesario implementar un subprograma que simulara desplazamientos verticales que permitieran subir y bajar dentro de la ventana de SWEP.

Otro aspecto a destacar es la forma en que SWEP presenta los resultados ya que no ofrece una opción para copiar todos los datos de salida de forma masiva, por tanto, fue necesario desarrollar una subrutina que hiciera clic sobre cada uno de los resultados seleccionados, copiara el valor correspondiente y lo pegara en la celda adecuada de la hoja Excel.

```
Sub CopiarPegarSWEP(x As Integer, y As Integer, celda As String)
Dim clip As Object
Set clip = CreateObject("WScript.Shell")

' Regresar a SWEP para copiar el siguiente valor
AppActivate "Swep DThermX" ' Asegura que SWEP está activo
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02")) ' Espera para asegurarse que SWEP está al frente

' Clic en la celda de SWEP
DoubleClick x, y
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))

' Copiar con Ctrl + C
clip.SendKeys "^c"
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))

' Regresar a Excel y activar la hoja de destino
Application.WindowState = xlNormal
AppActivate Application.Caption ' Trae Excel al frente
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:03")) ' Espera para asegurar que Excel esté activo

' Seleccionar la hoja de destino
Sheets("Salidas Evap").Activate
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02")) ' Espera un poco más para evitar errores

' Seleccionar la celda de destino
Range(celda).Select
DoEvents ' Permitir que el sistema procese otras tareas

' Pegar el valor desde el portapapeles
On Error Resume Next
ActiveSheet.Paste
On Error GoTo 0

DoEvents ' Esperar a que Excel termine el pegado
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02"))

' Reemplazar punto por coma en la celda
Dim valor As String
On Error Resume Next ' Añadido manejo de errores
valor = Range(celda).value
If Not IsEmpty(valor) Then
    valor = Replace(valor, ".", ",")
    Range(celda).value = valor
End If
On Error GoTo 0

' Limpiar el modo de copia
Application.CutCopyMode = False
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))
End Sub
```

Figura 93. Código pegar en Excel SWEP.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, automaticé también la introducción de parámetros mediante teclado de manera que agilizara el proceso de configuración de los componentes. De esta forma sería mucho más rápido seleccionar el tipo de intercambiador, el refrigerante utilizado, así como el fluido secundario y su porcentaje.

Por otro lado, se programó la conversión del formato de los números, cambiando los puntos decimales de SWEP por comas al ser pegados los datos en Excel.

```
' Esperar un momento para evitar errores de activación
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:02"))

' Maximizar Swep
SendKeys "% ", True
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:03"))
SendKeys "x", True
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:03"))

' Minimiza Excel antes de interactuar con Swep
Application.WindowState = xlMinimized

' 1. Seleccionar refrigerante y fluido secundario
Call IngresarDatos

' 2. Borrar datos previos
Call BorrarDatosEnSwep

' 3. Ingresar valores desde Excel a SWEP
Call ClickAndSendKeysDobleClick(540, 615, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 1).value)
Call ClickAndSendKeysDobleClick(420, 655, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 2).value)
Call ClickAndSendKeysDobleClick(655, 758, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 3).value)
Call ClickAndSendKeysDobleClick(420, 800, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 4).value)
Call ClickAndSendKeysDobleClick(425, 837, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 5).value)
Call ClickAndSendKeysDobleClick(660, 869, Sheets("Entradas Evap").Cells(2, 6).value)

ClickEnPosicion 1009, 500 ' Clic fuera antes de simular bajar

' 4. Realizar cálculo en SWEP
Call CalcularSwep

' 5. Copiar resultados de SWEP a Excel
Call CopiarPegarSWEP(1380, 344, "A2") ' Inlet vapor quality
Call CopiarPegarSWEP(1380, 422, "B2") ' Tentrada_ref
ClickEnPosicion 1516, 525
Call CopiarPegarSWEP(1377, 532, "C2") ' Tsalida_ref
ClickEnPosicion 1516, 525
Call CopiarPegarSWEP(1380, 566, "D2") ' Caudal refrigerante
Call CopiarPegarSWEP(1725, 565, "E2") ' Caudal glicol

AppActivate "Swep DThermX"
SubirRapido 12
Application.Wait (Now + TimeValue("0:00:01"))

'Para dejar el código preparado para otro cálculo hace lo siguiente

ClickEnPosicion 28, 280 'Abre ventana de Cálculos
ClickEnPosicion 207, 500 'Selecciona evaporador
ClickEnPosicion 606, 93 'Hace clic fuera
```

Figura 94. Código principal SWEP.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez comprobado que ambas macros funcionaban de manera correcta consideré oportuno dar un paso más ya que esta herramienta creada podía ser aún mejor aprovechada.

Por ello, el siguiente objetivo fue desarrollar una base de datos que recopilara los resultados obtenidos por las macros para un amplio rango de condiciones de funcionamiento posibles. Es decir, ejecutando la macro una sola vez esta iría recorriendo de forma iterativa una lista de parámetros de entrada e iría almacenando los resultados generados en una hoja de cálculo.

De este modo, se pasaría de tener un proceso que inicialmente era lento, ya que realizar una sola iteración conllevaba aproximadamente 30 segundos, a uno instantáneo, ya que, una vez creada la base de datos, se puede consultar directamente el resultado correspondiente de cualquier punto de operación sin necesidad de volver a ejecutar la macro ni softwares externos. Esto implicaría la reducción del tiempo de cálculo de los 30 segundos a milisegundos, convirtiendo el análisis en un proceso mucho más ágil, eficaz y práctico.

Para llevar a cabo esto se desarrollaron 4 macros más, 2 de ellas para crear una lista de parámetros de entrada de forma automática y otras 2 con modificaciones de las ya creadas anteriormente para Deltacoils y SWEP para que no hubiera ningún error al hacer el proceso iterativo.

Por ejemplo, el código para crear la lista de entradas para el software de Deltacoils es el siguiente:

```
Sub GenerarEntradasCondensador()  
  
Dim ws As Worksheet  
Set ws = ThisWorkbook.Sheets.Add  
ws.Name = "Inputs_Condensador"  
  
' Escribir cabecera  
ws.Range("A1:F1").value = Array("T_seca", "HR", "Caudal", "T_cond", "T_descarga", "ID")  
  
Dim iRow As Long: iRow = 2  
Dim T_seca As Double, HR As Double, Caudal As Double  
Dim T_cond As Double, T_descarga As Double  
Dim idCounter As Long: idCounter = 1  
  
For T_seca = 15 To 45 Step 5  
    For HR = 30 To 80 Step 10  
        For Caudal = 20000 To 28000 Step 2000  
            For T_cond = 20 To 50 Step 5  
                For T_descarga = 80 To 105 Step 5  
                    With ws  
                        .Cells(iRow, 1).value = T_seca  
                        .Cells(iRow, 2).value = HR  
                        .Cells(iRow, 3).value = Caudal  
                        .Cells(iRow, 4).value = T_cond  
                        .Cells(iRow, 5).value = T_descarga  
                        .Cells(iRow, 6).value = idCounter  
                    End With  
  
                    iRow = iRow + 1  
                    idCounter = idCounter + 1  
                Next T_descarga  
            Next T_cond  
        Next Caudal  
    Next HR  
Next T_seca  
  
MsgBox "Lista de combinaciones del condensador generada."  
  
End Sub
```

Figura 95. Macro lista parámetros entrada Deltacoils.

Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	T_seca	HR	Caudal	T_cond	T_descarga	ID	RI[%]	Potencial(kw)	Tseca_salida(°C)	HR_salida(%)	Vel_pasol(m/s)	dPaire(Pa)	Tcond(°C)	Flujomásico ref(kg/h)	dPre(kpa)	dPi(°C)
2	15	30	20000	20	80	1	100,0	0,00	19,9	7	5,56	347,0	20,0	2158	1279	0,00
3	15	30	20000	20	85	2	100,0	0,00	19,9	20	5,56	366,8	20,0	333	87	0,00
4	15	30	20000	20	90	3	100,0	0,00	19,9	20	5,56	366,8	20,0	326	85	0,00
5	15	30	20000	20	95	4	100,0	0,00	19,9	20	5,56	366,8	20,0	320	82	0,00
6	15	30	20000	20	100	5	100,0	0,00	19,9	20	5,56	366,8	20,0	313	80	0,00
7	15	30	20000	20	105	6	100,0	0,00	19,9	20	5,56	366,8	20,0	307	77	0,00
8	15	30	20000	25	80	7	46,6	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	352	14	0,39
9	15	30	20000	25	85	8	47,9	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	344	13	0,38
10	15	30	20000	25	90	9	49,1	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	337	13	0,36
11	15	30	20000	25	95	10	50,3	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	330	12	0,35
12	15	30	20000	25	100	11	51,4	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	323	12	0,34
13	15	30	20000	25	105	12	52,5	45,0	21,6	20	5,56	366,8	25,0	316	11	0,32
14	15	30	20000	30	80	13	67,5	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	365	13	0,34
15	15	30	20000	30	85	14	68,1	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	357	13	0,33
16	15	30	20000	30	90	15	68,6	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	349	12	0,32
17	15	30	20000	30	95	16	69,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	341	12	0,30
18	15	30	20000	30	100	17	69,7	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	334	11	0,29
19	15	30	20000	30	105	18	70,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	30,0	326	11	0,28
20	15	30	20000	35	80	19	76,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	380	13	0,29
21	15	30	20000	35	85	20	76,6	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	371	12	0,28
22	15	30	20000	35	90	21	76,9	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	362	12	0,27
23	15	30	20000	35	95	22	77,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	354	12	0,26
24	15	30	20000	35	100	23	77,6	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	345	11	0,25
25	15	30	20000	35	105	24	77,9	45,0	21,6	20	5,56	366,8	35,0	338	11	0,24
26	15	30	20000	40	80	25	81,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	397	13	0,26
27	15	30	20000	40	85	26	81,4	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	387	12	0,25
28	15	30	20000	40	90	27	81,6	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	377	12	0,24
29	15	30	20000	40	95	28	81,8	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	368	11	0,23
30	15	30	20000	40	100	29	82,0	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	359	11	0,22
31	15	30	20000	40	105	30	82,3	45,0	21,6	20	5,56	366,8	40,0	350	11	0,21
32	15	30	20000	45	80	31	84,4	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	416	13	0,22
33	15	30	20000	45	85	32	84,5	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	404	12	0,21
34	15	30	20000	45	90	33	84,7	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	394	12	0,21
35	15	30	20000	45	95	34	84,8	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	383	11	0,20
36	15	30	20000	45	100	35	85,0	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	373	11	0,19
37	15	30	20000	45	105	36	85,1	45,0	21,6	20	5,56	366,8	45,0	364	10	0,19
38	15	30	20000	50	80	37	86,7	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	438	13	0,20
39	15	30	20000	50	85	38	86,7	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	425	12	0,19
40	15	30	20000	50	90	39	86,8	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	413	12	0,18
41	15	30	20000	50	95	40	86,9	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	401	11	0,17
42	15	30	20000	50	100	41	87,0	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	390	11	0,17
43	15	30	20000	50	105	42	87,2	45,0	21,6	20	5,56	366,8	50,0	380	10	0,16
44	15	30	22000	20	80	43	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	340	90	0,00
45	15	30	22000	20	85	44	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	333	87	0,00
46	15	30	22000	20	90	45	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	326	85	0,00
47	15	30	22000	20	95	46	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	320	82	0,00
48	15	30	22000	20	100	47	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	313	80	0,00
49	15	30	22000	20	105	48	100,0	0,00	19,9	21	6,11	438,0	20,0	307	77	0,00
50	15	30	22000	25	80	49	50,6	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	352	14	0,39
51	15	30	22000	25	85	50	51,7	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	344	13	0,38
52	15	30	22000	25	90	51	52,8	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	337	13	0,36
53	15	30	22000	25	95	52	53,8	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	330	12	0,35
54	15	30	22000	25	100	53	54,8	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	323	12	0,34
55	15	30	22000	25	105	54	55,7	45,0	21,0	21	6,11	438,0	25,0	316	11	0,32
56	15	30	22000	30	80	55	69,4	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	365	13	0,34
57	15	30	22000	30	85	56	69,9	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	357	13	0,33
58	15	30	22000	30	90	57	70,4	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	349	12	0,32
59	15	30	22000	30	95	58	70,9	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	341	12	0,30
60	15	30	22000	30	100	59	71,4	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	334	11	0,29
61	15	30	22000	30	105	60	71,9	45,0	21,0	21	6,11	438,0	30,0	326	11	0,28
62	15	30	22000	35	80	61	77,5	45,0	21,0	21	6,11	438,0	35,0	380	13	0,29
63	15	30	22000	35	85	62	77,8	45,0	21,0	21	6,11	438,0	35,0	371	12	0,28

Figura 96. Base de datos condensador.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 96 se puede ver un extracto de la hoja de datos que se obtiene mediante el proceso iterativo para el condensador. De manera similar se realizó para el caso del evaporador.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### 4.1 Selección de componentes

Siguiendo la metodología y justificación del apartado 3.3, en este punto se expone la selección de los principales componentes del ciclo y algunos de sus datos más relevantes.

Equipo	Tipo	Fabricante	Modelo	Potencia	Otras consideraciones	
				Nominal (40kW, Tcond = 40°C, Tevap = -25°C)		
Compresor	Scroll	Bitzer	GSP80485ZL-40S	29 kW (75 Hz)	Frecuencia de giro	35-75 Hz
					Compresores en paralelo para alcanzar los requerimientos	2
					Envelope	
Evaporador	Placas	Swep	B35TH4x50/1P	45 kW	Sobredimensionamiento	21%
					Número de placas	50
Condensador	Batería	Deltacoils	25 x 21.65 7mm - CR 40NT 12NR 1000A 3,2P 40NC	75,3		
Válvula de expansión	Electrónica	Carel	E2V35ZSM03			

Tabla 12. Componentes.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el ciclo descrito y diseñado a lo largo de este trabajo se puede ver en la *Figura 97*. Se dispone de esta forma, con el evaporador en la parte superior, para que el agua obtenida en el proceso de desescarche caiga simplemente por gravedad al depósito situado antes del condensador.

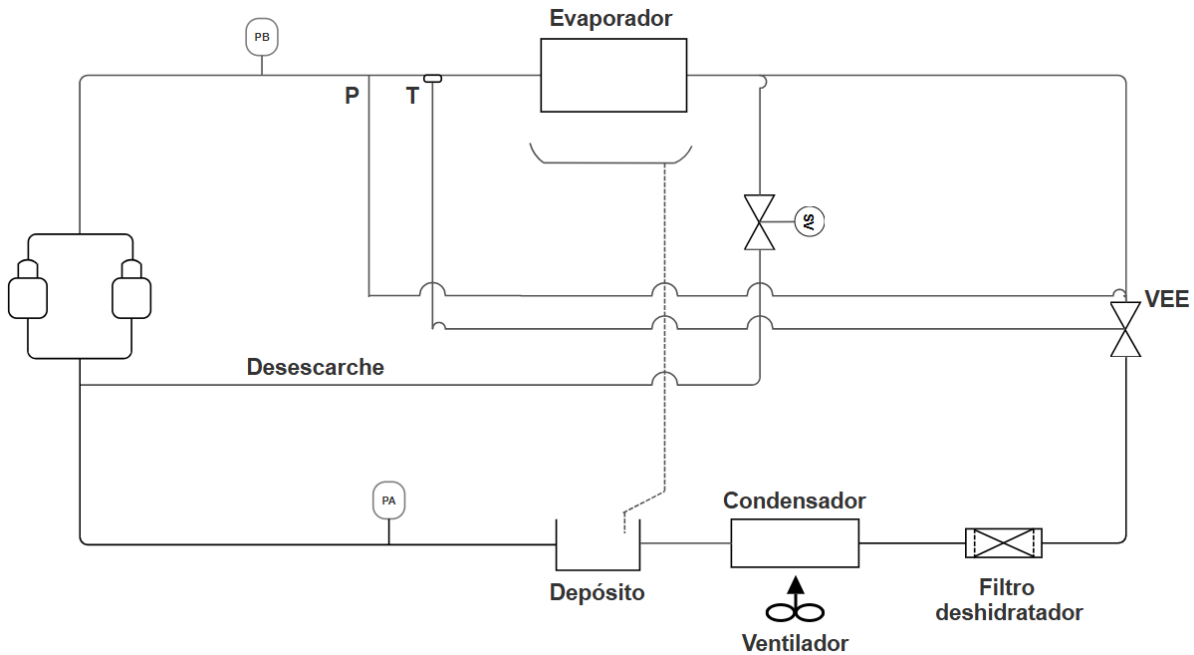


Figura 97. Circuito frigorífico.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante verificar ahora que el circuito está totalmente diseñado si cumple con la normativa que establece el límite de carga de refrigerante la **UNE-EN 378:2017** y **Real Decreto 552/2019**.

En el apartado 3.3.5 calculé la carga de refrigerante del circuito, teniendo en cuenta que lo hice por metro de longitud de tubería, obtuve una carga de 0,6255 kg de propano.

La normativa establece diferentes límites de carga en función de la inflamabilidad del refrigerante, ubicación y acceso la instalación. El propano es clasificado como tipo A3 por su alto nivel de inflamabilidad, suponiendo que la instalación está ubicada al aire libre (emplazamiento III) y con acceso restringido al personal autorizado (categoría c), se establece que no existe restricción de carga siempre cuando se garanticen las condiciones de seguridad necesarias.

## 4.2 Mapeado de funcionamiento en distintas condiciones de operación

Para desarrollar este apartado se estudia el funcionamiento de la enfriadora en diferentes condiciones de operación, evaluando de esta manera su rendimiento.

Las condiciones que se proponen son para un rango de temperatura ambiente entre 15°C y 35°C, un compresor funcionando a frecuencia constante de 50 Hz y el otro con diferentes valores de frecuencia, entre 35 Hz y 75 Hz, y temperatura de entrada del agua glicolada entre -12°C y -6°C.

Gracias al Excel en el que he realizado el modelado del ciclo, el cálculo de cada uno de estos puntos se ha realizado de manera más ágil y dinámica. Una vez obtenidos los datos necesarios de cada una de las condiciones de operación se ha procedido a la creación de una serie de gráficas, haciendo uso de Matlab, en las que se ve de manera muy representativa como funcionaría la enfriadora en dichas condiciones.

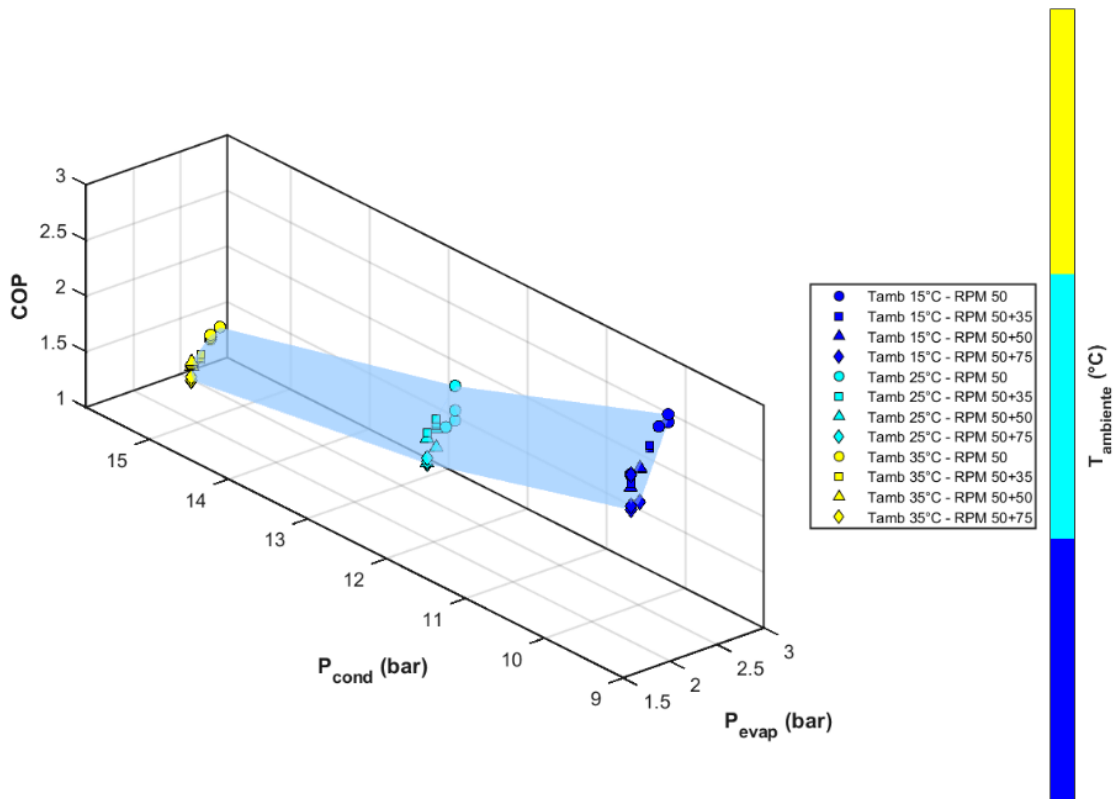
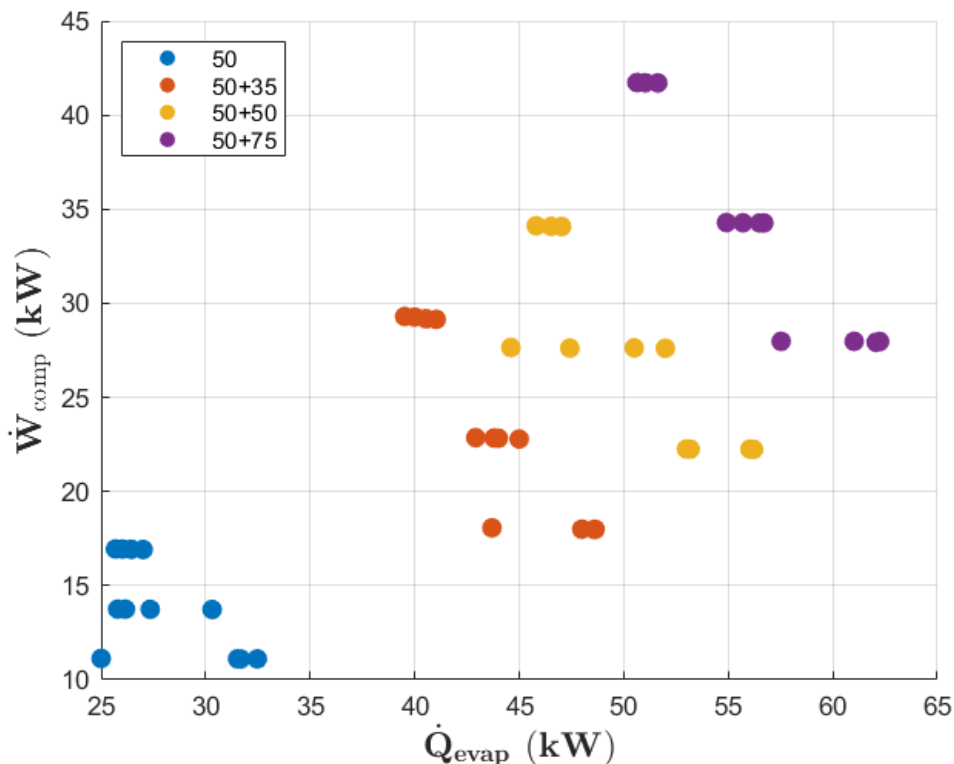


Figura 98. COP frente  $P_{cond}$  y  $P_{evap}$ .

Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 98* se muestra como varía el COP frente a la presión de condensación y presión de evaporación. Es de esperar que cuanto menor sea la diferencia entre ambas presiones, mayor será el coeficiente de rendimiento. Además, se pueden apreciar tres grupos de puntos claramente diferenciados, esos puntos hacen referencia con su color a la temperatura y con su forma a la frecuencia de cada uno de los compresores. A mayores temperaturas (puntos amarillos) la presión de condensación aumenta y es cuando se obtienen menores COP.

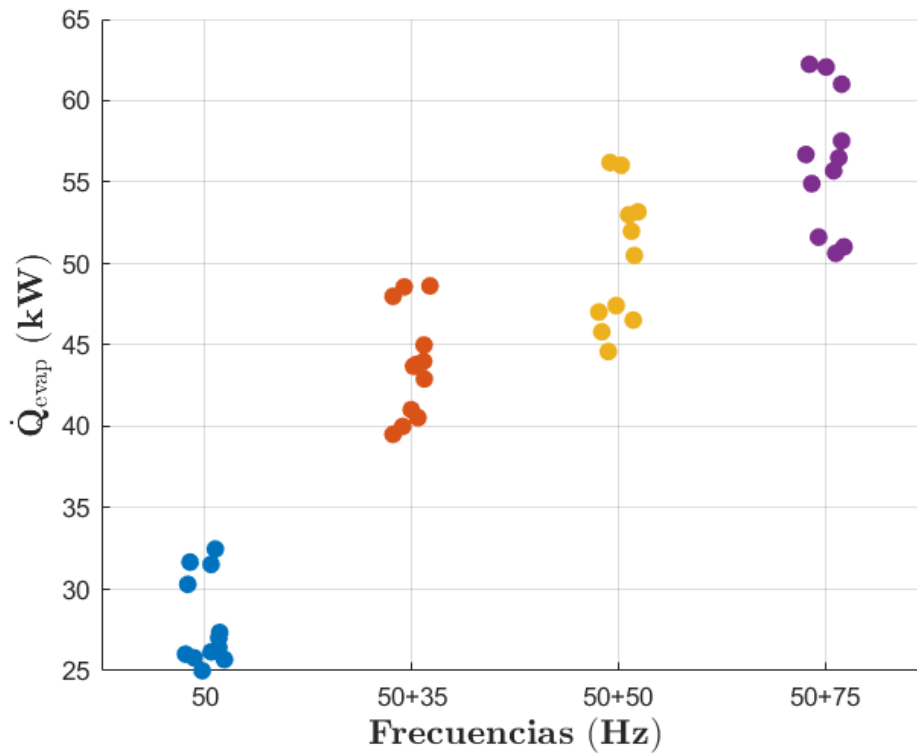
Por otro lado, también se ha graficado el trabajo de los compresores frente a la potencia frigorífica. Se puede observar en la *Figura 99* como a mayor potencia frigorífica el consumo de los compresores será mayor, además, para cada grupo de frecuencias se puede ver como existen a su vez otros tres subgrupos, debido a las temperaturas. Para una misma potencia frigorífica el consumo de los compresores será mayor si la temperatura ambiente es mayor.



*Figura 99. Trabajo compresores frente potencia frigorífica.*

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de la *Figura 100* muestra la capacidad frigorífica que es capaz de aportar la enfriadora en cada una de las combinaciones de frecuencia de los compresores. Esta potencia se verá afectada negativamente a medida que la temperatura exterior aumenta.



*Figura 100. Potencia frigorífica frente frecuencias.*

*Fuente:* Elaboración propia.

Además, se puede apreciar que a mayores frecuencias mayor es la capacidad frigorífica obtenida, pudiendo regular la potencia frigorífica necesaria.

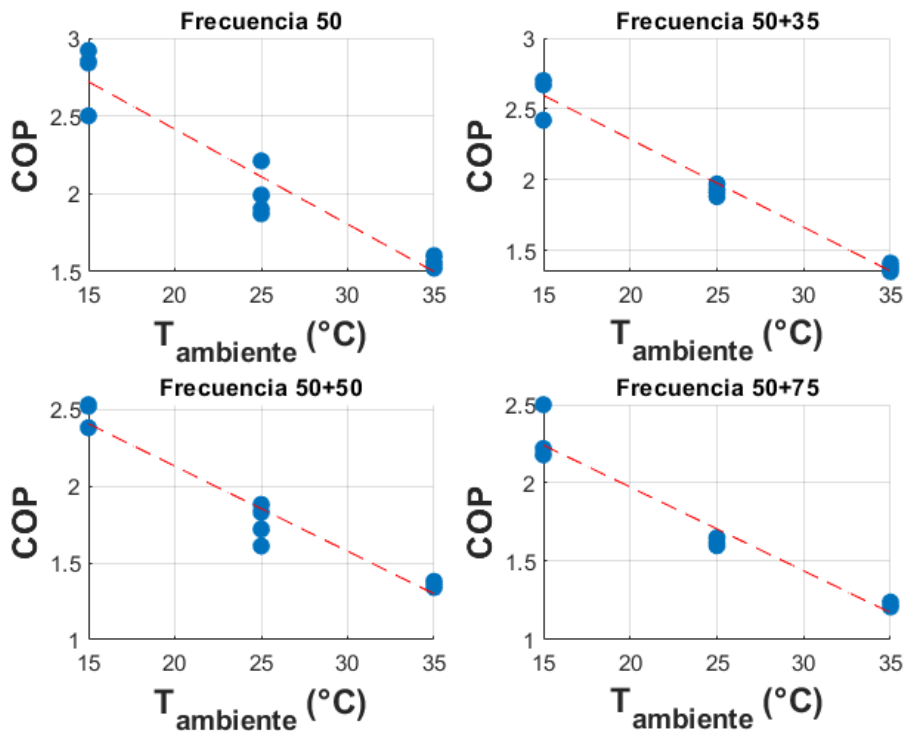


Figura 101. COP frente temperatura ambiente por frecuencia.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se reafirma lo ya citado con anterioridad, en todas las combinaciones de frecuencia el COP tiene una tendencia negativa a medida que aumenta la temperatura ambiente. Esta disminución es aún más notable cuando el compresor de frecuencia variable trabaja a bajas frecuencias o cuando solo hay un compresor.

Es importante haber realizado un buen dimensionamiento del condensador y ventilador para minimizar este efecto.

Igualmente, se muestra la *Figura 102*, en la que se puede ver como varía el rendimiento isentrópico en las distintas frecuencias. El rendimiento isentrópico,  $\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$ , compara el rendimiento ideal que tendría el compresor frente al real, por tanto, se puede concluir que a mayores frecuencias la diferencia entre el rendimiento ideal y real del compresor también es mayor.

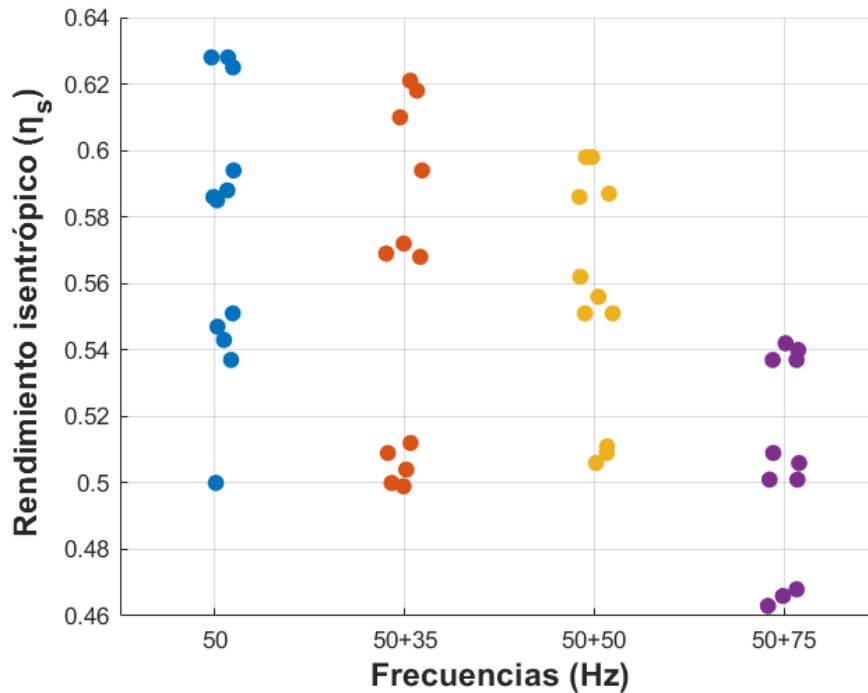


Figura 102. Rendimiento isentrópico frente frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

A mayores frecuencias la eficiencia isentrópica disminuye ligeramente, esto se debe al aumento de pérdidas internas que existen al aumentar la carga y velocidad del compresor.

En la *Figura 103* se muestra el rendimiento volumétrico calculado como  $\eta_s = \frac{\dot{m} \cdot V_{asp}}{V_s \cdot N}$ , siendo:

$\dot{m}$ : Caudal másico que sale del compresor  $\left(\frac{kg}{s}\right)$ .

$V_{asp}$ : Volumen específico del gas en la aspiración  $\left(\frac{m^3}{kg}\right)$ .

$V_s$ : Volumen de desplazamiento teórico  $\left(\frac{m^3}{rev}\right)$ .

$N$ : Velocidad de giro del compresor  $\left(\frac{rev}{s}\right)$ .

Por otro lado, la relación de presiones es  $R_p = \frac{P_{cond}}{P_{evap}}$

Una vez explicado cómo he obtenido estos valores, en la gráfica se puede observar que a medida que la relación de presiones aumenta, el rendimiento volumétrico disminuye. Al existir una mayor diferencia entre las presiones de entrada y salida el compresor se enfrenta a mayores pérdidas internas, disminuyendo de esta forma el rendimiento volumétrico.

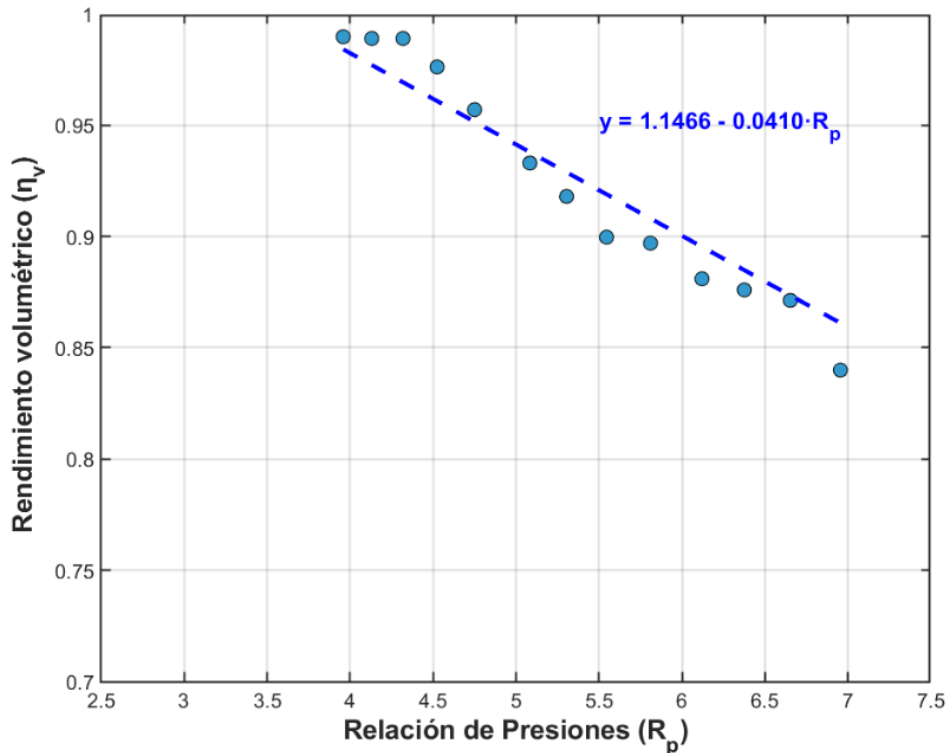


Figura 103. Rendimiento isentrópico frente ratio de presiones.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la *Figura 104* he representado el rendimiento isentrópico y global frente a la relación de presiones. De esta forma se puede ver como el rendimiento global es menor siempre que el isentrópico, ya que incluye más pérdidas, y como tienen una forma similar.

El rendimiento global ha sido calculado como  $\eta_g = \frac{\dot{m} \cdot (h_{2s} - h_1)}{\dot{W}_{comp}}$ , siendo:

$\dot{m}$ : Caudal másico  $\left(\frac{kg}{s}\right)$ .

$h_{2s}$ : Entalpía a la salida del compresor en condiciones isentrópicas  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ .

$h_1$ : Entalpía a la entrada del compresor  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ .

$\dot{W}_{comp}$ : Potencia consumida por el compresor ( $kW$ ).

Si se analizaran todos los puntos posibles, la gráfica que se esperaría tendría forma parabólica ya que el mayor rendimiento de ambas curvas se encuentra en valores medios de  $R_p$ . A valores pequeños de  $R_p$  el gas no fluye eficientemente a través del ciclo y produce pérdidas por flujo inverso, sin embargo, a valores mayores el trabajo requerido es mayor generándose también más pérdidas mecánicas.

El punto óptimo, es decir, a  $R_p$  intermedias se encuentra el mayor rendimiento, ya que las pérdidas tanto por fricción como por fugas son mínimas.

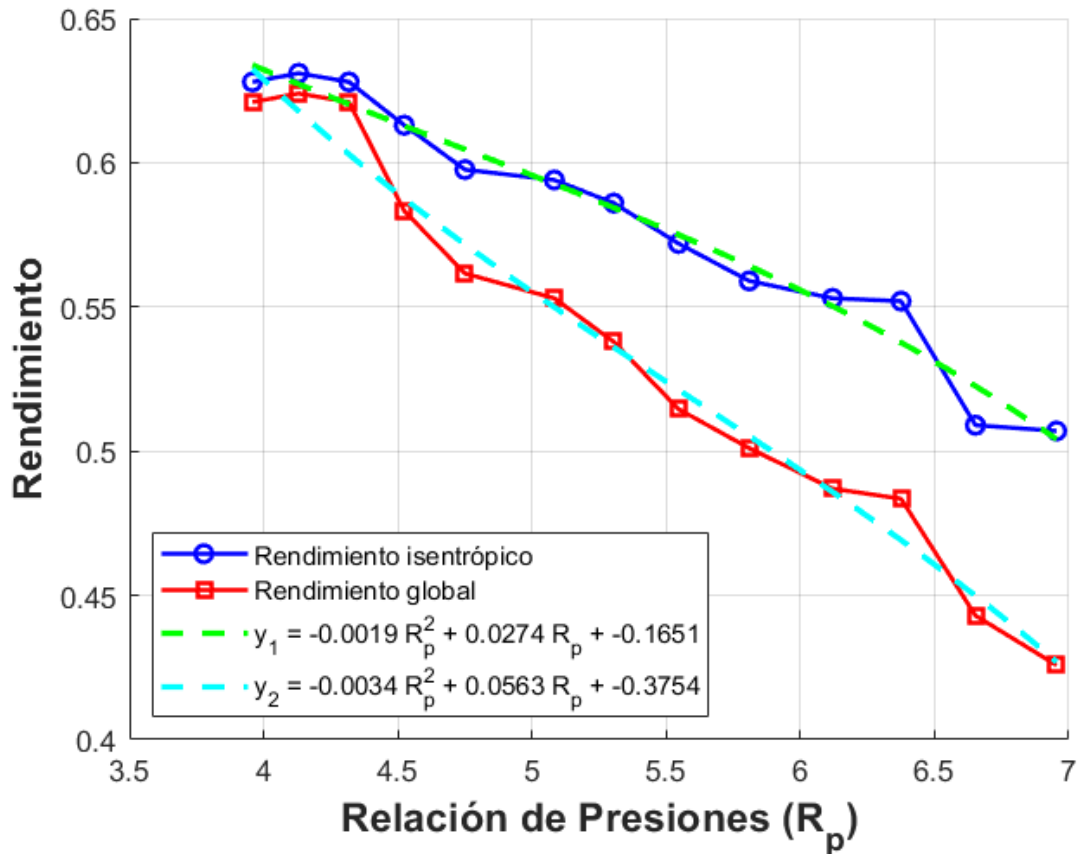


Figura 104. Rendimiento isentrópico y global frente relación de presiones.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Presupuesto

En este apartado se muestra una tabla con la lista de precios estimados de cada uno de los componentes. Cabe destacar que estos precios son orientativos, puesto que varían enormemente según el distribuidor, volumen, acuerdos comerciales, etc. Además, hay componentes que no se pueden encontrar en catálogos o web de fabricantes, sino que hay que ponerse en contacto con el fabricante o distribuidor y solicitar un presupuesto en el que se valorará entre otras cosas, la cantidad que se pide, si eres cliente habitual, si el producto requiere de una configuración especial y los costes de transporte.

No obstante, para calcular el precio de alguno de los componentes del sistema he recurrido a una serie de correlaciones que estiman su coste, extraídas de [66].

Para el intercambiador de placas, la ecuación es la siguiente, siendo  $A$  el área de transferencia de calor:

$$C_{evaporador} = 190 + 310 \cdot A = 1.588,1 \text{ €} \quad (22)$$

Por otro lado, para el ventilador la ecuación es la que sigue:

$$\begin{aligned} C_{ventilador} &= (1887,5 + 159,95 \cdot D_{ventilador}^2 + 3,53 \cdot D_{ventilador} + 281,25 \cdot P_{e_{ventilador}}) \\ &= 3.824,24 \text{ €} \end{aligned} \quad (23)$$

Para el condensador:

$$C_{condensador} = 5,6 \cdot A_{intercambio} = 902,16 \text{ €} \quad (24)$$

Por último, el coste del compresor también se ha estimado mediante la siguiente correlación:

$$C_{compresor} = 3143,7 + 217423 \cdot \dot{V}_{descarga} = 7.806,12 \text{ €} \quad (25)$$

	Precio (€/Ud.)	Cantidad (Ud.)	Importe (€)
Compresor	7.806,12	2	15.612,24
Evaporador	1.588,10	1	1.588,10
Condensador	902,16	1	902,16
Válvula expansión	130,50	1	130,50
Ventilador	3.824,24	1	3.824,24
Filtro deshidratador	37,50	1	37,50
Visor	20,50	2	41,00
Válvula de seguridad	28,00	1	28,00
Transductor	56,50	2	113,00
Presostato de baja	108,00	1	108,00
Presostato de alta	85,50	1	85,50
Obús	10,00	2	20,00
Válvula solenoide	72,50	1	72,50
Tubería ø18 mm	5,50	1	5,50
Tubería ø35 mm	18,00	1	18,00
Tubería ø64 mm	27,00	1	27,00
Válvula antirretorno	50,50	2	101,00
Sonda temperatura	38,00	1	38,00
Carga Refrigerante (€/kg)	49,91	0,625	31,19
		<b>TOTAL</b>	<b>22.783,43</b>

Tabla 13. Presupuesto.

Fuente: Elaboración propia.

El total estimado solo en componentes serían 22.783,43 €. A este valor se debería sumar la mano de obra para el montaje de la máquina.

La mayoría de los precios han sido extraídos de catálogo comerciales o web de distribuidores, como son los de las referencias: [67], [68], [69] y [70].



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo ha sido diseñar y modelar una enfriadora de propano para aplicaciones de condensación de vapor atmosférico, integrando conocimientos de termodinámica, refrigeración y herramientas de programación orientadas a automatizar el proceso.

A través del análisis termodinámico del ciclo de compresión de vapor he llevado a cabo la selección de los principales componentes del sistema, estableciendo previamente las condiciones de operación.

Gracias al desarrollo de un modelo en Excel, complementado con las curvas polinómicas de algunos componentes y macros en VBA, es posible simular de manera automatizada distintos puntos de funcionamiento del sistema. De esta forma, se agiliza el análisis de rendimiento de la enfriadora.

El desarrollo de las macros en VBA es especialmente útil ya que se podrían ejecutar de manera iterativa, con la posibilidad de obtener así una base de datos. Una vez obtenida ésta tendría los resultados de cualquier punto de funcionamiento en cuestión de milisegundos, agilizando de esta forma el proceso.

Cabe destacar, que a medida que fui avanzando en el trabajo pensé que podría aprovecharse de alguna manera el hielo formado en el evaporador. Para ello puede emplearse el proceso de desescarche, que provocará una disminución de temperatura del refrigerante a la entrada del condensador, por consiguiente, mayor eficiencia en el mismo ya que la diferencia de temperatura entre el aire y el refrigerante será menor, facilitando así la condensación de este último.

Por último, tras analizar el funcionamiento de la enfriadora en distintas condiciones de operación, se concluye que los datos obtenidos son coherentes, las relaciones que existen entre consumo, rendimiento y carga son esperables y, además, no existen comportamientos extraños que sugieran un mal diseño.



## Bibliografía

- [1] Unión Europea, *REGLAMENTO (UE) 2024/573 - Reglamento que impulsa la sustitución de refrigerantes con alto GWP, favoreciendo el uso de refrigerantes naturales como el propano*. 2024.
- [2] M. Olczyk y M. Kuc-Czarnecka, «European Green Deal Index: A new composite tool for monitoring European Union's Green Deal strategy», *J Clean Prod*, vol. 495, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145077.
- [3] J. Soni *et al.*, «Investigative comparison of R134a, R290, R600a and R152a refrigerants in conventional vapor compression refrigeration system», *Mater Today Proc*, jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.286.
- [4] B. Tashtoush y A. Alshoubaki, «Atmospheric water harvesting: A review of techniques, performance, renewable energy solutions, and feasibility», *Energy*, vol. 280, jun. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128186.
- [5] G. Raveesh, R. Goyal, y S. K. Tyagi, «Advances in atmospheric water generation technologies», *Energy Convers Manag*, vol. 239, abr. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114226.
- [6] A. A. Bani Issa, C. Liang, E. A. Groll, y D. Ziviani, «Residential heat pump and air conditioning systems with propane (R290) refrigerant: Technology review and future perspectives», *Appl Therm Eng*, vol. 266, ene. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125560.
- [7] COFRICO, «Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cofrico.com/normativa-y-leyes/nuevo-reglamento-de-seguridad-para-instalaciones-frigorificas/>
- [8] O. A. A. M. Ibrahim, S. A. Kadhim, K. A. Hammoodi, F. L. Rashid, y A. H. Askar, «Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems: The case of R290», 22 de octubre de 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.clet.2024.100825.
- [9] A. Jones, A. Wolf, y S. M. Kwarck, «Refrigeration system development with limited charge of flammable Refrigerant, R-290», *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 34, jul. 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101392.
- [10] Intarcon, «Compresores de refrigeración industrial o comercial». Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/compresores-de-refrigeracion-industrial-o-comercial/>
- [11] BITZER, «Serie 0-VII». Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bitzer.de/es/es/compresores-de-piston/serie-0-vii/>
- [12] Hitachi, «Compresores scroll oil-free». Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.hitachi-hiemex.com/products/cmp/scroll\\_oilfree/](https://www.hitachi-hiemex.com/products/cmp/scroll_oilfree/)
- [13] Atlas Copco, «Compresor de tornillo: cómo funciona». Accedido: 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/compresor-de-tornillo-como-funciona>

[14] Danfoss, «Compresores para refrigeración». Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.danfoss.com/es-es/products/dcs/compressors/compressors-for-refrigeration/#tab-overview>

[15] Copeland, «Compresores para refrigeración». Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.copeland.com/es-es/products/refrigeration/compressors?epslanguage=es-ES>

[16] Bitzer, «Software». Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bitzer.de/es/es/tools-archive/software/software/>

[17] Frascold, «Why Frascold». Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.frascold.it/es/why-frascold>

[18] Intarcon, «Todo lo que debes saber sobre los evaporadores de refrigeración». Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.intarcon.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-los-evaporadores-de-refrigeracion/>

[19] «MCHE para aplicaciones de aire acondicionado | Intercambiador de calor de microcanales | Danfoss». Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.danfoss.com/es-es/products/dcs/heat-exchangers/micro-channel-heat-exchangers/#tab-overview>

[20] XX Kerui, «Evaporadores de tubos y aletas». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.xx-kerui.com/evaporator/finned-tube-evaporator.html>

[21] Hexonic, «Placas soldadas - Serie R». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hexonic.com/es/productos/placas-soldadas/r/>

[22] ALAN Refrigeración, «Qué es y tipos de evaporadores». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://alan-refrigeracion.blogspot.com/2009/11/que-es-y-tipos-de-evaporadores.html>

[23] GSF, «EVAPORADORES COAXIALES». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gsf.es/es/32-evaporadores-coaxiales>

[24] Arveng Training, «Fundamentos de Intercambiadores de C&T». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://arvengtraining.com/fundamentos-de-intercambiadores-de-ct/>

[25] SWEP, «Solutions». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.swep.net/solutions/>

[26] Alfa Laval, «Intercambiadores de calor, decanters y separadoras». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.alfalaval.es/>

[27] Danfoss, «Intercambiadores de calor». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.danfoss.com/es-es/products/dcs/heat-exchangers/>

[28] Deltacoils, «Inicio». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://deltacoils.com/>

[29] Keyter, «Funciones de la Batería Condensadora en un Sistema de Refrigeración». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.keyter.com/es/funciones-de-la-bateria-condensadora-en-un-sistema-de-refrigeracion/>

[30] Artizono, «Guía completa de condensadores en sistemas de refrigeración». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://artizono.com/es/guia-completa-de-condensadores-en-sistemas-de-refrigeracion/>

[31] Kelvion, «Inicio». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.kelvion.com/es/>

[32] Area Cooling, «Dispositivo de expansión». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://areacooling.com/areacademy/es/dispositivo-de-expansion/>

[33] RST Valves, «101 Guide to Electronic Expansion Valve». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rstvvalves.com/blog/101-guide-to-electronic-expansion-valve.html>

[34] A. EStrada, «Dispositivos de expansión». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://estrada-alex.wixsite.com/eeest/blank-forn6>

[35] Pecomark, «Termostato Mecánico DANFOSS KP 77 60L1121 ». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pecomark.com/es/c/p/401977>

[36] Jan-Willem Pustjens, «Válvula Solenoide - Descripción General y Tipos». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tameson.es/pages/electrovalvulas-como-funcionan>

[37] Fesmex, «¿Qué es un Presostato? ». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fesmex.com.mx/article/que-es-un-presostato/>

[38] Area Cooling Solutions, «¿Qué es un filtro deshidratador y cómo funciona?» Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/filtro-deshidratador/>

[39] «Un filtro deshidratador o secador correcto puede hacer la diferencia en el funcionamiento del sistema. | Blog Quimobásicos». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogquimobasicos.com/2017/02/15/un-filtro-deshidratador-o-secador-correcto-puede-hacer-la-diferencia-en-el-funcionamiento-del-sistema2/>

[40] REYMO EXPORT-IMPORT S.L., «VISORES DE LÍQUIDO SGN ». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://reymo.com/producto/visores-de-liquido-sgn/>

[41] Grupo Hidráulica, «Válvulas de alivio: ¿Cuándo y por qué utilizarlas en tu sistema?» Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grupohidraulica.com/noticias/2024/09/24/valvulas-de-alivio-presion/>

[42] Cetronic, «PT-S Sonda Temperatura PT-100 ». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=347023003&cPath=1012>

[43] Serena Doria, «¿Cómo funciona un transmisor de presión? - Blog de WIKA». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.wika.com/es/productos/como-funciona-un-transmisor-de-presion/>

[44] Clima Suministros, «Obus Valvula Carga 1/4 Soldar Refrigeracion». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://climasuministros.es/es/obus-valvula-carga-frigorifico/143-obus-valvula-carga-1-4-soldar-refrigeracion-category-8435576610889.html>

[45] IQR Ingeniería Química, «¿Qué son las válvulas de retención o válvulas check?». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2022/05/valvulas-de-retencion-valvulas-check.html>

[46] Genaq, «Soluciones Genaq - Generadores de agua atmosférica». Accedido: 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://genaq.com/es/soluciones/#large-scale>

[47] G. Raveesh, R. Goyal, y S. K. Tyagi, «Advances in atmospheric water generation technologies», 8 de mayo de 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.enconman.2021.114226.

[48] Articae, «Condensación evaporativa: refrigeración industrial». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://articae.com/2022/05/11/condensacion-evaporativa-refrigeracion-industrial/>

[49] ASHRAE, «Inicio». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/>

[50] Process Sensing, «How to read a psychrometric chart». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.processsensing.com/es-es/blog/how-to-read-a-psychrometric-chart.htm>

[51] Certificados energéticos, «Diagrama psicrométrico del aire: uso y variables». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.certificadosenergeticos.com/diagrama-psicrometrico-aire-uso-variables>

[52] N. Hoffenbecker, S. A. Klein, y D. T. Reindl, «Hot gas defrost model development and validation», *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, n.º 4, pp. 605-615, ene. 2005, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.08.016.

[53] F. Sanz y I. Vadillo, «Desescarche por gas caliente mareando el gas».

[54] UE, «Reglamento (UE) 2016-2281», 2016.

[55] Keyter, «Diagrama de Mollier». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.keyter.com/es/diagrama-de-mollier/>

[56] SCRIBD, «Diagrama de Refrigerante R 290». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/421672474/Diagrama-de-refrigerante-R-290>

[57] Copeland, «Select Online». Accedido: 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://selectonline.eu.copeland.com/SelectOnline/es/main>

[58] Bitzer, «BITZER SOFTWARE». Accedido: 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bitzer.de/websoftware/calculate/HHK/?tab=results>

[59] Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN 12900. Compresores para refrigerantes. Condiciones de evaluación, tolerancias y presentación de los resultados por el fabricante.* 2014. [En línea]. Disponible en: [www.aenor.es](http://www.aenor.es)

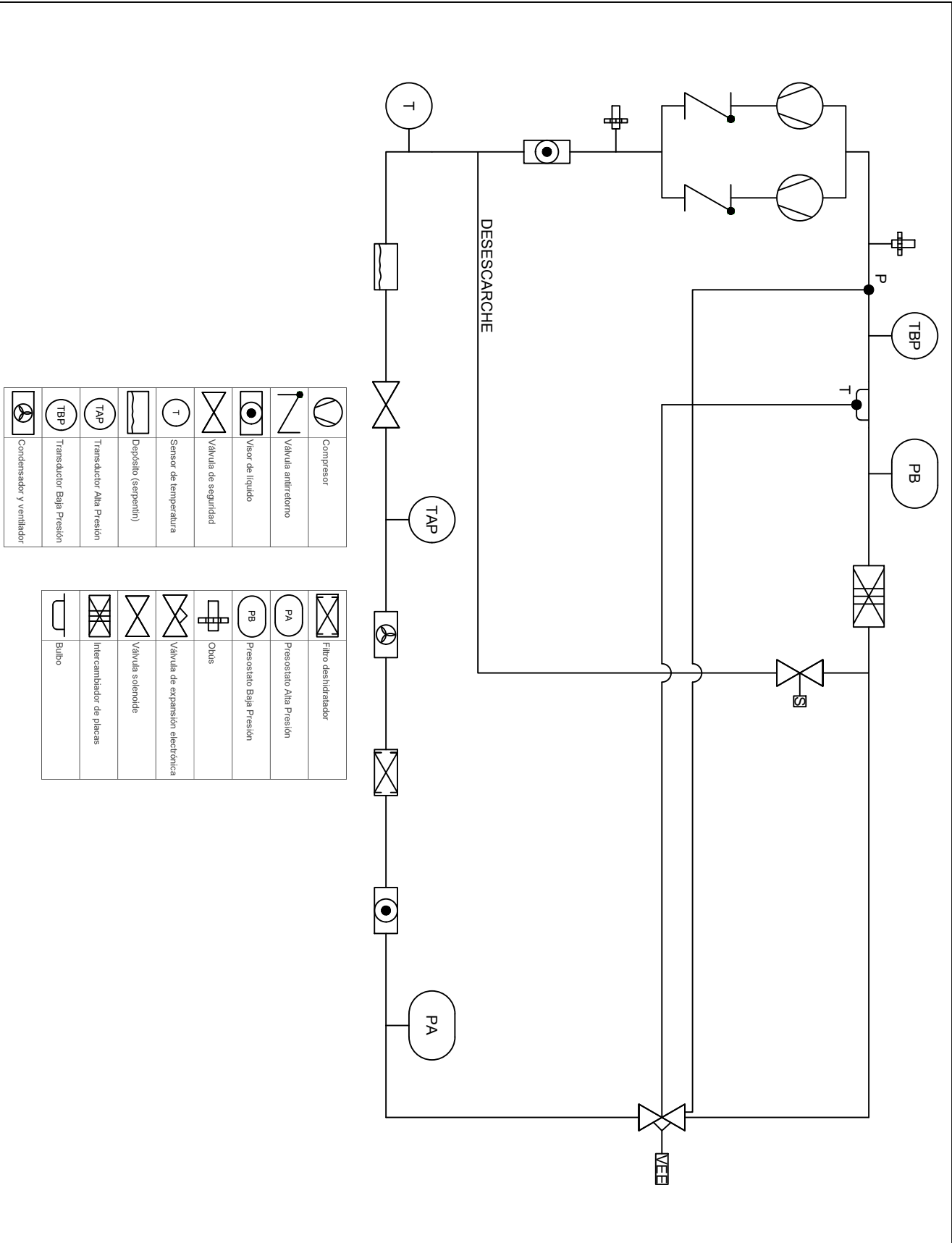
- [60] Laboratorios Ladco SA, «Enfriamiento con glicol Propilenglicol o Etilenglicol, Laboratorios Ladco.» Accedido: 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ladco.com.ar/enfriamiento-con-glicol/>
- [61] SWEP, «SWEP DThermX». Accedido: 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dthermx.swep.net/calculations/calculationType/evaporator/uuid/c7bb42e7-6155-4b77-b419-7956e2a9370e>
- [62] Carel, «Carel CPQ faces app project». Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cpq.carel.com/CarelCPQ/faces/app/cpq/project.xhtml?id=551849>
- [63] Carel, «E2V - Z (desmontable)». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.carel.es/product/e2v-smart>
- [64] Carel, «ELECTRONIC EXPANSION VALVES: High Efficiency Products», feb. 2025.
- [65] ebmpapst, «K3GA00-PV03-01 EC centrifugal module - RadiPac». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ebmpapst.com/es/es/products/centrifugal-fans/p/K3GA00PV0301.html>
- [66] B. Peris Pérez, «Thermo-economic assessment of small-scale organic Rankine cycle for low-grade industrial waste heat recovery based on an experimental application», jul. 2017.
- [67] Pecomark, «REFRIGERACIÓN 2025». Accedido: 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.pecomark.com/cataleg/2025\\_ES/](https://www.pecomark.com/cataleg/2025_ES/)
- [68] Grupo DISCO, «Productos de refrigeración comercial, industrial y climatización». Accedido: 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.grupodisco.com/productos/#refrigeracion>
- [69] CLIMASTOCK, «Intercambiadores de placas soldadas swep ». Accedido: 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://climastock.es/wp-content/uploads/2023/05/Intercambiadores-de-Placas-SWEP.pdf>
- [70] Salvador Escoda S.A., «Tarifa de Precios». Accedido: 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://wrs01.salvadorescoda.com/Tarifas\\_web/actualizadas/Precios\\_Escoda\\_PVP\\_GAS.pdf](https://wrs01.salvadorescoda.com/Tarifas_web/actualizadas/Precios_Escoda_PVP_GAS.pdf)
- [71] Wikipedia, «Serpentín». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Serpent%C3%ADn>





# ANEXO 1

## Esquema frigorífico



	Compresor
	Válvula antirretorno
	Visor de líquido
	Válvula de seguridad
	Sensor de temperatura
	Deposito (serpentin)
	Transductor Alta Presión
	Transductor Baja Presión
	Condensador y ventilador

	Filtro deshidratador
	Presostato Alta Presión
	Presostato Baja Presión
	Orific
	Válvula de expansión electrónica
	Válvula solenoide
	Intercambiador de placas
	Bulbo



**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES DE MÁLAGA**  
 TÍTULO: "Diseño y modelado de una enfriadora de propano para aplicaciones de condensación de vapor atmosférico"



FIRMA:

AUTOR:  
 Alba M<sup>a</sup> Camacho Beret  
 TUTOR:  
 Bernardo Peris Pérez

PLANO:  
 1. ESQUEMA FRIGORÍFICO



# ANEXO 2

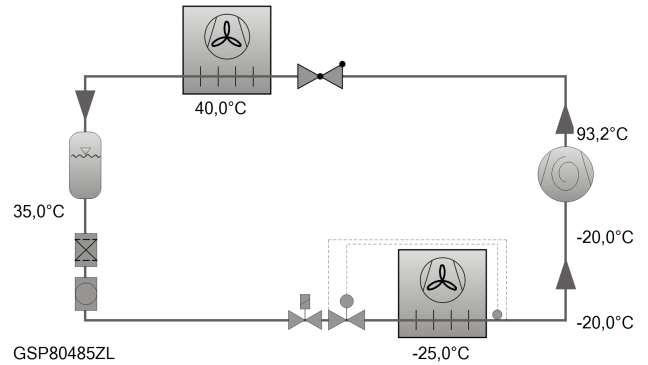
## Ficha técnica compresor



### Selection: Scroll-Compressor

#### Input Values

Cooling capacity	40,0 kW
Refrigerant	R290
Reference temperature	Dew point temp.
Evaporating SST	-25,00 °C
Condensing SDT	40,0 °C
Liq. subc. (in condenser)	5,00 K
Suct. gas superheat	5,00 K
Power supply	400V-3-50Hz
Useful superheat	100%

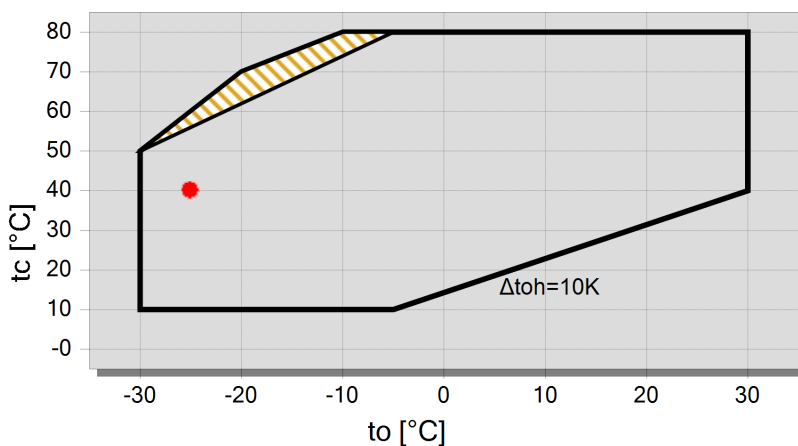


#### Result

Compressor	GSP80485ZL-40S
Capacity steps	100%
Cooling capacity	22,6 kW
Cooling capacity *	21,5 kW
Evaporator capacity	22,6 kW
Power input	15,41 kW
Current (400V)	31,7 A
Voltage range	380-420V
Condenser capacity	38,0 kW
COP/EER	1,46
COP/EER *	1,40
Mass flow	312 kg/h
Discharge gas temp. w/o cooling	93,2 °C

Largest compressor type - partition in several units required  
 \*According to EN12900 (20°C suction gas temp., 0K liquid subcooling)

#### Application Limits



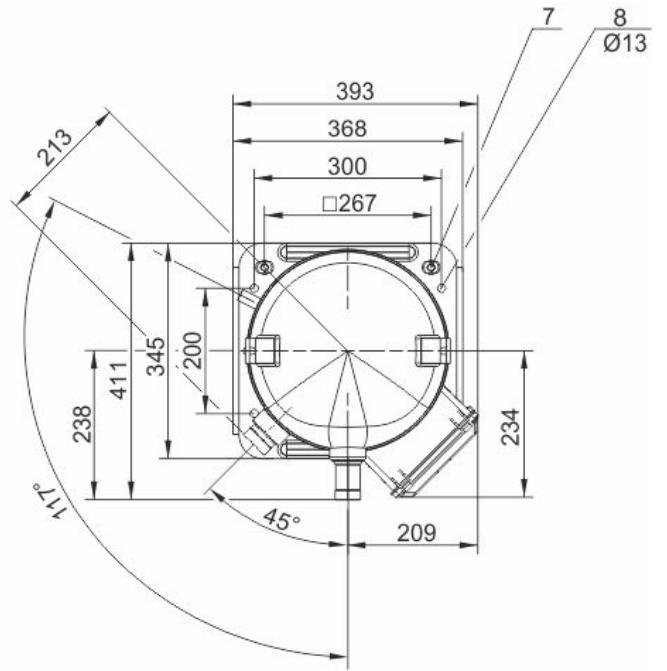
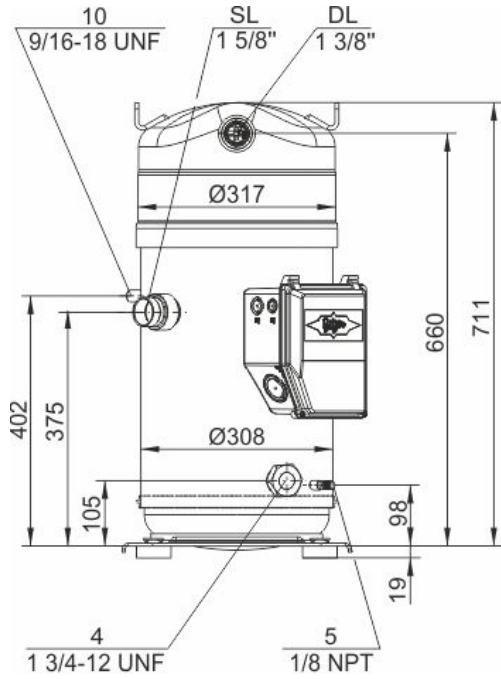
#### Legend

- suction gas superheat = 5K
- A



## Technical Data: GSP80485ZL

### Dimensions and Connections





## Technical Data

### Technical Data

Displacement (2900rpm 50 Hz)	77,2 m <sup>3</sup> /h
Displacement (3500rpm 60 Hz)	93,2 m <sup>3</sup> /h
Weight	160 kg
Max. pressure (LP/HP)	31 / 45bar
Connection suction line	
Direct brazing connection	1 5/8 (Standard "B" version)
Rotalock adapter	2 1/4(Option)
Rotalock shut-off valve	2 1/4(Option)
Connection discharge line	
Direct brazing connection	1 3/8 (Standard "B" version)
Rotalock adapter	1 3/4(Option)
Rotalock shut-off valve	1 3/4(Option)
Oil type R290	BSG68K (Standard)

### Motor data

Motor voltage (more on request)	380-420V Y-3-50Hz
Max. operating current	63.0 A
Starting current (Rotor locked)	274.0 A
Max. power input	49,0 kW

### Extent of delivery (standard)

Oil charge	5,3 dm <sup>3</sup>
Motor protection	SE-B3
Enclosure class	IP54

### Available options

Oil heater	140 W
Discharge gas temperature sensor	Option
Motor protection	SE-E1
Vibration dampers	Option

### Sound measurement

Sound power level (+5°C / 50°C)	84,9 dB(A) @50 Hz
Sound pressure level @ 1m (+5°C / 50°C)	76,9 dB(A) @50 Hz



## Scroll-Compressor





# ANEXO 3

## Ficha técnica evaporador

# EVAPORADOR - CLASIFICACIÓN

## INTERCAMBIADOR: B35TH4x50/1P

SWEP DThermX

Fecha: 17/04/2025

SSP alias: B35TH4

REQUERIMIENTOS		CIRC. 1	CIRC. 2
Fluido		R290 (Propano)	Etilen glicol - agua (40.0 mass%)
Tipo de flujo		Contracorriente	
Circuito		Interior	Exterior
Potencia	kW	45.00	
Temp. del líq. subenfriado	°C	35.00	
Calidad de vapor de entrada		0.377	
Calidad de vapor de salida		1.000	
Temperatura de entrada	°C	-23.4	-10.0
Temperatura de evaporación (rocío)	°C	-25.0	
Sobrecalentamiento	K	5.0	
Temperatura de salida	°C	-20.0	-15.0
Caudal	kg/s	0.1723	2.678
• vapor de entrada	kg/s	0.06493	
Fluido evaporado	kg/s	0.1074	

INTERCAMBIADOR A PLACAS		CIRC. 1	CIRC. 2
Area de transferencia de calor	m <sup>2</sup>		4.51
Flujo de calor	kW/m <sup>2</sup>		10.0
Diferencia de temperatura media	K		12.1
Overall heat transfer coefficient necesario	W/m <sup>2</sup> °C		823
Pérdida de carga - total*	kPa	13.7	24.8
- en puertos (Entrada/Salida)	kPa	-0.0781/0.458	0.371
Pérdida de carga en distribución fluida	kPa	0.000 - 0.000	
Presión de operación - salida	kPa	204	
Número de canales por paso		24	25
Numero de platos			50
Sobredimensionamiento	%		21
Factor ensuciamiento	m <sup>2</sup> °C/kW		0.215
Diámetro de las conexiones (arriba/abajo)	mm	61.0/61.0	61.0/61.0
Diámetro de la conexión de entrada recomendado	mm	26.1 - 41.2	
Diámetro de la conexión de salida recomendado	mm	42.6 - 95.3	
Número de Reynolds			85.12
Velocidad en conexiones – outlet	m/s	12.7	0.855
Velocidad en canal	m/s	3.25	0.210
Tensión de corte	kPa		0.0753
La mayor diferencia de temperatura de la pared	K		0.4
Min./Máx. temperatura de pared	°C	-20.0/-11.8	-19.8/-11.7

\* Excluyendo caída de presión en las conexiones.

### NOTAS

! SWEP does not recommend to select B-type evaporator with large number of plates.

PROPIEDADES FÍSICAS		CIRC. 1	CIRC. 2
Temperatura de referencia	°C	-24.0	-12.6
Líquido • Viscosidad	cP	0.161	10.6
• Densidad	kg/m <sup>3</sup>	559.2	1072
• Calor específico	kJ/kg,°C	2.338	3.361
• Conductividad térmica	W/m,°C	0.1188	0.3801
Vapor • Viscosidad	cP	6.77e-3	
• Densidad	kg/m <sup>3</sup>	4.826	
• Calor específico	kJ/kg,°C	1.549	

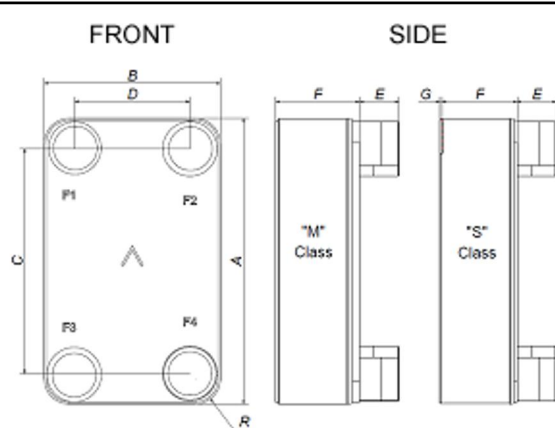


PROPIEDADES FÍSICAS		CIRC. 1	CIRC. 2
• Conductividad térmica	W/m,°C	0.01325	
• Calor latente	kJ/kg	405.4	
• Bub Enthalpy	kJ/kg	139.6	
• Dew Enthalpy	kJ/kg	546.3	
• Inlet Enthalpy	kJ/kg	292.9	
• Outlet Enthalpy	kJ/kg	557.9	
Coefficiente del film	W/m <sup>2</sup> ,°C	4770	2990

TOTALS		CIRC. 1	CIRC. 2
Peso total (sin conexiones)*	kg		19.31 - 27.4
Volumen de retención (Interior Circuito)	dm <sup>3</sup>		4.32
Volumen de retención (Exterior Circuito)	dm <sup>3</sup>		4.5
Tamaño del puerto F1/P1	mm		61
Tamaño del puerto F2/P2	mm		61
Tamaño del puerto F3/P3	mm		61
Tamaño del puerto F4/P4	mm		61

\*El peso depende del producto seleccionado.

## DIMENSIONES



A	mm	393 ±2
B	mm	243 ±1
C	mm	309 ±1
D	mm	159 ±1
E	mm	27 (opt. 54) ±1
F*	mm	123 - 135 ±2%
G*	mm	0 - 4 ±1
R	mm	35

\*Las dimensiones dependen del producto seleccionado.

\*Este es un boceto esquemático. Para obtener los dibujos correctos, utilice la función de dibujo de pedidos o póngase en contacto con su representante de SWEP.

## HUELLA DE CARBONO

	Unit	Value
Sweden - Landskrona	kg CO <sub>2</sub> e	99.5 - 141.1
USA - Tulsa	kg CO <sub>2</sub> e	104.3 - 148.0
Slovakia - Košice	kg CO <sub>2</sub> e	113.1 - 160.4
Malaysia - Kuala Lumpur	kg CO <sub>2</sub> e	157.5 - 223.4
China - Suzhou	kg CO <sub>2</sub> e	270.2 - 383.3

### Legal notice:

By using the SSP/DThermX software the Licensee confirms that the input data is not subject to export control laws including ITAR (International Traffic in Arms Regulations). Licensee further agrees and confirms that the configured products are not subject to export control laws including ITAR and do not qualify as "specially designed" for export control purposes. If you would like to discuss configuration of export controlled products including ITAR-qualifying products, or if your data is export controlled, please reach out to your SWEP representative or email info@swep.net.

### Disclaimer:

Data used in this calculation is subject to change without notice. SWEP strives to use "best practice" for the calculations leading to the above results. Calculation is intended to show thermal and hydraulic performance, no consideration has been taken to mechanical strength of the product. Product restrictions - such as pressure, temperatures and corrosion resistance- can be found in SWEP product sheets and other technical documentation. SWEP may have patents, trademarks, copyrights or other intellectual property rights covering subject matter in this document. Except as expressly provided in any written license agreement from SWEP, the furnishing of this document does not give you any license to these patents, trademarks, copyrights, or other intellectual property. To the maximum extent permitted by applicable law, the software, the calculations and the results are provided without warranties of any kind, whether express or implied. No advice or information obtained through use of the software (including information provided in the results), will create any warranty not expressly stated in the applicable license terms. Without limiting the foregoing, SWEP does not warrant that the content (including the calculations and the results) is accurate, reliable or correct. SWEP does not warrant that any system comprising heat exchanger and other components, installed on the basis of calculations in this software, will meet your requirements or function to your satisfaction or expectations.







# ANEXO 4

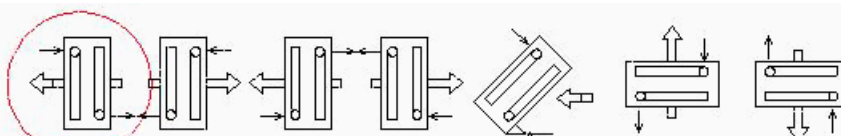
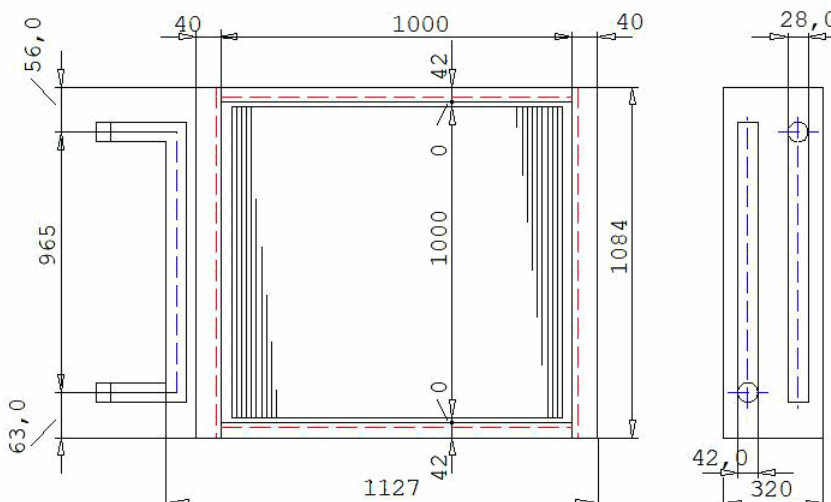
## Ficha técnica condensador

<b>Company:</b>	<b>Project</b>	-
<b>Attn:</b>	<b>Issued by</b>	Mario Rossi
<b>Fax:</b>	<b>Phone</b>	0039 366 48 55 56
<b>e-mail:</b>	<b>Fax:</b>	0039 366 45 88 52
	<b>e-mail:</b>	Rosii@prova.com

**Condensing coil: 25 x 21.65 7mm - CR 40NT 12NR 1000A 3,2P 40NC CuR-AI**

<b>AIR</b>	Sea Level	<b>0</b> m	Barometric pressure	<b>1,0133</b> mBar	
Air Volume Flow	<b>23668</b> m <sup>3</sup> /h	Mass Flow	<b>26982</b> kg/h	Density Air	<b>1,100</b> kg/m <sup>3</sup>
		Velocity	<b>6,57</b> m/s	Pressure drop dry air	<b>483</b> Pa
Air IN - Dry bulb	<b>30,0</b> °C	Air OFF - Dry bulb	<b>40,0</b> °C	Capacity	<b>75,3</b> kW
Air IN - Humidity	<b>60</b> %	Air OFF - Humidity	<b>35</b> %		
Air IN - Enthalpy	<b>71,0</b> kJ/kg	Air OFF - Enthalpy	<b>81,3</b> kJ/kg		
Air IN - Water content	<b>16,0</b> g/kg	Air OFF - Water content	<b>16,04</b> g/kg		

<b>REFRIGERANT</b>	<b>R290 (propane)</b>		
Hot Gas Temperature	<b>96,2</b> °C	Pressure Drop	<b>22,01</b> kPa
Condensing Temperature	<b>40,0</b> °C	Refrigerant mass flow	<b>0612</b> kg/h
Liquid Temperature	<b>35,0</b> °C	Refrigerant volume flow	<b>27</b> m <sup>3</sup> /h
Subcooling Temperature	<b>5,0</b> K		



In case of order, please fill out the drawing at link <http://www.deltacoils.com/home-en-US/dettagli-tecnici-2-en-US/> (section "Technical Drawings") and send this together with the order. The drawing on this page is only a sketch.

Weight	<b>79,6</b> kg	Volume	<b>15,9</b> lit
Surface	<b>161,1</b> m <sup>2</sup>	Header	<b>42/28</b> mm



# ANEXO 5

## Ficha técnica válvula de expansión









# ANEXO 6

## Características tuberías

# Coolselector2

## Información del proyecto

Nombre del proyecto:  
 Comentarios:  
 Creado por:  
 Coolselector2 versión: 5.5.5. Base de datos: 121  
 Imprimido: Sábado, 3 de Mayo de 2025  
 Preferencias utilizadas: Todas las aplicaciones

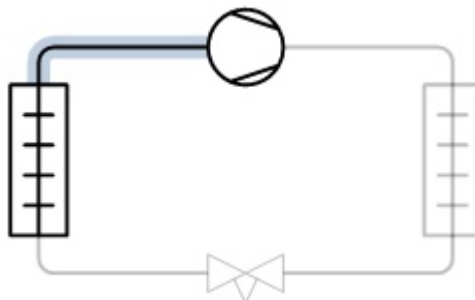
## Tuberías: Tuberías 1

### Condiciones de funcionamiento

Refrigerante:	R290	Capacidad de refrigeración:	45,00 kW
Caudal másico en la línea:	620,3 kg/h	Capacidad de calefacción:	67,01 kW
Temperatura de evaporación:	-25,0 °C	Temperatura de condensación:	40,0 °C
Presión de evaporación:	2,034 bar	Presión de condensación:	13,69 bar
Recalentamiento útil:	5,0 K	Subenfriamiento:	5,0 K
Recalentamiento adicional:	0 K	Subenfriamiento adicional:	0 K
Temperatura de descarga:	71,0 °C		

**Sistema y línea:** Sistema de expansión seca. Línea de aspiración

**Criterios de selección:** Caída de temperatura de saturación: 0,020. Longitud: 1,00 m. Ángulo: 0 °

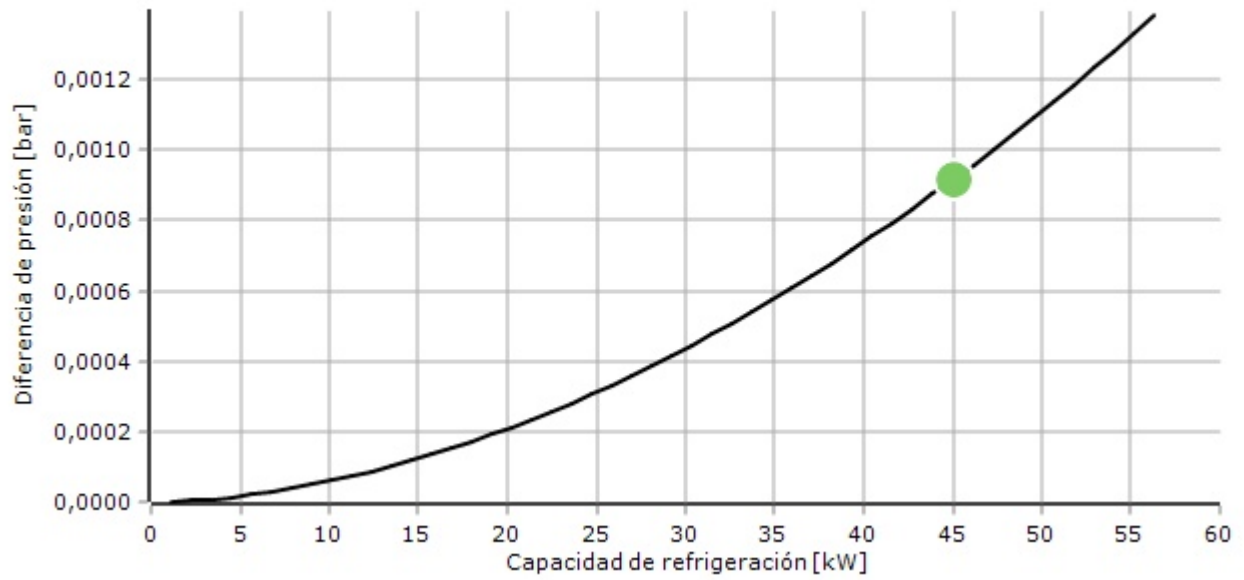


## Selección: Tubería de cobre DIN-EN 64

Tipo	DIN-EN 42	DIN-EN 54	DIN-EN 64	DIN-EN 76	DIN-EN 89
NS	42	54	64	76,1	88,9
DP [bar]	0,008	0,002	0,001	0,000	0,000
DT_sat [K]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
DP [K/m]	0,099	0,029	0,012	0,005	0,002
Velocidad, entrada [m/s]	31,90	19,41	13,48	9,34	6,73
Velocidad, salida [m/s]	32,03	19,43	13,49	9,34	6,73

## Curva de rendimiento

**Tubería de cobre DIN-EN 64**  
**Línea de aspiración (Sistema de expansión seca. R290. Tuberías).**



# Coolselector2

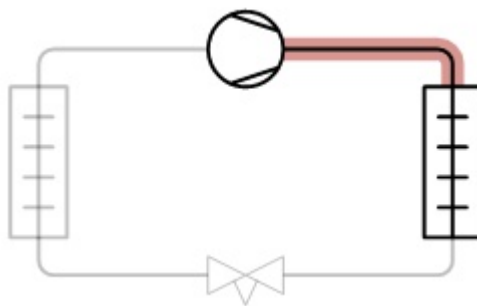
## Tuberías: Tuberías 2

### Condiciones de funcionamiento

Refrigerante:	R290	Capacidad de refrigeración:	45,00 kW
Caudal másico en la línea:	620,3 kg/h	Capacidad de calefacción:	76,36 kW
Temperatura de evaporación:	-25,0 °C	Temperatura de condensación:	40,0 °C
Presión de evaporación:	2,034 bar	Presión de condensación:	13,69 bar
Recalentamiento útil:	5,0 K	Subenfriamiento:	5,0 K
Recalentamiento adicional:	0 K	Subenfriamiento adicional:	0 K
Temperatura de descarga:	96,2 °C		

**Sistema y línea:** Sistema de expansión seca. Línea de descarga

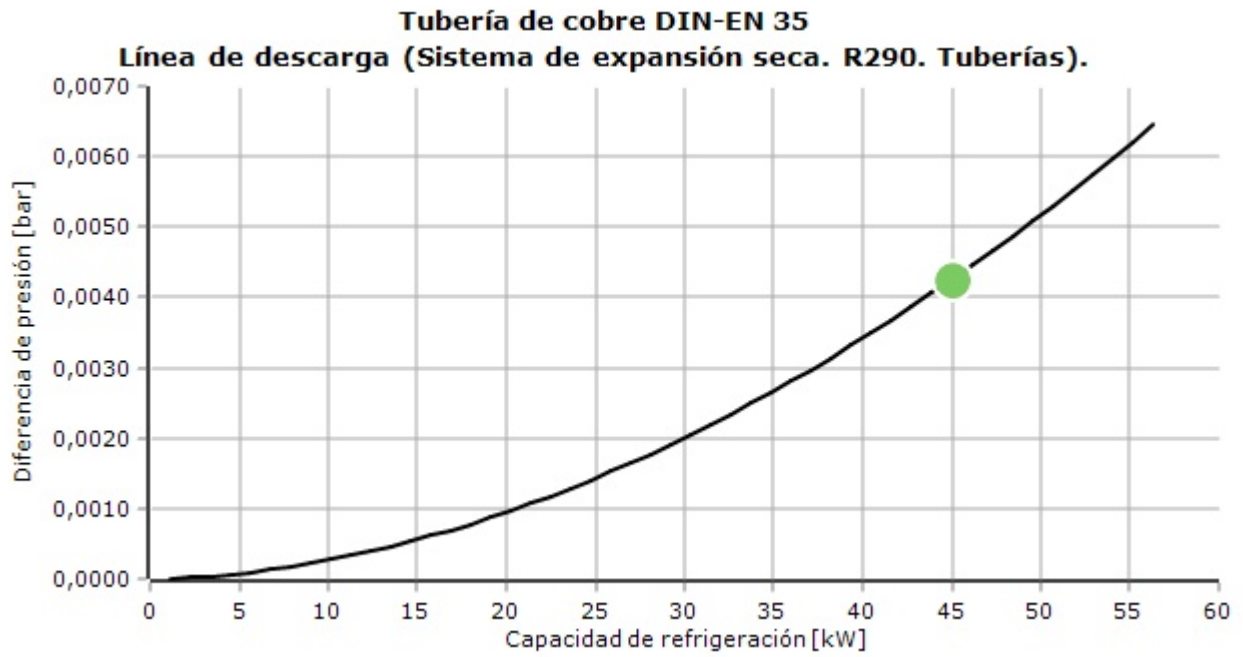
**Criterios de selección:** Caída de temperatura de saturación: 0,020. Longitud: 1,00 m. Ángulo: 0 °



### Selección: Tubería de cobre DIN-EN 35

Tipo	DIN-EN 22	DIN-EN 28	DIN-EN 35	DIN-EN 42	DIN-EN 54
NS	22	28	35	42	54
DP [bar]	0,044	0,014	0,004	0,002	0,000
DT_sat [K]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
DP [K/m]	0,138	0,046	0,013	0,005	0,002
Velocidad, entrada [m/s]	24,55	15,71	9,59	6,46	3,93
Velocidad, salida [m/s]	24,64	15,73	9,60	6,46	3,93

## Curva de rendimiento



# Coolselector2

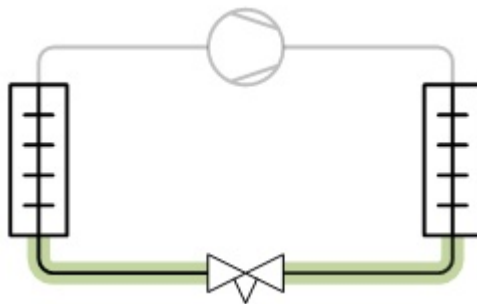
## Tuberías: Tuberías 3

### Condiciones de funcionamiento

Refrigerante:	R290	Capacidad de refrigeración:	45,00 kW
Caudal másico en la línea:	620,3 kg/h	Capacidad de calefacción:	76,36 kW
Temperatura de evaporación:	-25,0 °C	Temperatura de condensación:	40,0 °C
Presión de evaporación:	2,034 bar	Presión de condensación:	13,69 bar
Recalentamiento útil:	5,0 K	Subenfriamiento:	5,0 K
Recalentamiento adicional:	0 K	Subenfriamiento adicional:	0 K
Temperatura de descarga:	96,2 °C		

**Sistema y línea:** Sistema de expansión seca. Línea de líquido

**Criterios de selección:** Caída de temperatura de saturación: 0,020. Longitud: 1,00 m. Ángulo: 0 °

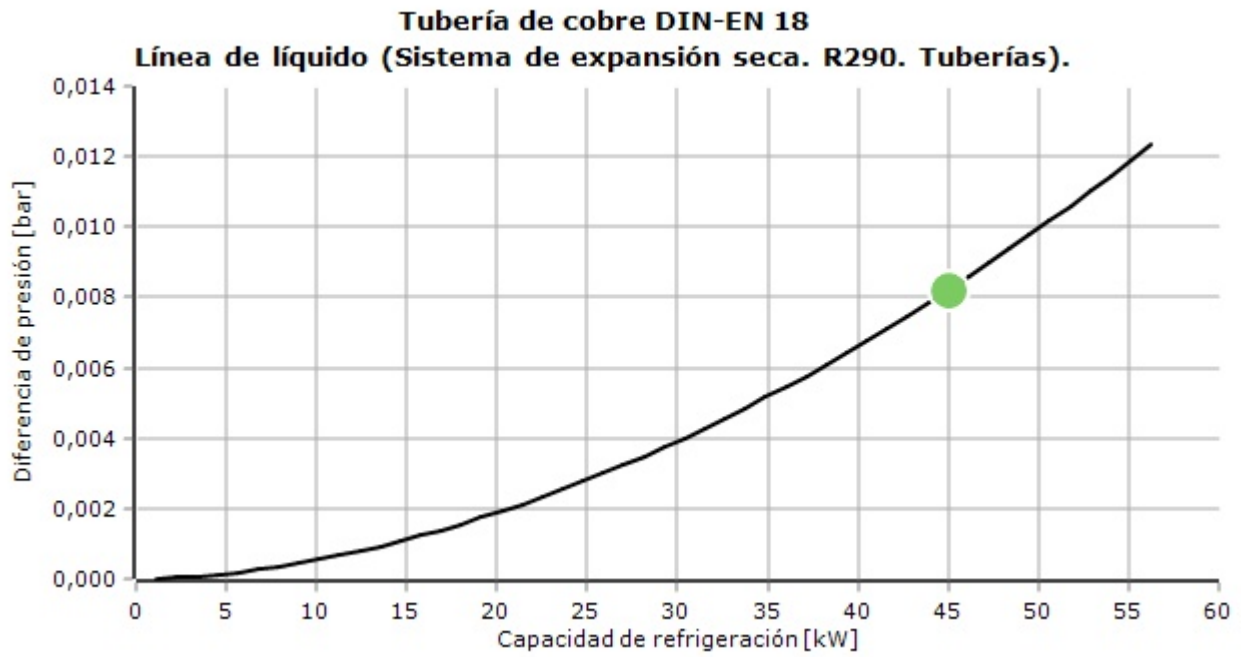


### Selección: Tubería de cobre DIN-EN 18

Tipo	DIN-EN 15	DIN-EN 16	DIN-EN 18	DIN-EN 22	DIN-EN 28
NS	15	16	18	22	28
DP [bar]	0,023	0,016	0,008	0,003	0,001
DT_sat [K]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
DP [K/m]	0,071	0,050	0,026	0,009	0,003
Velocidad, entrada [m/s]	2,72	2,35	1,80	1,15	0,74
Velocidad, salida [m/s]	2,72	2,35	1,80	1,15	0,74

# Coolselector2

## Curva de rendimiento







# ANEXO 7

## Ficha técnica ventilador

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG

Bachmühle 2

D-74673 Mulfingen

Phone +49 (0) 7938 81-0

Fax +49 (0) 7938 81-110

info1@de.ebmpapst.com

www.ebmpapst.com

## CONTENTS

<b>1. SAFETY REGULATIONS AND INFORMATION</b>	<b>1</b>
1.1 Hazard levels for warnings	1
1.2 Staff qualifications	1
1.3 Basic safety rules	1
1.4 Voltage	1
1.5 Safety and protective features	2
1.6 Electromagnetic radiation	2
1.7 Mechanical movement	2
1.8 Emissions	2
1.9 Hot surface	2
1.10 Transport	2
1.11 Storage	2
<b>2. INTENDED USE</b>	<b>3</b>
<b>3. TECHNICAL DATA</b>	<b>4</b>
3.1 Product drawing	4
3.2 Nominal data	5
3.3 Data according to Commission Regulation (EU) 327/2011	5
3.4 Technical description	5
3.5 Mounting data	6
3.6 Transport and storage conditions	6
3.7 Electromagnetic compatibility	6
<b>4. CONNECTION AND STARTUP</b>	<b>6</b>
4.1 Mechanical connection	6
4.2 Electrical connection	7
4.3 Connection in terminal box	8
4.4 Factory settings	9
4.5 Connection diagram	10
4.6 Checking connections	12
4.7 Switching on the device	12
4.8 Switching off the device	12
<b>5. INTEGRATED PROTECTIVE FEATURES</b>	<b>12</b>
<b>6. MAINTENANCE, MALFUNCTIONS, POSSIBLE CAUSES AND REMEDIES</b>	<b>13</b>
6.1 Vibration testing	13
6.2 Cleaning	14
6.3 Safety inspection	14
6.4 Disposal	14

## 1. SAFETY REGULATIONS AND INFORMATION

Read these operating instructions carefully before starting work on the device. Observe the following warnings to prevent malfunctions or danger to persons.

These operating instructions are to be regarded as part of the device. The device is only to be sold or passed on together with the operating instructions.

These operating instructions may be duplicated and distributed to inform about potential dangers and their prevention.

### 1.1 Hazard levels for warnings

These operating instructions use the following hazard levels to indicate potentially hazardous situations and important safety regulations:



#### DANGER

Indicates an imminently hazardous situation which will result in death or serious injury if the specified actions are not taken. Compliance with the instructions is imperative.

#### WARNING

Indicates a potentially hazardous situation which can result in death or serious injury if the specified actions are not taken. Exercise extreme caution while working.

#### CAUTION

Indicates a potentially hazardous situation which can result in minor or moderate injury or damage to property if the specified actions are not taken.

#### NOTE

A potentially harmful situation can occur and, if not avoided, can lead to property damage.

### 1.2 Staff qualifications

The device may only be transported, unpacked, installed, operated, maintained and otherwise used by suitably qualified, trained and authorized technical staff.

Only authorized specialists are permitted to install the device, to carry out a test run and to perform work on the electrical installation.

### 1.3 Basic safety rules

The safety hazards associated with the device must be assessed again following installation in the final product.

The locally applicable industrial safety regulations are always to be observed when working on the device.

Keep the workplace clean and tidy. Untidiness in the work area increases the risk of accidents.

Note the following when working on the device:

- ⇒ Do not perform any modifications, additions or conversions on the device without the approval of ebm-papst.

### 1.4 Voltage

- ⇒ Check the device's electrical equipment at regular intervals; see Chapter 6.3 Safety inspection.

- ⇒ Replace loose connections and defective cables immediately.



#### DANGER

#### Electrically charged device

Risk of electric shock

- When working on an electrically charged device, stand on a rubber mat.

**WARNING****Live terminals and connections even with device switched off**

Electric shock

- Wait five minutes after disconnecting the voltage at all poles before opening the device.

**CAUTION****In the event of a fault, the rotor and the impeller will be energized**

The rotor and the impeller have basic insulation.

- Do not touch the rotor and impeller once installed.

**CAUTION****If control voltage or a stored speed set value is applied, the motor will restart automatically, e.g. after a power failure.**

Risk of injury

- Keep out of the device's danger zone.
- When working on the device, switch off the line voltage and ensure that it cannot be switched back on.
- Wait until the device comes to a stop.
- After working on the device, remove any tools or other objects from the device.

**1.5 Safety and protective features****DANGER****Guard missing and guard not functioning**

Without a guard, hands may become caught up in the device during operation for example, resulting in serious injury. Loose parts or items of clothing could be drawn in.

- The device is a built-in component. As the owner, you are responsible for ensuring that the device is adequately safeguarded. Operate the device only with a fixed protective device and guard grill.
- Stop the device immediately if a protective device is found to be missing or ineffective.

**1.6 Electromagnetic radiation****NOTE****Electrical or electromagnetic interference after installing the device in customer equipment.**

- Verify that the entire setup is EMC-compliant.

**1.7 Mechanical movement****DANGER****Rotating device**

Risk of injury to body parts coming into contact with the rotor or the impeller.

- Secure the device against accidental contact.
- Before working on the system/machine, wait until all parts have come to a standstill.

**DANGER****Ejected parts**

Missing protective devices may cause balancing weights or broken fan blades to be ejected and cause injuries.

- Take appropriate safety measures.

**WARNING****Rotating device**

Long hair and dangling items of clothing, jewelry and the like can become entangled and be pulled into the device. Injuries can result.

- Do not wear any loose-fitting or dangling clothing or jewelry while working on rotating parts.
- Protect long hair with a cap.

**1.8 Emissions****WARNING****Depending on the installation and operating conditions, the sound pressure level may exceed 70 dB(A).**

Risk of noise-induced hearing loss

- Take appropriate technical safety measures.
- Protect operating personnel with appropriate safety equipment such as hearing protection.
- Also observe the requirements of local agencies.

**1.9 Hot surface****CAUTION****High temperature on electronics housing**

Risk of burns

- Ensure sufficient protection against accidental contact.

**1.10 Transport****WARNING****Transporting the fan**

Injuries from tipping or slipping

- The fan is always to be transported with care and in its original packaging.
- If set down too hard or at an angle for example, the impact can lead to bearing damage or deformation of the frame or impeller.
- It must be ensured that the fans cannot tip over during transportation and handling.
- Secure the fan(s) with appropriate equipment such as a lashing strip so that nothing can slip or tip, especially when stacking multiple fans.
- Also make allowance for possible wind forces.

**1.11 Storage****WARNING****Storing the fan**

Injuries from tipping or slipping

- The fans must always be stored and handled so that they cannot tip over.
- Secure the fan(s) with appropriate equipment such as a lashing strip so that nothing can slip or tip, especially when stacking multiple fans.
- Also take possible wind forces into consideration.

- ⇒ Store the device, partially or fully assembled, in a dry place, protected against the weather and free from vibration, in the original packaging in a clean environment.
  - ⇒ Protect the device against environmental effects and dirt until final installation.
  - ⇒ We recommend storing the device for no longer than one year in order to guarantee trouble-free operation and the longest possible service life.
  - ⇒ Even devices explicitly intended for outdoor use are to be stored as described prior to commissioning.
  - ⇒ Maintain the storage temperature, see Chapter 3.6 Transport and storage conditions.
  - ⇒ Make sure that all cable glands are fitted with dummy plugs.
- Conveying highly corrosive air, e.g. salt spray. Exception: devices designed for salt spray and correspondingly protected.
  - Conveying air with high dust content, e.g. suctioning off sawdust.
  - Operating the device close to flammable materials or components.
  - Operating the device in an explosive atmosphere.
  - Using the device as a safety component or to perform safety-related functions.
  - Operation with completely or partially disassembled or manipulated protective devices.
  - In addition, all applications not listed among the intended uses.

## 2. INTENDED USE

The device is exclusively designed as a built-in device for conveying air according to its technical data.

Any other usage above and beyond this does not conform with the intended purpose and constitutes misuse of the device.

Customer equipment must be capable of withstanding the mechanical and thermal stresses that can arise from this product. This applies for the entire service life of the equipment in which this product is installed.

### Intended use also includes

- The device is only to be used in power systems with grounded neutral (TN/TT power systems), in power systems with phase conductor grounding, or in IT power systems.
- The device is to be used in networks with network quality characteristics as per EN 50160.
- Using the device only in stationary systems.
- Performing all maintenance work.
- Conveying air at an ambient air pressure between 800 mbar and 1050 mbar.
- Using the device within the permitted ambient temperature range; see Chapter 3.6 Transport and storage conditions and Chapter 3.2 Nominal data.
- Operating the device with all protective devices.
- Following the operating instructions.

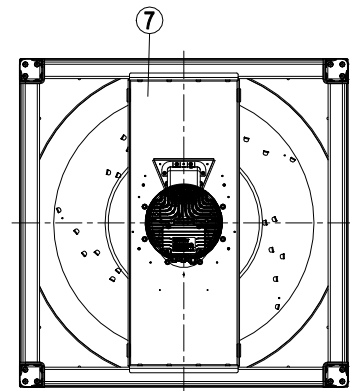
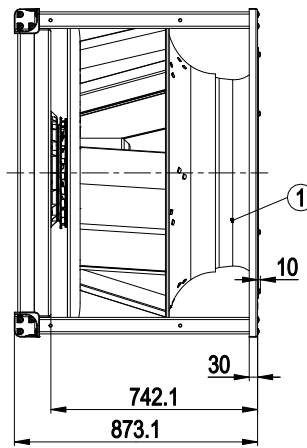
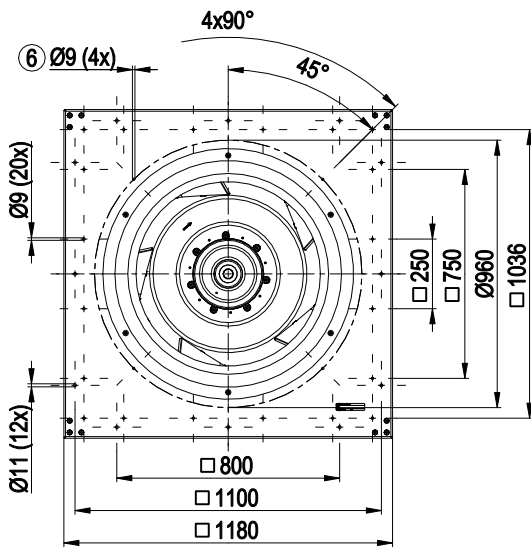
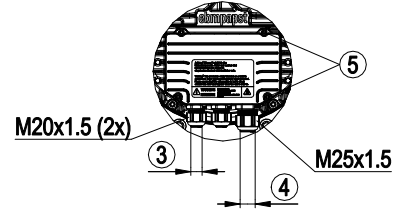
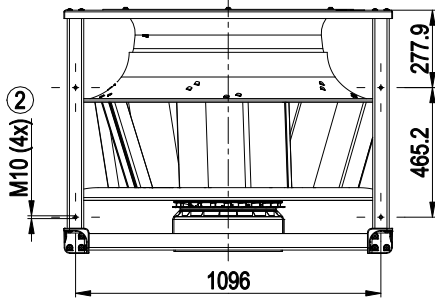
### Improper use

In particular, operating the device in the following ways is prohibited and could be hazardous:

- Operating the device in an unbalanced state, e.g. due to dirt deposits or ice formation.
- Resonant operation, operation with severe vibration. This also includes vibration transmitted to the fan from the customer installation.
- Operation in medical equipment with a life-sustaining or life-support function.
- Conveying solids in the flow medium.
- Painting the device
- Connections (e.g. screws) coming loose during operation.
- Opening the terminal box during operation.
- Standing or walking on the device
- Conveying air that contains abrasive particles.

## 3. TECHNICAL DATA

### 3.1 Product drawing



All dimensions in mm.

1	Inlet ring with pressure tap (k-factor: 1200)
2	Mounting position for vibration-absorbing elements, tightening torque max. 40 Nm
3	Cable diameter min. 4 mm, max. 10 mm, tightening torque $4 \pm 0.6$ Nm
4	Cable diameter min. 9 mm, max. 16 mm, tightening torque $6 \pm 0.9$ Nm
5	Tightening torque $3.5 \pm 0.5$ Nm
6	Attachment holes for FlowGrid (80000-2-2957 not included in scope of delivery)
7	Motor support plate
	Installation position: shaft horizontal (motor support plate must stand upright) or rotor on bottom; rotor on top on request
	The drawing shows the dimensions only and does not represent the installation position

## 3.2 Nominal data

Motor	M3G200-QA
Phase	3~
Nominal voltage / VAC	400
Nominal voltage range / VAC	380 .. 480
Frequency / Hz	50/60
Method of obtaining data	ml
Speed (rpm) / min <sup>-1</sup>	750
Power consumption / W	6340
Current draw / A	9.8
Min. ambient temperature / °C	-40
Max. ambient temperature / °C	40

ml = Max. load · me = Max. efficiency · fa = Free air  
 cs = Customer specification · ce = Customer equipment

Subject to change

## 3.3 Data according to Commission Regulation (EU) 327/2011

	Actual	Req. 2015
01 Overall efficiency $\eta_{es}$ / %	71.2	59.9
02 Measurement category	A	
03 Efficiency category	Static	
04 Efficiency grade N	73.3	62
05 Variable speed drive	Yes	
06 Year of manufacture	The year of manufacture is specified on the product's rating label.	
07 Manufacturer	ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG Amtsgericht (court of registration) Stuttgart · HRA 590344 D-74673 Mulfingen	
08 Type	K3GA00-PV03-01	
09 Power consumption $P_{ed}$ / kW	6.35	
09 Air flow $q_v$ / m <sup>3</sup> /h	27600	
09 Pressure increase total psf / Pa	570	
10 Speed (rpm) $n$ / min <sup>-1</sup>	750	
11 Specific ratio*	1.01	
12 Recycling/disposal	Information on recycling and disposal is provided in the operating instructions.	
13 Maintenance	Information on installation, operation and maintenance is provided in the operating instructions.	
14 Additional components	Components used to calculate the energy efficiency that are not apparent from the measurement category are detailed in the CE declaration.	

\* Specific ratio =  $1 + p_{is} / 100\,000\text{ Pa}$

Data obtained at optimum efficiency level. The ErP data is determined using a motor-impeller combination in a standardized measurement setup.

## 3.4 Technical description

Weight	168 kg
Size	1000 mm
Motor size	200
Rotor surface	Painted black
Electronics housing material	Die-cast aluminum
Impeller material	Sheet aluminum
Support plate material	Sheet steel, galvanized
Spacer material	Aluminum
Inlet nozzle material	Sheet steel, galvanized
Number of blades	5
Direction of rotation	Clockwise, viewed toward rotor
Degree of protection	IP55
Insulation class	"F"
Moisture (F) / Environmental (H) protection class	H1
Ambient temperature note	Occasional start-up at temperatures between -40°C and -25°C is permitted. For continuous operation at ambient temperatures below -25°C (such as refrigeration applications), use must be made of a fan design with special low-temperature bearings.
Installation position	See legend on product drawing
Condensation drainage holes	On rotor side
Mode	S1
Motor bearing	Ball bearing; (sealed)
Technical features	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Output 10 VDC, max. 10 mA</li> <li>- Output 20 VDC, max. 50 mA</li> <li>- Output for slave 0-10 V</li> <li>- Operation and alarm display</li> <li>- Input for sensor 0-10 V or 4-20 mA</li> <li>- External 24 V input (parameter setting)</li> <li>- External release input</li> <li>- Alarm relay</li> <li>- Integrated PID controller</li> <li>- Motor current limitation</li> <li>- RS-485 MODBUS-RTU</li> <li>- Soft start</li> <li>- EEPROM write cycles: 100,000 maximum</li> <li>- Control input 0-10 VDC / PWM</li> <li>- Control interface with SELV potential safely disconnected from the mains</li> <li>- Thermal overload protection for electronics/motor</li> <li>- Line undervoltage / phase failure detection</li> </ul>
Touch current according to IEC 60990 (measuring circuit Fig. 4, TN system)	$\leq 3.5\text{ mA}$
Electrical hookup	Terminal box
Motor protection	Reverse polarity and locked-rotor protection

Protection class	I (with customer connection of protective earth)
Conformity with standards	EN 61800-5-1; CE
Approval	EAC; UL 1004-7 + 60730-1; CSA C22.2 No. 77 + CAN/CSA-E60730-1



With regard to cyclic speed loads, note that the rotating parts of the device are designed for a maximum of one million load cycles. If you have special questions, consult ebm-papst for support.

⇒ Use the device in accordance with its degree of protection.

### Information on surface quality

The surfaces of the products conform to the generally applicable industrial standard. The surface quality may change during the production period. This has no effect on strength, dimensional stability and dimensional accuracy.

The color pigments in the paints used perceptibly react to UV light over the course of time. This does not however in any way affect the technical properties of the products. The product is to be protected against UV radiation to prevent the formation of patches and fading. Changes in color are not a reason for complaint and are not covered by the warranty.

### 3.5 Mounting data

⇒ Secure the screws against unintentional loosening (e.g. use self-locking screws).

Strength class of screws	10.9
--------------------------	------

Any further mounting data required can be taken from the product drawing or Section Chapter 4.1 Mechanical connection.

### 3.6 Transport and storage conditions

Max. permitted ambient temp. for motor (transport/storage)	+80 °C
Min. permitted ambient temp. for motor (transport/storage)	-40 °C

### 3.7 Electromagnetic compatibility

EMC immunity to interference	According to EN 61000-6-2 (industrial environment)
EMC interference emission	According to EN 61000-6-4 (industrial environment)



If several devices are connected in parallel on the supply side so that the line current of the arrangement is in the range 16 - 75 A, this arrangement conforms to IEC 61000-3-12, provided that the short-circuit power  $S_{sc}$  at the connection point of the customer system to the public power grid is greater than or equal to 250 times the rated output of the arrangement. It is the responsibility of the installation engineer or operator/owner of the device to ensure, if necessary after consultation with the network operator, that this device is only connected to a connection point with an  $S_{sc}$  value greater than or equal to 250 times the rated output of the arrangement.

## 4. CONNECTION AND STARTUP

### 4.1 Mechanical connection



#### DANGER

**Heavy and unwieldy device.**

Crushing hazard

- Do not grasp or transport the device by the fan impeller. Move the device with a crane using ropes or cloth straps. There are holes drilled in the support structure that can be used for transport.
- After installation, ensure that the blades on the fan impeller are not deformed or bent.

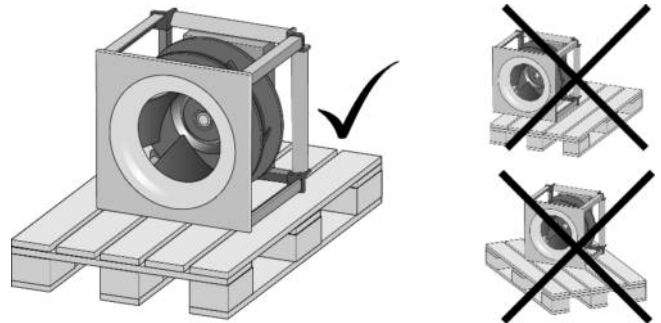


Fig. 1: Make sure the RadiPac fan is firmly secured when transporting on a pallet. The impeller is not to be subjected to load. If the impeller is subjected to load (e.g. during transportation), the fan could be severely damaged!



#### CAUTION

**Risk of cutting and crushing when removing device from packaging**



- Carefully remove the device from the packaging by grasping hold of the frame. Never subject to any impact.
- Wear safety shoes and cut-resistant safety gloves.



#### CAUTION

**Device weighs over 25 kg! Heavy load when unpacking device.**

Risk of physical injury, such as back injuries.

- Use suitable hoisting equipment to remove the device from its packaging.



#### NOTE

**Damage to the device from vibration**

Bearing damage, shorter service life

- The fan must not be subjected to force or excessive vibration from sections of the installation.
- It is advisable to use spring or rubber isolators for decoupling (not included in scope of delivery). The fan is to be operated sufficiently far away from the resonant frequency of the vibration isolators.
- If the fan is connected to air ducts, the connection should be isolated from vibration, e.g. using compensators or similar elements.
- Ensure stress-free attachment of the fan to the sub-structure.

⇒ The fan may not be handled in the area around the inlet nozzle during transport and installation. There is a risk of damage to the impeller.

- ⇒ Check the device for transport damage. Damaged devices are not to be installed.
- ⇒ Install the undamaged device in accordance with your application.

#### 4.1.1 Installation of RadiPac fan

Use is always to be made of appropriate hoisting equipment and a suitable lifting device when transporting the RadiPac for installation purposes. Use only suitable ropes or chains (see Chapter 3.4 Technical description for product weight). To attach the hoisting equipment, use four M10 eye bolts that can turn under load; screw the eye bolts into the tapped holes provided. For fans not provided with tapped holes, use the existing holes and lock the threaded bolts that can turn (M8 or M10) on the underside with a nut. Do not use standard DIN 580 eye bolts. Note that the angle between the ropes or chains may be between 0° and 60°. During transportation, an acceleration of 2 g must not be exceeded.

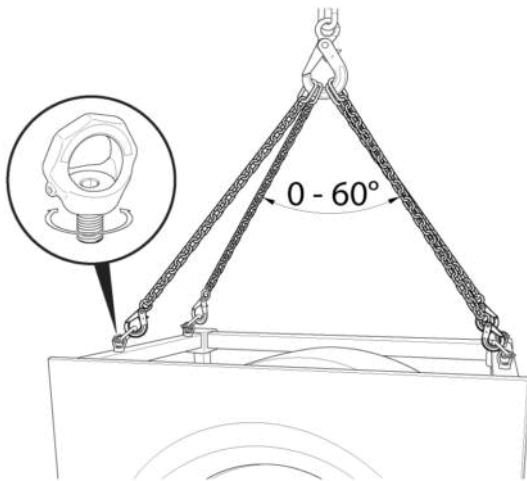


Fig. 2: Illustration showing transport of RadiPac fan



#### CAUTION

##### Possible damage to the device

If the device slips during installation, serious damage can result.

- Ensure that the device is securely positioned at its place of installation until all fastening screws have been tightened.

- The fan must not be strained on fastening.

#### 4.2 Electrical connection



#### DANGER

##### Voltage on the device

Electric shock

- Always connect a protective earth first.
- Check the protective earth.



#### DANGER

##### Faulty insulation

Risk of fatal injury from electric shock

- Use only cables that meet the specified installation regulations for voltage, current, insulation material, capacity, etc.
- Route cables so that they cannot be touched by any rotating parts.



#### DANGER

**Electrical charge (>50 µC) between phase conductor and protective earth connection after switching off supply with multiple devices connected in parallel.**

Electric shock, risk of injury

- Ensure sufficient protection against accidental contact. Before working on the electrical hookup, short the supply and PE connections.

#### CAUTION

##### Voltage

The fan is a built-in component and has no disconnecting switch.

- Only connect the fan to circuits that can be switched off with an all-pole disconnection switch.
- When working on the fan, secure the system/machine in which the fan is installed so as to prevent it from being switched back on.

#### NOTE

##### Device malfunctions possible

Route the device's control lines separately from the supply line.

- Maintain the greatest possible clearance. Recommendation: clearance > 10 cm (separate cable routing)

#### NOTE

##### Water ingress into wires or cables

Water ingress at the customer end of the cable can damage the device.

- Make sure the end of the cable is connected in a dry environment.



Only connect the device to circuits that can be switched off with an all-pole disconnection switch.

#### 4.2.1 Requirements

- ⇒ Check whether the information on the nameplate matches the connection data.
- ⇒ Before connecting the device, make sure the power supply matches the device voltage.
- ⇒ Only use cables designed for the current level indicated on the nameplate. For determining the cross-section, note the sizing criteria according to EN 61800-5-1. The protective earth must have a cross-section equal to or greater than that of the phase conductor. We recommend the use of 105 °C cables. Ensure that the minimum cable cross-section is at least AWG 26 / 0.13 mm<sup>2</sup>.

#### Protective earth contact resistance according to EN 61800-5-1

Compliance with the resistance specifications according to EN 61800-5-1 for the protective earth connection circuit must be verified in the end application. Depending on the installation situation, it may be necessary to connect an additional protective earth conductor by way of the extra protective earth terminal provided on the device. The protective earth terminal is located on the housing and provided with a protective earth symbol and a hole.

#### 4.2.2 Supply connection and fuses

Assignment of supply cable cross-sections and their required fuses (line protection only, no equipment protection).

Nominal voltage	Fuse		Automatic circuit breaker	Cable cross-section	Cable cross-section
	VDE	UL	VDE	mm <sup>2</sup>	*AWG
3/PE AC 380-480 VAC	20 A	20 A	C20A	2.5	14
3/PE AC 380-480 VAC	25 A	25 A	C25A	4.0	12

\* AWG = American Wire Gauge

#### 4.2.3 Reactive currents



Because of the EMC filter integrated for compliance with EMC limits (interference emission and immunity to interference), reactive currents can be measured in the supply line even when the motor is at a standstill and the line voltage is switched on.

- The values are typically in the range < 500 mA.
- At the same time, the effective power in this operating state (operational readiness) is typically < 6 W.

#### 4.2.4 Residual current circuit breaker (RCCB)



If the use of a residual current device (RCD) is required in your installation, only AC/DC-sensitive residual current devices (type B or B+) are permissible. As with variable frequency drives, residual current devices cannot provide personal safety while operating the device. When the device power supply is switched on, pulsed charging currents from the capacitors in the integrated EMC filter can lead to the instant tripping of residual current devices. We recommend the use of residual current circuit breakers (RCCB) with a trip threshold of 300 mA and delayed tripping (super-resistant, characteristic K).

#### 4.2.5 Leakage current



For asymmetrical power systems or if a phase fails, the leakage current can increase to a multiple of the nominal value.

#### 4.2.6 Locked-rotor protection



Due to the locked-rotor protection, the starting current (LRA) is equal to or less than the nominal current (FLA).

### 4.3 Connection in terminal box

#### 4.3.1 Preparing cables for connection

Only strip the cable as far as necessary, ensuring that the cable gland is sealed and there is no strain on the connections. For tightening torques, see Chapter 3.1 Product drawing.



#### NOTE

Tightness and strain relief are dependent on the cable used.

→ This must be checked by the user.

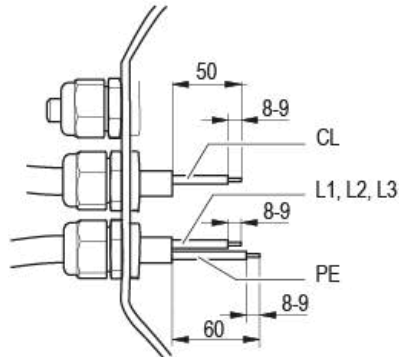


Fig. 3: Recommended stripped lengths in mm (inside terminal box)

Legend: CL = control lines

#### 4.3.2 Connecting wires to terminals



#### WARNING

Live terminals and connections even with device switched off

Electric shock

→ Wait five minutes after disconnecting the voltage at all poles before opening the device.

- ⇒ Remove the cap from the cable gland.
  - ⇒ Only remove caps where cables are fed in.
  - ⇒ Route the wire(s) (not included in scope of delivery) into the terminal box.
  - ⇒ First connect the "PE" (protective earth).
  - ⇒ Connect the wires to the corresponding terminals.
- Use a screwdriver to do so.  
When connecting, ensure that no wire ends fan out.

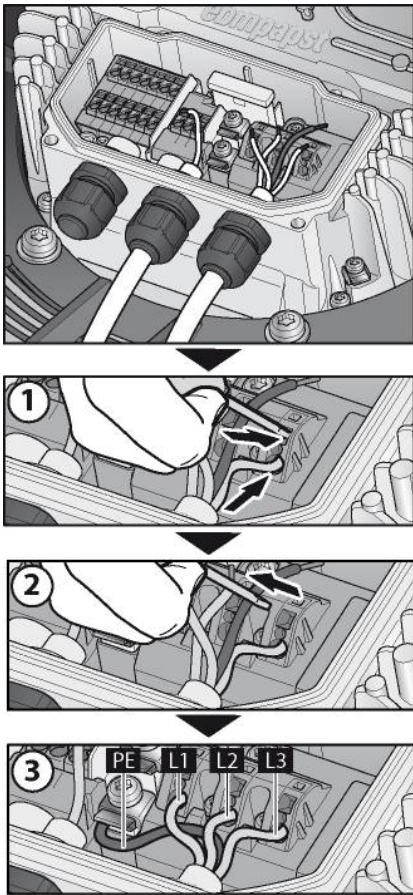


Fig. 4: Connecting wires to terminals

⇒ Seal the terminal box.

#### 4.3.3 Cable routing

Water must be prevented from reaching the cable gland along the cable.



#### NOTE

##### Damage caused by moisture penetration.

Moisture can penetrate into the terminal box if water is constantly present at the cable glands.

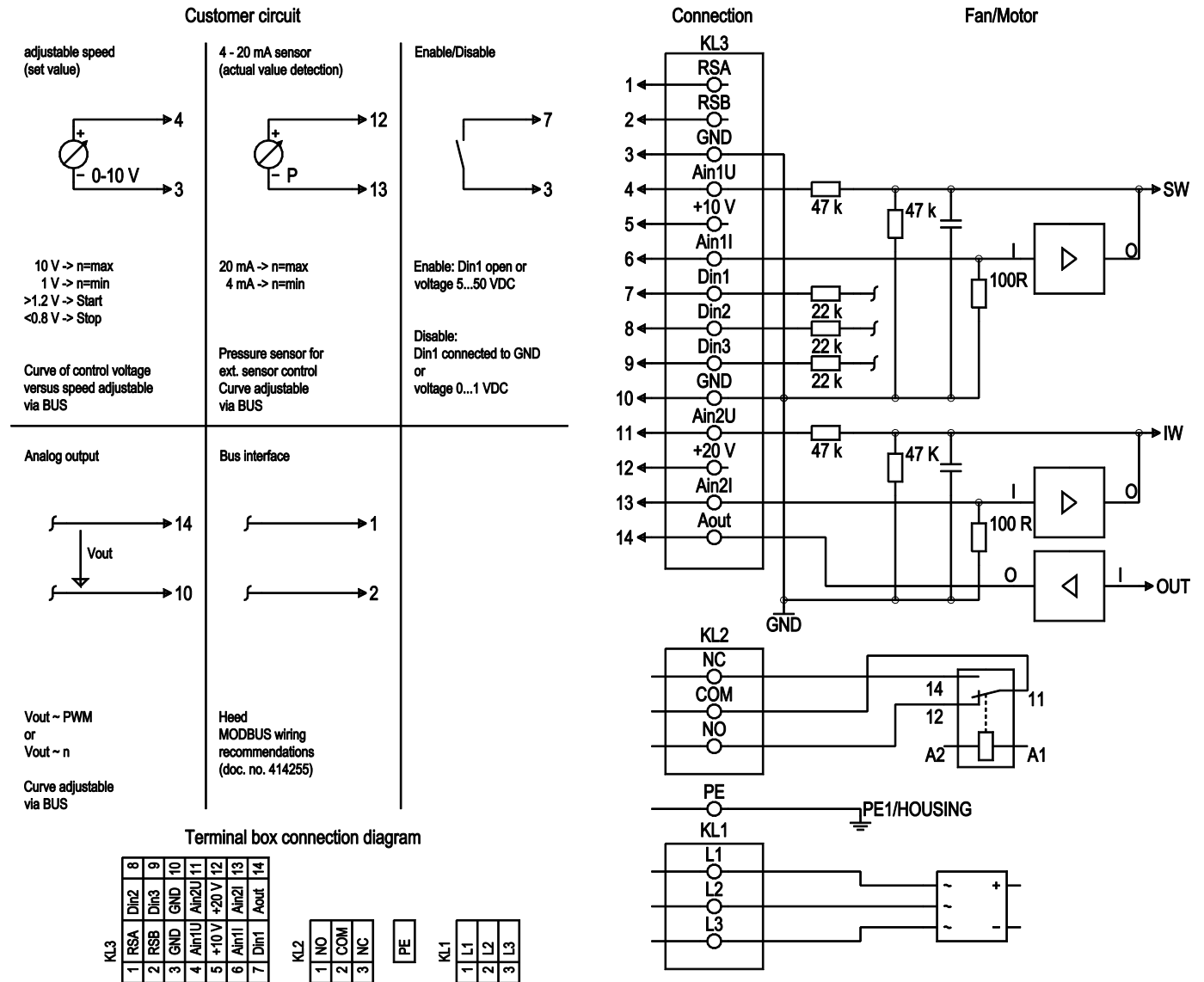
- To prevent the constant accumulation of water at the cable glands, the cable should be routed in a U-shaped loop wherever possible.
- If this is not possible, a drip edge can be produced by fitting a cable tie directly in front of the cable gland for example.

#### 4.4 Factory settings

Factory settings made for the device by ebm-papst.

Mode parameter set 1	PWM control
Mode parameter set 2	PWM control
Fan/device address	01
Max. PWM / %	100
Min. PWM / %	5
Save set value to EEPROM	Yes
Set value requirement	Analog (linear)
Direction of action parameter set 1	Positive (heating)
Direction of action parameter set 2	Positive (heating)

## 4.5 Connection diagram



Drawing preliminary!

No.	Conn.	Designation	Function/assignment
KL 1	1	L1	Supply connection, power supply; for nominal voltage range see technical data
KL 1	2	L2	Supply connection, power supply; for nominal voltage range see technical data
KL 1	3	L3	Supply connection, power supply; for nominal voltage range see technical data
PE		PE	Ground connection, PE connection
KL 2	1	NO	Status relay, floating status contact, make for failure
KL 2	2	COM	Status relay, floating status contact, changeover contact, common connection, contact rating 250 VAC/max. 2 A (AC1)/min. 10 mA
KL 2	3	NC	Status relay, floating status contact, break for failure
KL 3	1	RSA	Bus connection RS485, RSA, MODBUS-RTU; SELV
KL 3	2	RSB	Bus connection RS485, RSB, MODBUS-RTU; SELV
KL 3	3 / 10	GND	Reference ground for control interface; SELV
KL 3	4	Ain1 U	Analog input 1, set value: 0-10 V, Ri = 100 kΩ, adjustable curve, only usable as alternative to input Ain1 I; SELV
KL 3	5	+ 10 V	Fixed voltage output 10 VDC, + 10 V +/-3%, max. 10 mA, short-circuit-proof, power supply for ext. devices (e.g. potentiometers); SELV



No.	Conn.	Designation	Function/assignment
KL 3	6	Ain1 I	Analog input 1, set value: 4-20 mA, $R_i = 100 \Omega$ , adjustable curve, only usable as alternative to input Ain1 U; SELV
KL 3	7	Din1	Digital input 1: enable electronics, enable: pin open or applied voltage 5-50 VDC disable: bridge to GND or applied voltage < 1 VDC reset function: triggers software reset after a level change to < 1 VDC; SELV
KL 3	8	Din2	Digital input 2: Switching parameter sets 1/2, according to EEPROM setting, the valid or used parameter set can be selected via bus or via digital input DIN2. Parameter set 1: pin open or applied voltage 5-50 VDC Parameter set 2: bridge to GND or applied voltage < 1 VDC; SELV
KL 3	9	Din3	Digital input 3: according to EEPROM setting, the integrated controller's direction of action can be selected via bus or digital input Din3; normal: pin open or applied voltage 5-50 VDC inverse: bridge to GND or applied voltage < 1 VDC; SELV
KL 3	11	Ain2 U	Analog input 2, measured value: 0-10 V, $R_i = 100 \text{ k}\Omega$ , adjustable curve, only usable as alternative to input Ain2 I; SELV
KL 3	12	+ 20 V	Fixed voltage output 20 VDC, + 20 V +25/-10%, max. 50 mA, short-circuit-proof, power supply for ext. devices (e.g. sensors); SELV Alternatively: +24 VDC input for parameterization without line voltage
KL 3	13	Ain2 I	Analog input 2, measured value: 4-20 mA, $R_i = 100 \Omega$ , adjustable curve, only usable as alternative to input Ain2 U; SELV
KL 3	14	Aout	Analog output 0-10 VDC, max. 5 mA, output of current motor modulation level / motor speed adjustable curve; SELV

#### 4.6 Checking connections

- ⇒ Ensure isolation from supply (all phases).
- ⇒ Make sure a restart is impossible
- ⇒ Check the cables for proper fit.
- ⇒ Screw the terminal box cover back on again. Terminal box tightening torque, see Chapter 3.1 Product drawing.
- ⇒ Route the cables in the terminal box so that the terminal box cover closes without resistance.
- ⇒ Use all screw plugs. Insert the screws by hand to avoid damage to the threads.
- ⇒ Make sure the terminal box is completely closed and sealed and that all screws and cable glands have been properly tightened.

#### 4.7 Switching on the device

The device may only be switched on if it has been installed properly and in accordance with its intended use, including the required safety mechanisms and professional electrical hookup. This also applies for devices which have already been equipped with plugs and terminals or similar connectors by the customer.



#### WARNING

##### Hot motor housing

Risk of fire

- Ensure that no combustible or flammable materials are located close to the fan.
- ⇒ Before switching on, check the device for visible external damage and make sure the protective devices are functional.
- ⇒ Check the fan's air flow paths for foreign matter and remove any foreign matter found.
- ⇒ Apply the nominal supply voltage.
- ⇒ Start the device by changing the input signal.



#### NOTE

##### Damage to the device from vibration

Bearing damage, shorter service life

- Low-vibration operation of the fan must be ensured over the entire speed control range.
- Severe vibration can arise for instance from inexpert handling, transportation damage and resultant imbalance or be caused by component or structural resonance.
- Speed ranges with excessively high vibration levels and possibly resonant frequencies must be determined in the course of fan commissioning.
- Either run through the resonant range as quickly as possible with speed control or find another remedy.
- Operation with excessively high vibration levels can lead to premature failure.
- The maximum permissible vibration severity must not exceed 3.5 mm/s and should be checked at intervals of 6 months. #It is to be determined at the motor mount at the motor support plate at least in axial direction and transversely to this. #Measurement of the vibration in all three axes is recommended and should be performed over the entire speed range in order to obtain a complete picture of the vibrations occurring in the application, see Chapter 6. Maintenance, malfunctions, possible causes and remedies.

#### 4.8 Switching off the device

Switching off the device during operation:

- ⇒ Switch off the device via the control input.
- ⇒ Do not switch the motor (e.g. in cyclic operation) on and off via power supply.

Switching off the device for maintenance:

- ⇒ Switch off the device via the control input.
- ⇒ Do not switch the motor (e.g. in cyclic operation) on and off via power supply.
- ⇒ Disconnect the device from the power supply.
- ⇒ When disconnecting, be sure to disconnect the ground connection last.

### 5. INTEGRATED PROTECTIVE FEATURES

The integrated protective functions cause the motor to switch off automatically in the event of the faults described in the table.

Fault	Safety feature description/function
Rotor position detection error	An automatic restart follows.
Blocked rotor	⇒ After the blockage is removed, the motor restarts automatically.
Line undervoltage (line voltage outside of permitted nominal voltage range)	⇒ If the line voltage returns to permitted values, the motor restarts automatically.
Phase failure	A phase of the supply voltage fails for at least 5 s. ⇒ When all phases are correctly supplied again, the motor automatically restarts after 10-40 s.

## 6. MAINTENANCE, MALFUNCTIONS, POSSIBLE CAUSES AND REMEDIES

Do not perform any repairs on your device. Send the device to ebmpapst for repair or replacement.



### WARNING

**Live terminals and connections even with device switched off**

Electric shock

→ Wait five minutes after disconnecting the voltage at all poles before opening the device.

### CAUTION

**If control voltage or a stored speed set value is applied, the motor will restart automatically, e.g. after a power failure.**

Risk of injury

→ Keep out of the device's danger zone.  
 → When working on the device, switch off the line voltage and ensure that it cannot be switched back on.  
 → Wait until the device comes to a stop.  
 → After working on the device, remove any tools or other objects from the device.



### NOTE

If the device is not operated for a lengthy period in installed condition in a dry environment, it is to be started up and operated at full speed for one hour at least every four months. If the device is not operated for a lengthy period in installed condition in a damp environment (e.g. outdoors), it is to be started up and operated at full speed for at least four hours once a month to move the bearings and allow any condensate that may have ingressed to evaporate.

Malfunction/fault	Possible cause	Possible remedy
Impeller not running smoothly	Imbalance in rotating parts	Clean the device; replace it if imbalance persists after cleaning. Make sure no weight clips are removed during cleaning.
Motor not turning	Mechanical blockage	Switch off, isolate from supply and remove mechanical blockage.
	Line voltage faulty	Check line voltage, restore power supply. Attention! The error message resets automatically. Device restarts automatically without warning.
	Faulty connection	Isolate from supply, correct connection; see connection diagram.
	Broken motor winding	Replace device

	Deficient cooling	Improve cooling. Let the device cool down. To reset the error message, switch off the line voltage for at least 25 s and then switch it on again. Alternatively, reset the error message by applying a control signal of < 0.5 V to Din1 or by shorting Din1 to GND.
	Ambient temperature too high	Reduce the ambient temperature. Let the device cool down. To reset the error message, switch off the line voltage for at least 25 s and then switch it on again. Alternatively, reset the error message by applying a control signal of < 0.5 V to Din1 or by shorting Din1 to GND.
	Impermissible point of operation (e.g. back pressure too high)	Correct the operating point. Let the device cool down. To reset the error message, switch off the line voltage for at least 25 s and then switch it on again. Alternatively, reset the error message by applying a control signal of < 0.5 V to Din1 or by shorting Din1 to GND.



In the event of further malfunctions, contact ebmpapst.

### 6.1 Vibration testing

Checking of fan for mechanical vibration based on ISO 14694.  
 Recommendation: Every 6 months. Max. vibration severity is 3.5 mm/s, measured at the motor fastening diameter on the motor support plate in the direction of the motor axis of rotation and perpendicular to this.

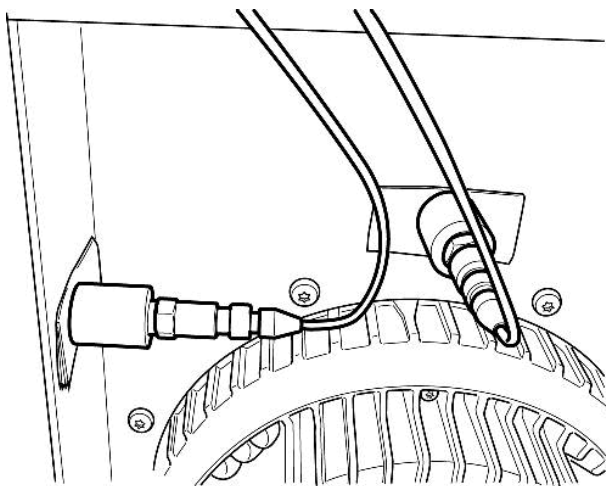


Fig. 5: Example illustrating vibration measurement. The arrangement of the sensors depends on the device concerned and the installation situation.

## 6.2 Cleaning

To ensure a long service life, check the fans regularly for proper operation and soiling. The frequency of checking is to be adapted accordingly depending on the degree of soiling.



### DANGER

#### Risk of injury from rotating fan.

→ Only clean when not in motion. Do not disconnect the fan from the power supply, just switch it off via the control input. This will prevent start-up of the fan.

- ⇒ Dirt deposits on the motor housing can cause overheating of the motor.
- ⇒ Soiling of the impeller can cause vibration that will shorten the service life of the fan.
- ⇒ Severe vibration can destroy the fan.
- ⇒ In such cases, switch off the fan immediately and clean it.
- ⇒ The preferred method of cleaning is dry cleaning, e.g. using compressed air.
- ⇒ Do not use aggressive cleaning agents!

### NOTE

#### Damage to the device during cleaning

Malfunction possible

- Do not clean the device using a high-pressure cleaner. # Do not use acid, alkali or solvent-based cleaning agents.
- Do not use any pointed or sharp-edged objects for cleaning.

- ⇒ Completely remove any cleaning agents used.
- ⇒ If severe corrosion is visible on load-bearing or rotating parts, switch off the device immediately and replace it.
- ⇒ Repair of load-bearing or rotating parts is not permitted!
- ⇒ Operate the fan for 2 hours at maximum speed so that any water that has ingressed can evaporate.
- ⇒ If cleaning does not eliminate vibrations, the fan may need to be rebalanced. To have it rebalanced, contact ebmpapst.
- ⇒ The fan is equipped with maintenance-free ball bearings. The lifetime lubrication of the ball bearings is designed for a service life of 40,000 hours.

- ⇒ If bearing replacement is necessary after that period, contact ebmpapst.
- ⇒ Adapt the maintenance intervals to the actual level of dust exposure.

## 6.3 Safety inspection

### NOTE

#### High-voltage test

The integrated EMC filter has Y capacitors. The tripping current is exceeded when AC testing voltage is applied.

- Test the device with DC voltage when you perform the legally required high-voltage test. The voltage to be used corresponds to the peak value of the AC voltage required by the standard.

What to check	How to check	How often	What action?
Contact protection cover for intactness or damage	Visual inspection	At least every 6 months	Repair or replacement of device
Device for damage to blades and housing	Visual inspection	At least every 6 months	Replacement of device
Fastening the cables	Visual inspection	At least every 6 months	Fasten
Insulation of cables for damage	Visual inspection	At least every 6 months	Replace cables
Impeller for wear/deposits/corrosion and damage	Visual inspection	At least every 6 months	Clean impeller or replace device
Tightness of cable gland	Visual inspection	At least every 6 months	Retighten, replace if damaged
Condensation drainage holes for clogging, where necessary	Visual inspection	At least every 6 months	Open holes
Abnormal bearing noise	acoustic	At least every 6 months	Replace device
Vibration test	Vibration tester, start-up or deceleration measurement	Recommended every 6 months	Clean impeller or replace device

## 6.4 Disposal

For ebmpapst, environmental protection and resource preservation are top priority corporate goals.

ebmpapst operates an environmental management system which is certified in accordance with ISO 14001 and rigorously implemented around the world on the basis of German standards.

Right from the development stage, ecological design, technical safety and health protection are fixed criteria.

The following section contains recommendations for ecological disposal of the product and its components.

#### 6.4.1 Country-specific legal requirements



##### NOTE

##### Country-specific legal requirements

Always observe the applicable country-specific legal regulations with regard to the disposal of products or waste occurring in the various phases of the life cycle. The corresponding disposal standards are also to be heeded.

#### 6.4.2 Disassembly

Disassembly of the product must be performed or supervised by qualified personnel with the appropriate technical knowledge. The product is to be disassembled into suitable components for disposal employing standard procedures for motors.



##### WARNING

**Heavy parts of the product may drop off. Some of the product components are heavy. These components could drop off during disassembly.**

This can result in fatal or serious injury and material damage.

→ Secure components before unfastening to stop them falling.

#### 6.4.3 Component disposal

The products are mostly made of steel, copper, aluminum and plastic. Metallic materials are generally considered to be fully recyclable. Separate the components for recycling into the following categories:

- Steel and iron
- Aluminum
- Non-ferrous metal, e.g. motor windings
- Plastics, particularly with brominated flame retardants, in accordance with marking
- Insulating materials
- Cables and wires
- Electronic scrap, e.g. circuit boards

Only ferrite magnets and not rare earth magnets are used in external rotor motors from ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG.

⇒ Ferrite magnets can be disposed of in the same way as normal iron and steel.

Electrical insulating materials on the product, in cables and wires are made of similar materials and are therefore to be treated in the same manner.

The materials concerned are as follows:

- Miscellaneous insulators used in the terminal box
- Power cables
- Cables for internal wiring
- Electrolytic capacitors

Dispose of electronic components employing the proper procedures for electronic scrap.



→ Please contact ebm-papst for any other questions on disposal.