

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE SUBENFRIAMIENTO EN UN CICLO SIMPLE DE COMPRESIÓN DE VAPOR USANDO R744 TRANSCRÍTICO

Francisco Vidan-Falomir, Alejandro Andreu Nácher, Ramón Cabello, Rafael Larrondo-Sancho, Rodrigo Llopis y Daniel Sánchez

Grupo de ingeniería térmica, Departamento de mecánica y construcción, Universitat Jaume I, Castelló. Avd. Vicent Sos Baynat, s/n 12071 Castelló de la Plana, España

Francisco Vidan-Falomir
vidan@uji.es

.....

Resumen: En este trabajo se analiza experimentalmente un sistema de subenfriamiento en un ciclo simple de compresión de vapor que utiliza CO₂ como refrigerante. Este sistema consiste en la extracción de líquido saturado del depósito intermedio de refrigerante. El líquido extraído se expande hasta la presión de evaporación y se hace pasar por un intercambiador (subcooler), donde subenfria el caudal de refrigerante que sale del gas-cooler, posteriormente el caudal extraído se mezcla con la corriente proveniente del evaporador. La mezcla resultante es recomprimida hasta la presión de gas-cooler. Se ha buscado el óptimo de la configuración base y de la configuración con subenfriamiento a tres niveles de temperatura de foco caliente de 28, 31 y 34 °C. Posteriormente se han comprobado los resultados de los principales parámetros energético.

Palabras clave: CO₂, subcooler, COP, IHX

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la normativa reguladora de los refrigerantes en la refrigeración está marcada por el protocolo de Montreal [1] y el reglamento europeo F-Gas [2]. Este estudio se centra en el R744. El R744 es un refrigerante de primera generación de origen natural que no es ni inflamable ni explosivo. Tiene una presión crítica entorno a los 73 bar y temperatura crítica entorno a los 31 °C, Estas características condiciona que, en climas fríos, con temperaturas ambiente menores de 25 °C, el R744 puede trabajar en condensación y por consiguiente el ciclo trabaja en condiciones subcríticas con mejores prestaciones que en climas cálidos con temperaturas ambiente mayor a 25 °C dónde el refrigerante trabaja en estado transcrito y sus prestaciones bajan. Para mejorar las prestaciones en instalaciones transcricas de R744 hay distintos sistemas, uno de ellos es el subenfriamiento a la salida del gas-cooler [3]. La opción que se ha decidido analizar experimentalmente en este estudio es el subenfriamiento mediante la extracción de líquido saturado en el depósito, expandido y intercambiado con la salida del gascooler, finalmente se integra con la salida del evaporador para ambos que caudales ser recomprimidos por el mismo compresor alternativo.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

2.1. Descripción de la instalación

La instalación experimental empleada en este trabajo está esquematizada en la figura 1

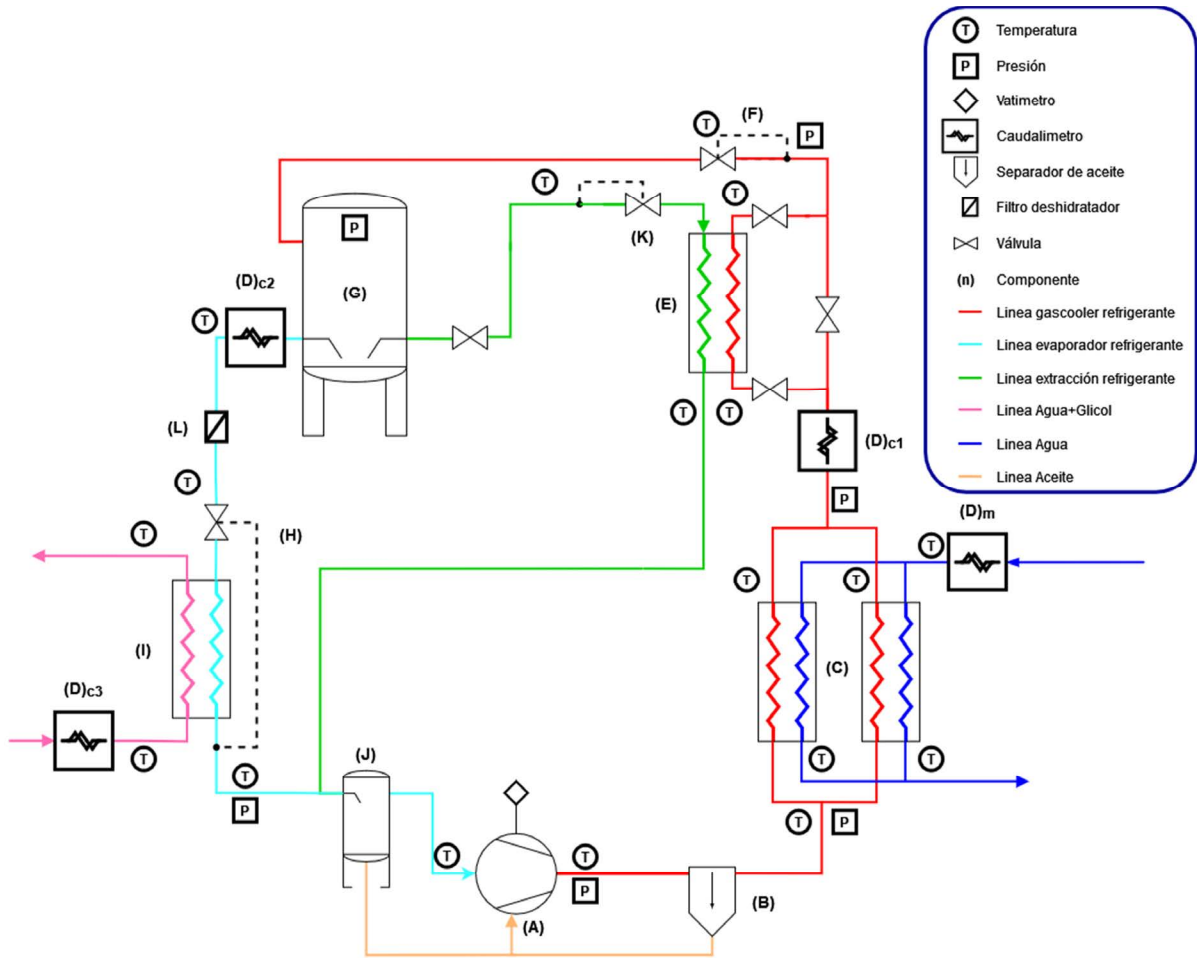


Figura 1. Instalación experimental.

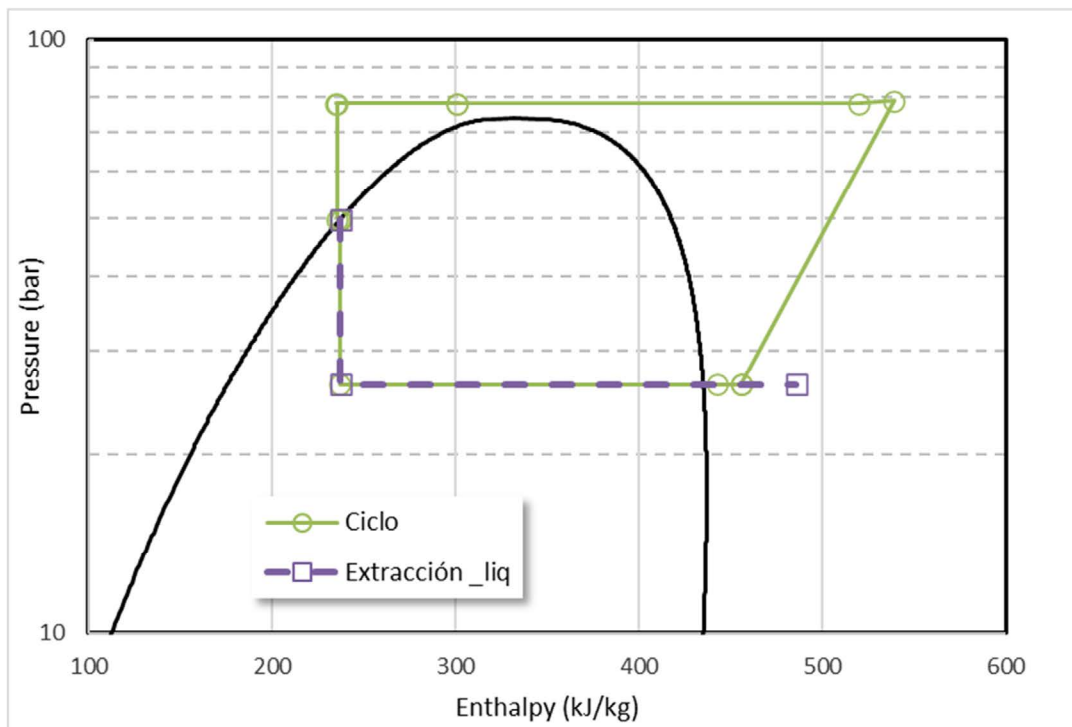


Figura 2. Diagrama p-h del ciclo con extracción de vapor

Los principales componentes que pueden distinguirse son: (A) compresor semihermético Dorin CD300H con cilindrada 1,46 m³/h a 1450 rpm, (B) un separador de aceite coalescente (C) dos intercambiadores de placas dispuestos en paralelo que operan como gas-cooler/condensador, con una superficie de intercambio total de 1.2 m², (E) intercambiador de subenfriamiento, "Subcooler", de tipo placas con un área de intercambio térmico de 0.0113 m², (F) válvula de regulación electrónica actuando como "back-pressure" para mantener la presión en la zona de gas-cooler, (G) depósito intermedio de 0.015 m³ de capacidad, con dos salidas de líquido, una hacia evaporador y otra hacia "subcooler", (L) filtro deshidratador, (H) válvula de regulación electrónica actuando como válvula de expansión termostática, (I) evaporador de placas con una superficie de intercambio de 0.48 m², (J) depósito antilíquido de 0.005 m³ de capacidad, que recoge la salida del evaporador y del "subcooler" y de donde aspira el compresor, (K) válvula de expansión configurada como "back-pressure" para regular la presión en depósito intermedio y en consecuencia, el caudal de refrigerante que actúa como fluido frío en el "subcooler".

La ubicación de los sensores de medida empleados en esta instalación para monitorizar las variables necesarias en este trabajo se muestra en la Figura 1. En la tabla 1 están recogidas las principales características de los mismos.

Tabla 1. Características y accuracy de los sistemas de medición

Número	Variable	Tipo	Rango de medición	Exactitud
18	Temperatura	Termopar tipo T	-40 to 125 °C	± 0.5 °C
1	Presión	Transductor de presión	0 to 60 bar	± 0.15 bar
1	Presión	Transductor de presión	0 to 100 bar	± 0.25 bar
4	Presión	Transductor de presión	0 to 160 bar	± 0.4 bar
3	Caudal másico	Caudalímetro tipo Coriolis	0 to 1.55 kg·s ⁻¹	± 0.11 %
1	Caudal volumétrico	Caudalímetro tipo Magnético	0 to 2.5 m ³ ·h ⁻¹	± 0.25 %
1	Potencia eléctrica	Analizador de redes	0 to 3,000 W	± 0.5 %

Las tuberías tienen un diámetro de 3/8" en la descarga del compresor, y 1/2" en el resto de la instalación.

Todos los intercambiadores, depósitos, válvulas y tuberías están aislados con coquilla de conductividad térmica 0.034 W·m⁻¹·K⁻¹ y espesor mínimo de 12 mm.

El muestreo y acondicionamientos de las señales eléctricas de los elementos de medida se realizan con un sistema de adquisición de National Instruments, modelo cRIO-9074. La gestión y control se realiza mediante un software Labview® 2012. Las propiedades termodinámicas de los refrigerantes y el agua han sido calculados mediante el software Refprop v.10 [4] con los datos obtenidos del sistema de adquisición, las propiedades de la mezcla de agua y glicol han sido obtenidas mediante el software SecCool v1.33 [5]. Los cálculos para obtener los valores indirectos de las medidas se realizan con el apoyo de Microsoft Excel® 2010, empleando las rutinas de Refprop v.10 para el cálculo de las propiedades termodinámicas del refrigerante.

La instalación frigorífica dispone de dos sistemas de apoyo térmico que actúan como foco frío y caliente. Los sistemas trabajan con su propio circuito cerrado cada una, fijando las temperaturas y caudales de envío al evaporador y al gas-cooler/condensador. El conexionado de este sistema con la máquina se realiza mediante tuberías flexibles de pvc aisladas térmicamente.

El sistema que actúa como foco frío opera con una mezcla de agua - propilenglicol al 57% en volumen, mientras que el que actúa como foco caliente utiliza agua como fluido de trabajo. Ambos sistemas tienen controladores PID para conseguir las temperaturas de consigna y variadores de frecuencia para regular el caudal trasegado por las bombas de recirculación.

2.2. Proceso experimental

Se han realizado dos campañas de ensayos, una con la instalación sin sistema de subenfriamiento, configuración BASE, y otra con el sistema de subenfriamiento mediante la extracción de líquido del depósito intermedio, configuración EXTLIQ

Todos los ensayos realizados con ambas configuraciones mantienen fijas unos valores comunes en determinados parámetros. Los parámetros fijados son: la frecuencia de giro del compresor (1450 rpm); la temperatura y caudal de envío del foco frío, que se han mantenido entorno a los -1.55°C y 650 kg/h, respectivamente; el recalentamiento útil del evaporador, fijado mediante la válvula termostática a un valor de 6.5K; y el caudal de envío del foco caliente, que se ha fijado a un valor de $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ambas configuraciones se han ensayado con tres temperaturas de foco caliente, 28, 31 y 34°C . Con estas tres temperaturas, la instalación ha operado en condiciones transcíticas en todo momento.

En la configuración BASE se ha modificado la presión de gas-cooler, de forma que se ha buscado el valor de presión con el que se consigue el máximo COP en cada caso, es decir, la presión óptima.

En la configuración EXTLIQ, para cada temperatura de foco caliente, se han probado diferentes presiones en el depósito intermedio (35, 40, 50 y 60 bar), y con cada presión de depósito se ha realizado un barrido con la presión de gas-cooler, para comprobar si se sigue manteniendo el valor óptimo de presión.

Los valores mantenidos en los ensayos, junto con las desviaciones estándar obtenidas, se muestran en las tablas 2 y 3.

2.3. Cálculos

Como se ha comentado anteriormente, usando el software Microsoft Excel 2010 y las rutinas Refprop v.10 se han obtenido las propiedades en cada uno de los puntos de interés. Aparte de estas propiedades se han obtenido las potencias de los fluidos secundarios según las fórmulas (1) y (2), las potencias del refrigerante en el intercambiador según la fórmula (3) y el COP según la fórmula (4)

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{0,glyc} = \dot{m}_{glyc} \cdot c_{p,glyc} \cdot (T_{glyc,in} - T_{glyc,out}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (3)$$

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{P_{Comp}} \quad (4)$$

Siendo Q la potencia frigorífica (W), m el caudal (kg/s), c_p el calor específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T la temperatura (K), h la entalpía ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) y P_{Comp} la potencia consumida en el compresor (W).

2.4. Validación de datos

La validación de resultados se realiza en el evaporador y en el condensador, comparando las potencias intercambiadas calculadas por el lado del refrigerante y por el lado del fluido secundario. Los errores entre ambos cálculos están mayoritariamente dentro de una discrepancia del 5 %, y algunos de ellos entre el 5 y el 10 %. Con estas discrepancias, queda demostrada la bondad de las medidas realizadas.

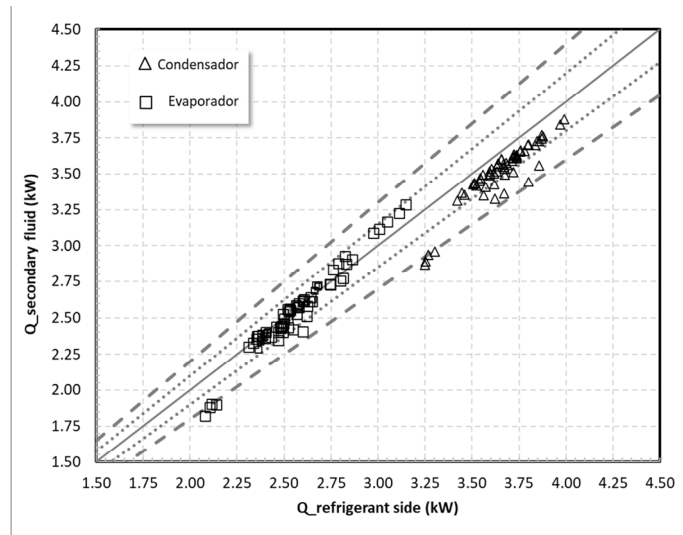


Figura 3. Validación datos.

3. ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Puesto que se han realizado dos campañas de ensayos, esta sección se ha dividido en dos partes. En los ensayos de la primera campaña se ha trabajado con el ciclo BASE, mientras que en la segunda campaña, se han trabajado con la configuración EXTLIQ

Tanto en los ensayos de ciclo BASE, como en los de EXTLIQ, se ha trabajado con tres niveles de temperatura de foco caliente (28 °C, 31 °C y 34 °C), lo que ha permitido operar siempre en condiciones supercríticas en la zona de alta presión.

3.1. Ciclo base

En los ensayos realizados con la configuración BASE se pretende buscar la presión de gas-cooler a la que se consigue el mayor COP (presión óptima).

Cómo se puede observar en la Figura 4, en cada una de las temperaturas de foco caliente se ha ido modificando, mediante la válvula "back-pressure", la presión de la zona de alta temperatura para encontrar la presión óptima de "gas cooler", es decir, la presión con la que se obtiene el mayor COP a una temperatura de foco caliente determinada. En total se han realizado 25 ensayos en esta fase.

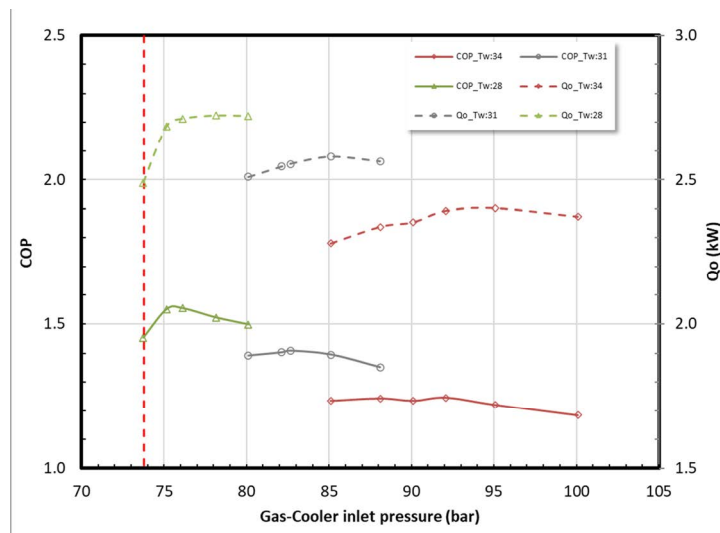


Figura 4. Ciclo base.

Los resultados obtenidos muestran que a 28 °C se obtiene un COP de 1.51 a 76.0 bar, para una temperatura de 31 °C se obtiene un COP de 1.41 a 82.5 bar y un COP de 1.25 a 92 bar para 34 °C de foco caliente.

También se observa, que la potencia frigorífica obtenida con la presión óptima, no es la mayor posible. De forma que queda patente que existe una presión óptima que maximiza el COP, y una segunda presión óptima con la que la potencia frigorífica obtenida es máxima. Las presiones óptimas referidas a la potencia frigorífica son: 78 bar, 85 bar y 95 bar a 28, 31 y 34 °C, respectivamente. Dichas presiones son siempre superiores a la óptima, si bien la diferencia entre la potencia frigorífica operando a cualquiera de las dos presiones óptimas, es inferior al 1 %.

3.2. Extracción de líquido

En la siguiente tabla se puede observar los resultados de las principales variables medidas en el ciclo termodinámico. En rojo aparecen las correspondientes al nivel de presión óptima de gas-cooler en el ciclo BASE de referencia.

Tabla 2. Resultados ensayos extracción de líquido y ensayos base a presión óptima de gas-cooler.

T water gc,in(°C)	P depósito (bar)	P gc (bar)	Po (bar)	T descarga (°C)	T gc,out (°C)	T aspiración (°C)	T valv. exp,in (°C)	x_v	\dot{m}_{gc} (kg/s)	\dot{m}_{evap} (kg/s)	Tasa Compressor -	Tasa back pressure -	Tasavalv. Exp. -
28 °C	66.80	76.15	25.66	108.03	28.40	-4.77	26.24	0.45	0.0164	=	3.00	1.14	2.60
	59.96	80.15	24.76	116.82	28.38	-3.14	21.64	0.34	0.0148	0.0130	3.26	1.33	2.42
	59.97	77.16	24.81	114.18	28.51	-2.72	21.64	0.34	0.0152	0.0131	3.14	1.28	2.42
	59.92	75.15	24.87	111.90	28.56	-2.25	21.61	0.34	0.0155	0.0131	3.05	1.25	2.41
	58.68	73.10	25.80	109.63	29.99	2.81	20.71	0.32	0.0163	0.0120	2.86	1.24	2.27
	50.10	77.13	25.23	114.72	28.44	0.55	14.16	0.25	0.0154	0.0119	3.09	1.54	1.99
	49.90	75.16	25.32	112.65	28.57	1.14	13.98	0.24	0.0157	0.0119	3.00	1.50	1.97
	50.74	73.20	26.26	108.78	30.08	5.27	14.67	0.24	0.0167	0.0114	2.82	1.44	1.93
	50.34	71.15	28.58	104.47	28.94	13.05	14.34	0.22	0.0187	0.0085	2.52	1.41	1.76
	39.88	77.13	25.88	113.08	28.33	3.28	5.13	0.15	0.0161	0.0113	3.01	1.93	1.54
	39.72	75.14	26.05	110.90	28.50	3.90	4.96	0.14	0.0163	0.0113	2.91	1.89	1.53
	39.54	73.08	27.10	108.27	30.02	8.56	4.80	0.13	0.0172	0.0101	2.73	1.84	1.46
	40.29	71.03	28.85	103.74	28.88	13.93	5.53	0.12	0.0189	0.0074	2.49	1.76	1.40
	34.84	77.14	26.51	112.79	28.51	5.05	-0.02	0.09	0.0166	0.0110	2.94	2.21	1.31
	35.02	75.16	26.55	110.88	28.74	5.34	0.17	0.09	0.0168	0.0109	2.86	2.14	1.32
	34.90	73.18	27.30	108.25	30.06	8.85	0.05	0.08	0.0175	0.0099	2.71	2.09	1.28
37.32	71.25	28.89	104.53	29.02	13.57	2.54	0.09	0.0189	0.0073	2.49	1.91	1.29	
31 °C	69.30	82.65	26.32	113.69	31.48	-4.00	27.88	0.37	0.0164	=	3.17	1.19	2.63
	60.73	78.14	26.46	112.14	32.28	2.87	22.49	0.34	0.0167	0.0127	2.98	1.28	2.29
	60.18	80.11	26.30	114.41	31.69	0.83	22.10	0.34	0.0163	0.0133	3.07	1.33	2.29
	59.90	82.74	26.27	116.76	31.40	-0.01	21.63	0.33	0.0161	0.0135	3.17	1.38	2.28
	59.93	85.18	26.38	118.92	31.51	-0.24	21.64	0.33	0.0160	0.0136	3.26	1.42	2.27
	49.88	78.20	26.23	114.25	31.93	4.97	14.05	0.24	0.0163	0.0113	3.01	1.57	1.90
	50.14	80.09	26.02	115.91	31.69	3.47	14.24	0.24	0.0160	0.0116	3.10	1.60	1.93
	49.99	82.63	26.24	118.38	31.33	2.85	14.11	0.24	0.0159	0.0119	3.17	1.65	1.91
	50.05	85.14	25.93	122.34	31.53	2.27	14.16	0.24	0.0155	0.0117	3.31	1.70	1.93
	39.98	78.14	27.04	114.18	32.32	8.51	5.24	0.14	0.0168	0.0102	2.92	1.95	1.48
	40.22	80.02	26.57	115.57	31.80	6.45	5.52	0.14	0.0163	0.0108	3.04	1.99	1.51
	40.00	82.69	26.37	118.44	31.41	4.99	5.30	0.14	0.0160	0.0109	3.16	2.06	1.52
	40.01	85.14	26.24	122.61	31.48	4.82	5.30	0.14	0.0156	0.0107	3.27	2.12	1.52
	34.70	78.21	27.28	114.13	32.26	9.66	-0.18	0.08	0.0169	0.0096	2.89	2.25	1.27
	35.07	80.12	26.98	116.19	31.67	7.42	0.24	0.09	0.0166	0.0103	2.99	2.28	1.30
	35.12	82.65	26.91	118.22	31.53	6.71	0.29	0.09	0.0163	0.0105	3.10	2.35	1.31
34.55	85.13	26.60	122.50	31.38	8.68	-0.34	0.09	0.0159	0.0091	3.23	2.46	1.30	

	70.26	92.09	26.64	122.42	34.48	-3.68	28.57	0.28	0.0159	=	3.48	1.31	2.64
	59.93	80.15	26.12	127.56	34.23	0.56	21.67	0.33	0.0152	0.0125	3.55	1.53	2.29
	59.89	77.16	26.16	125.60	34.24	0.96	21.65	0.33	0.0154	0.0125	3.47	1.50	2.29
	59.91	75.15	26.20	123.32	34.12	1.33	21.67	0.33	0.0156	0.0126	3.39	1.47	2.29
	60.44	73.10	26.51	119.83	34.56	2.95	22.04	0.33	0.0160	0.0123	3.24	1.41	2.28
	60.28	77.13	27.78	114.58	34.54	10.18	21.79	0.32	0.0173	0.0105	2.91	1.33	2.17
	50.16	75.16	26.32	128.73	34.39	3.82	14.42	0.24	0.0153	0.0113	3.52	1.83	1.91
	50.02	73.20	26.16	127.06	34.36	3.99	14.30	0.24	0.0153	0.0112	3.47	1.80	1.91
	49.66	71.15	26.05	125.04	34.25	4.33	13.95	0.24	0.0152	0.0110	3.41	1.77	1.91
34 °C	48.91	77.13	26.11	122.48	34.41	5.25	13.38	0.23	0.0155	0.0109	3.29	1.74	1.87
	49.72	75.14	28.15	114.90	34.51	13.35	14.04	0.22	0.0175	0.0091	2.87	1.61	1.77
	39.94	73.08	26.94	129.41	34.29	6.90	5.24	0.14	0.0156	0.0104	3.44	2.30	1.48
	40.15	71.03	27.00	127.44	34.34	7.36	5.45	0.14	0.0158	0.0104	3.36	2.24	1.49
	40.07	77.14	27.04	125.63	34.29	7.67	5.37	0.14	0.0159	0.0103	3.29	2.20	1.48
	39.94	75.16	27.28	122.56	34.57	9.14	5.21	0.13	0.0163	0.0101	3.15	2.13	1.46
	39.56	73.18	28.49	116.55	34.60	15.06	4.87	0.12	0.0176	0.0081	2.84	2.02	1.39
	35.10	71.25	27.08	129.42	34.38	7.88	0.27	0.09	0.0157	0.0099	3.43	2.62	1.30
	34.89	80.15	27.08	127.55	34.27	8.37	0.04	0.08	0.0158	0.0099	3.35	2.58	1.29
	35.18	77.16	27.16	125.49	34.44	8.66	0.35	0.09	0.0160	0.0099	3.27	2.50	1.30
	34.91	75.15	27.38	120.99	34.49	9.56	0.07	0.08	0.0165	0.0098	3.14	2.43	1.28
	37.32	71.11	28.89	104.53	29.02	14.90	0.54	0.09	0.0189	0.0076	2.49	1.91	1.29

Dentro de cada nivel de temperaturas, se ha realizado un barrido de presiones de depósito (de 60 a 35 bar), de manera que cuanto menor es el nivel de presión en el depósito, mayor es el caudal de refrigerante extraído para realizar la función de subenfriar. Finalmente, y dentro de cada nivel de presión de depósito se ha realizado un barrido de presiones de gas-cooler, para comprobar si el nivel de presión óptima del ciclo base se modifica. En total, se han realizado 52 ensayos en esta fase.

Se puede observar cómo en la configuración EXTLIQ, respecto a la configuración BASE, se provoca un descenso en la presión del depósito por debajo de la presión de saturación. Este descenso provoca que la tasa de expansión en la back-pressure aumente respecto a la del ciclo BASE, mientras que la tasa en la válvula de expansión que alimenta al evaporador, disminuye. El caudal enviado al evaporador es tanto menor cuanto menor es la presión del depósito. El título de vapor a la entrada del evaporador y la temperatura de entrada a la válvula de expansión, también disminuyen de forma importante con el descenso de la presión de depósito. Las temperaturas de aspiración y descarga aumentan, sin embargo, la de aspiración presenta un incremento superior al experimentado por la de descarga.

En las figuras 5, 6 y 7 se representan las evoluciones en la potencia frigorífica y el COP de la instalación para las diferentes temperaturas de foco caliente ensayadas, para las diferentes presiones de depósito y presiones de gas-cooler.

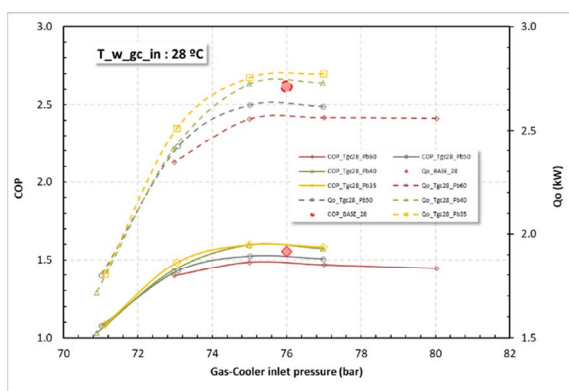


Figura 5. COP y potencia frigorífica a 28 °C

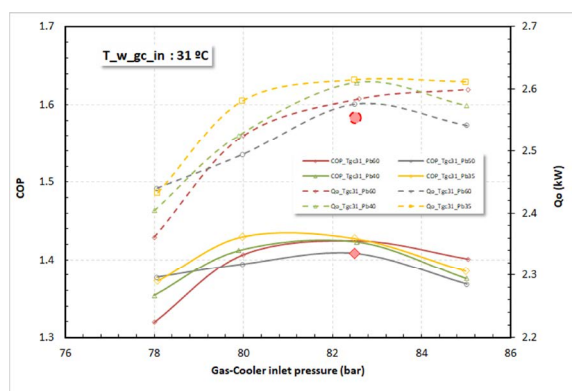


Figura 6. COP y potencia frigorífica a 31 °C

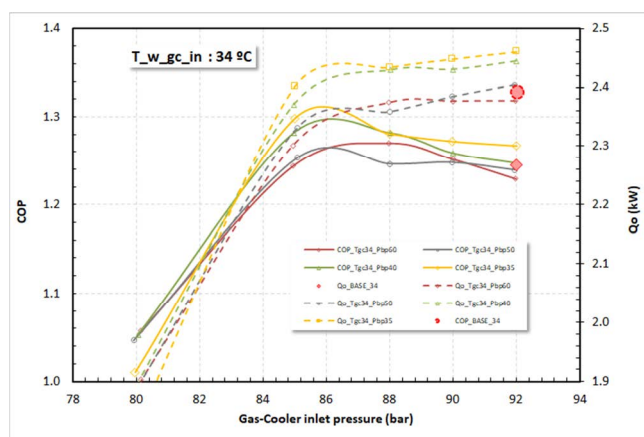


Figura 7. COP y potencia frigorífica a 34 °C

Se observa que el sistema de subenfriamiento de la configuración EXTLIQ genera mejoras en el COP y en la potencia frigorífica respecto a la configuración BASE. Las mejores que se obtienen son mayores cuanto mayor es la temperatura del foco caliente y menor la presión del depósito. Así, para una temperatura de 28 °C del agua de envío al gas-cooler, la máxima mejora en COP es del 2,82 % a 35 bar de presión de depósito y 75 bar de presión de gas-cooler. A 31 °C, el mayor incremento de COP es del 1,52 % a 35 bar de presión de depósito y 80 bar de presión de gas-cooler. Finalmente, a 34 °C, se obtiene una mejora máxima de COP del 4,27 % a 35 bar presión de depósito y 85 bar de presión de gas-cooler.

Otro resultado que podemos extraer, es que la presión óptima que resulta en la configuración EXTLIQ es ligeramente inferior a la obtenida en la configuración BASE con las mismas condiciones de ensayo.

En la tabla 3 se presentan todos los valores de los parámetros energéticos calculados para el ciclo EXTLIQ y para el valor óptimo del ciclo BASE (en rojo).

Tabla 3. Parámetros energéticos

T water gc,in (°C)	p _{dep.} (bar)	p _{gc} (bar)	Q _{enf.} (kW)	P compresor (kW)	Q ₀ (kW)	COP	ΔCOP (%)	ΔQ ₀ (%)
28 °C	66.80	76.15	-	1.75	2.71	1.55	-	-
	59.96	80.03	0.17	1.774	2.559	1.44	-7.19	-5.67
	59.97	77.02	0.25	1.748	2.562	1.47	-5.68	-5.54
	59.92	75.00	0.31	1.722	2.555	1.48	-4.54	-5.81
	58.68	72.98	0.81	1.681	2.346	1.40	-10.24	-13.52
	50.10	76.99	0.66	1.738	2.617	1.51	-3.16	-3.54
	49.90	75.02	0.72	1.723	2.624	1.52	-2.01	-3.27
	50.74	73.09	1.17	1.695	2.421	1.43	-8.13	-10.76
	50.34	71.02	2.36	1.670	1.798	1.08	-30.73	-33.70
	39.88	76.97	1.13	1.738	2.730	1.57	1.09	0.65
	39.72	74.99	1.20	1.707	2.725	1.596	2.67	0.44
	39.54	72.95	1.83	1.684	2.409	1.43	-7.96	-11.19
	40.29	70.89	2.98	1.664	1.716	1.03	-33.68	-36.75
	34.84	76.99	1.44	1.752	2.774	1.58	1.85	2.25
	35.02	75.00	1.51	1.724	2.755	1.598	2.82	1.55
	34.90	73.05	1.99	1.694	2.512	1.48	-4.64	-7.41
37.32	71.11	3.01	1.665	1.804	1.08	-30.30	-33.51	

	69.30	82.5	-	1.81	2.55	1.41	-	-
	60.73	78.00	0.75	1.790	2.361	1.32	-6.32	-7.56
	60.18	80.00	0.50	1.795	2.525	1.41	-0.15	-1.17
	59.90	82.60	0.42	1.815	2.584	1.42	1.10	1.16
	59.93	85.05	0.38	1.856	2.599	1.40	-0.56	1.75
	49.88	78.06	1.09	1.772	2.440	1.38	-2.24	-4.49
	50.14	79.97	0.94	1.789	2.494	1.39	-1.03	-2.36
	49.99	82.49	0.83	1.830	2.576	1.41	-0.03	0.84
31 °C	50.05	85.01	0.76	1.858	2.542	1.37	-2.88	-0.50
	39.98	78.00	1.70	1.776	2.404	1.35	-3.91	-5.90
	40.22	79.90	1.44	1.789	2.525	1.41	0.24	-1.16
	40.00	82.54	1.24	1.834	2.610	1.42	1.05	2.18
	40.01	85.01	1.20	1.871	2.573	1.38	-2.37	0.73
	34.70	78.07	1.96	1.773	2.433	1.37	-2.57	-4.77
	35.07	79.98	1.67	1.805	2.581	1.43	1.52	1.03
	35.12	82.49	1.55	1.831	2.615	1.43	1.37	2.34
	34.55	84.99	1.47	1.885	2.611	1.39	-1.65	2.22
	70.26	92.09	-	1.92	2.39	1.25	-	-
	59.93	91.98	0.46	1.934	2.377	1.23	-1.28	-0.64
	59.89	89.99	0.50	1.899	2.377	1.25	0.52	-0.65
	59.91	87.96	0.55	1.869	2.374	1.27	2.01	-0.76
	60.44	84.94	0.71	1.850	2.301	1.24	-0.11	-3.80
	60.28	80.15	1.51	1.799	1.903	1.06	-15.09	-20.47
	50.16	91.95	0.87	1.940	2.404	1.24	-0.48	0.49
	50.02	89.98	0.91	1.911	2.384	1.25	0.21	-0.34
	49.66	87.99	0.94	1.893	2.359	1.25	0.07	-1.42
	48.91	85.08	1.09	1.860	2.331	1.25	0.64	-2.55
34 °C	49.72	79.92	2.08	1.796	1.879	1.05	-15.97	-21.45
	39.94	91.99	1.34	1.960	2.444	1.25	0.14	2.17
	40.15	90.00	1.40	1.931	2.430	1.26	1.05	1.58
	40.07	88.03	1.45	1.896	2.429	1.28	2.90	1.54
	39.94	84.98	1.63	1.850	2.370	1.28	2.91	-0.91
	39.56	80.06	2.54	1.803	1.898	1.05	-15.47	-20.65
	35.10	92.01	1.56	1.942	2.461	1.27	1.75	2.87
	34.89	89.98	1.63	1.925	2.449	1.27	2.16	2.35
	35.18	87.99	1.69	1.900	2.434	1.28	2.85	1.75
	34.91	85.00	1.86	1.850	2.402	1.30	4.27	0.40
	35.35	79.96	2.83	1.804	1.822	1.01	-18.89	-23.85

4. CONCLUSIONES

Se ha implementado un sistema de subenfriamiento por extracción de líquido del depósito intermedio en un ciclo de compresión simple de vapor que utiliza el CO₂ en régimen supercrítico. El sistema se ha probado con la configuración BASE y con la configuración EXTLIQ para tres temperaturas de foco caliente (28, 31 y 34 °C). Para la configuración BASE se ha buscado la presión de gas-cooler óptima en cada temperatura de foco caliente (T_{FC}). Con la configuración EXTLIQ, para cada T_{FC} se han realizado ensayos con diferentes presiones de depósito intermedio (35, 40, 50 y 60 bar), y por cada presión de depósito se han testado 4/5 presiones de gas-cooler en las proximidades del valor de presión óptima obtenida con la configuración BASE.

De los ensayos realizados se puede deducir que el sistema de subenfriamiento genera mejoras, tanto en COP, como en Q_0 en todo el rango de T_{FC} ensayados. Estas mejoras son muy limitadas a 28 °C y 31 °C, si bien, a temperaturas de 34 °C, con una presión de gas-cooler de 85 bar y una presión de depósito de 35 bar, se genera un 4,27 % de mejora de COP, sin incremento de la Q_0 , lo que supone que es debido a una reducción en el consumo del compresor. Esto implica, además, que la presión óptima de gas-cooler con la configuración EXTLIQ es 7 bar inferior a la óptima con la configuración BASE. También se puede obtener una mejora del 2,87 % en la potencia frigorífica, a una T_{FC} de 34 °C, con 35 bar de presión de depósito y 92 bar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología del gobierno español por la financiación de este trabajo a través del proyecto RTI2018-093501-B-C21 a la beca PRE2019-091617 asociada a dicho proyecto, y al proyecto de la Universidad Jaume I por su proyecto UJI-B2019-56.

REFERENCIAS

- [1] UNEP, 2016. 38th Meeting of the Open-ended Working Group (OEWG 38) of the Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer and 28th Meeting of the Parties to the Montreal Protocol (MOP 28), Kigali 8, 10-14 October 2016
- [2] European-Union, 2014. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006, 2014.
- [3] J. Catalán-Gil, L. Nebot-Andrés, D. Sánchez, R. Llopis, R. Cabello, D. Calleja-Anta. Improvements in CO₂ Booster architectures with different economizer arrangements. *Energies*, 13 (5), 1271 (2020).
- [4] Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O., Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP), NIST Standard Reference Database 23, v.10.0. National Institute of Standards, Gaithersburg MD, USA (2018).
- [5] SecCool v.1.33 Properties 2007. SecCool v.1.33 Properties. IPU Refrigeration and Energy Engineering (2007).