

DESEMPENHO DE SISTEMAS FRIGORÍFICOS COM CONDENSADORES A AR OU EVAPORATIVOS

PERFORMANCE OF REFRIGERATION SYSTEMS WITH AIR CONDENSERS OR EVAPORATIVES

Clito Afonso

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto Email: clito@fe.up.pt

RESUMO

Analisa-se neste trabalho o comportamento térmico de um sistema frigorífico baseado no ciclo de compressão de vapor simples. Comparou-se a influência de dois tipos de condensadores no desempenho do sistema: num, a simulação foi feita com um condensador a ar e num segundo com um condensador evaporativo. Analisou-se também a influência de diferentes fluidos de trabalho no desempenho energético do sistema. Os fluidos testados foram o R410A, o R134a e o R22. Para cada um deles foram simulados os dois tipos de condensadores. A simulação dinâmica dos dois sistemas (base anual), a serem implementados na cidade de Bragança, foi realizada recorrendo-se ao código Pack Calculation Pro. Concluiu-se também que as potências dos compressores com condensador evaporativo são sistematicamente inferiores quando comparadas com os condensadores a ar. Este fato verifica-se para qualquer fluido de trabalho. Conclui-se também que com condensadores a ar, o fluido R134a é o que apresenta maiores consumos elétricos totais, sendo em média os consumos do R410A e do R22 praticamente idênticos. Com condensadores evaporativos, e por ordem decrescente, o que apresenta melhor desempenho é o R22, seguido do R410A e R134a. Calcularam-se também as emissões equivalentes de CO₂ para a atmosfera no caso de o fluido ser o R410A, e com os dois tipos de condensadores. Concluiu-se que as emissões totais de CO₂ são aproximadamente idênticas em ambos sistemas, sendo 2,8% maiores no sistema com condensador evaporativo.

Palavras passe: Sistemas frigoríficos de compressão de vapor, simulação dinâmica, fluidos frigoríficos, condensadores a ar e evaporativos, emissões de CO₂.

ABSTRAT

In this work it is analysed the thermal behaviour of a refrigeration system based on the simple vapor compression cycle. The influence of two types of condensers on the performance of the system was compared: in one, the simulation was performed with an air condenser and in a second one with an evaporative condenser. The influence of different working fluids on the energy performance of the system was also analysed. The fluids tested were R410A, R134a and R22. For each of them, the two types of condensers were simulated. The dynamic simulation of the two systems (annual basis), to be implemented in the city of Bragança, was carried out using the Pack Calculation Pro code. It was also concluded that the compression power of the system with evaporative condenser is systematically lower when compared to air condensers. This is true for any working fluid. It is also concluded that with air condensers, the fluid R134a is the one with the highest total electrical consumption, the ave-

rage consumption of R410A and R22 being practically identical. With evaporative condensers, and in decreasing order, the one with the best performance is R22, followed by R410A and R134a. The equivalent CO₂ emissions were also calculated with the fluid R410A, and with condensers of both types. It was concluded that the total CO₂ emissions are approximately identical in both systems, being 2.8% higher in the system with evaporative condenser.

Keywords: Vapour compression refrigeration systems, dynamic simulation, refrigeration working fluids, evaporative and air condensers, CO₂ emissions.

1. INTRODUÇÃO

A história da refrigeração pode ser dividida em duas etapas:

- Períodos pré-históricos até ao início do século 19;
- Período da refrigeração artificial desde o século 19 até aos dias de hoje.

Enquanto que no primeiro período não existia utilização de energia para a produção de frio (era obtido fundamentalmente com gelo natural), no segundo período, com a refrigeração artificial, e com o advento da eletricidade, começou-se a assistir a um consumo crescente desta forma de energia.

Em termos energéticos, a importância do setor do frio hoje em dia, no que concerne à potência instalada para o seu acionamento pode ser visualizada na Figura 1, onde se pode ver a potência instalada em dois setores típicos, ar condicionado no setor residencial e comercial. No primeiro caso constata-se que a China e a Índia serão responsáveis por mais de metade da potência instalada em 2050 enquanto que no segundo caso a potência instalada terá um acréscimo desde os 60% até mais de 85% entre 2016 e 2050. A Figura 2 mostra o que acontece por regiões do mundo, relativamente ao número de unidades de refrigeração existentes bem como as previsões para 2050. Na Figura 3 mostram-se as perspetivas do crescimento da energia utilizada no setor do frio segundo dois cenários: “business as usual” e com medidas de tornar os sistemas mais eficientes. Como se pode verificar, políticas efetivas e assertivas podem duplicar, em média, a eficiência dos equipamentos e reduzir a energia necessária em cerca de 45% relativamente ao primeiro cenário.

Este trabalho insere-se na sequência do

que foi dito. Pretende-se manter no interior de um edifício uma temperatura do ar de 24°C nos meses mais quentes do ano, havendo então necessidade de se escolher um sistema frigorífico adequado. Optou-se por um sistema de compressão de vapor, com recuperador de calor. Estudou-se a influência no desempenho do ciclo de três fluidos de trabalho diferentes, a saber, o R410A (referência), o R134a e o R22. Para cada um deles admitiu-se que o sistema poderia ter condensadores a ar ou evaporativos. Pode assim verificar-se qual das combinações poderá levar a economias de energia mais ou menos significativas.

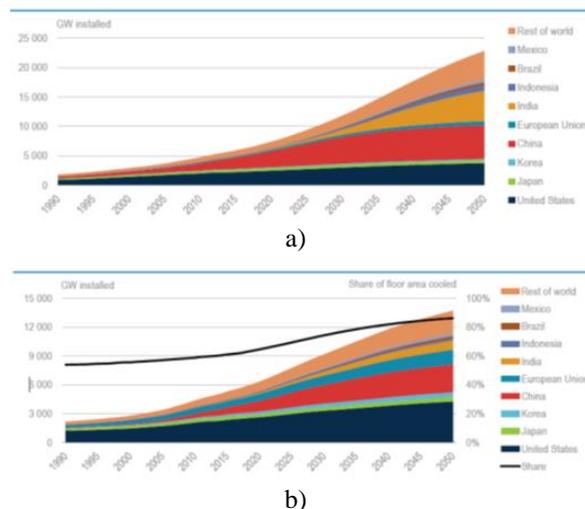


Fig. 1 - Potência instalada, no setor da refrigeração a) arrefecimento residencial e b) arrefecimento comercial [1].

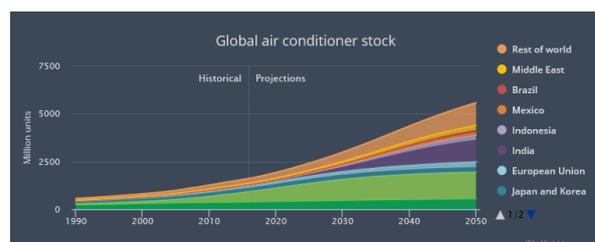


Fig. 2 - Número de unidades de refrigeração existentes regiões do mundo bem como as previsões para 2050, [1].

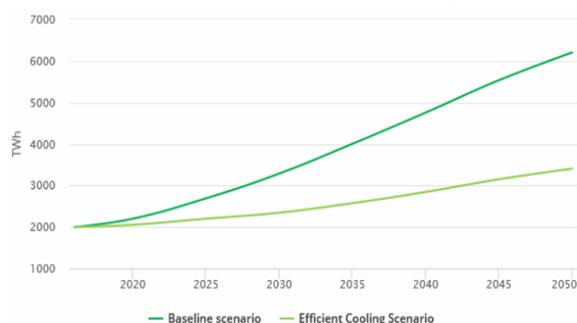


Fig. 3 - Crescimento da utilização de energia na refrigeração e potencial de poupança, [1].

Poder-se-ia ainda fazer uma escolha de outros fluidos frigoríficos bem como vários tipos de compressores e configurações mais complexas, [2]. Conclui-se assim que este trabalho é muito laborioso até se encontrar a solução ideal, ou próxima.

Uma vez feitas as simulações do sistema para a cidade de Bragança, recorrendo ao código Pack Calculation Pro, [3], pôde concluir-se que, para a mesma carga térmica a extrair do espaço, 15kW:

- As potências dos compressores com condensador evaporativo são sistematicamente inferiores quando comparadas com os condensadores a ar.
- Nos sistemas com condensadores a ar, o fluido R134a é o que apresenta maiores consumos elétricos totais, sendo em média os consumos do R410A e do R22 praticamente idênticos.
- Nos sistemas com condensadores evaporativos, e por ordem decrescente, o que apresenta melhor desempenho é o R22, seguido do R410A e R134a.

Na secção seguinte mostram-se os resultados mais relevantes das simulações.

2. METODOLOGIA

Para as simulações efetuadas foi escolhido um sistema de compressão de vapor simples, Figura 4, destinado arrefecimento de um edifício localizado na cidade de Bragança. Foram analisados três fluidos de trabalho diferentes, o R410A, R134a e R-22 de modo a analisar-se a influência de diversos fluidos nos parâmetros mais relevantes do sistema. Fez-se também, para cada fluido testado, uma análise da influência de dois tipos de condensadores no desempenho do sistema: arrefecidos a ar ou evaporativos como mostrado na Figura 5.

Enquanto que nos condensadores arrefecidos a ar, este é diretamente impulsionado por ventiladores sobre a tubagem do condensador, nos evaporativos o processo de condensação é diverso (afonso-frio). Nestes, o vapor sobreaquecido proveniente do(s) compressor(es) é direcionado para um feixe tubular dentro de um invólucro. O lado exterior dos tubos é simultaneamente exposto a um spray de água (em circuito fechado) e a um fluxo de ar em contra corrente. O calor de condensação do fluido de trabalho é transferido para a água aspergida que evapora parcialmente, sendo o vapor formado removido por uma corrente de ar impulsionada por um ventilador. O fluido de trabalho, ora condensado, regressa ao sistema frigorífico.

Este processo é usado extensivamente na indústria de ar condicionado como um meio de condensação do gás refrigerante.

Para as simulações efetuadas, calculou-se inicialmente a carga térmica do edifício, que

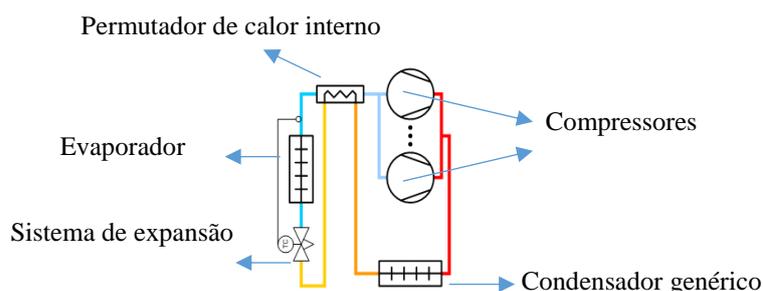


Fig.4 - Sistema de compressão de vapor simples, adaptado de [3].

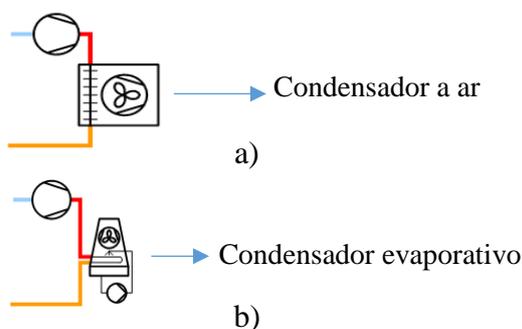


Fig.5 - Esquema de a) condensador arrefecido a ar e b) condensador evaporativo, adaptado de [3].

foi de 15KW, [4].

A temperatura do espaço a arrefecer foi estabelecida em 24°C. Sendo que para a existência de uma boa transferência de calor entre o ar do espaço e fluido de trabalho no evaporador, deverá existir um diferencial de temperaturas entre ambos entre 5 a 10°C pelo que se escolheu inicialmente uma temperatura de evaporação de 15°C, com um sobreaquecimento útil de 2°C. Nos condensadores a ar a temperatura de condensação foi estabelecida como sendo igual à temperatura do ar ambiente mais 10°C. No caso dos condensadores evaporativos a temperatura de condensação foi estabelecida como sendo igual à temperatura de bolbo húmido mais 10°C.

Como decorre, os compressores foram escolhidos consoante os dados mencionados bem como o refrigerante usado na instalação. São semi-herméticos e alternativos.

Todos os dados de projeto foram introduzidos no programa de simulação Pack Calculation Pró [3] apresentando-se na

secção seguinte os resultados obtidos para as diversas situações mencionadas.

3. RESULTADOS

Mostra-se na Figura 6 a energia elétrica consumida (kWh) por mês num ano típico nos casos em estudo bem como a temperatura média mensal.

As barras inferiores respeitam à energia elétrica consumida pelos compressores em cada caso e as superiores à energia associada aos equipamentos auxiliares (ventiladores, bombas, etc.). Em cada mês, e por ordem, a primeira barra respeita ao fluido frigorígeno R410A com condensador arrefecido a ar e a segunda com condensador evaporativo. A terceira e quarta barra respeitam ao fluido R134a e a quinta e sexta barra ao R22.

A primeira constatação a fazer é que o consumo elétrico do sistema é significativamente maior nos meses quentes quando comparado com os meses frios, como seria de se esperar. No entanto, e por exemplo no mês janeiro, a energia elétrica dos compressores para o R410A (sistema de referência) é de 714kWh, com qualquer tipo de condensadores, o que é um valor insignificante. Este consumo respeita a um ou outro dia do mês mais quente.

A segunda constatação a fazer, é que o consumo elétrico dos equipamentos auxiliares na presença de condensadores evaporativos é bastante inferior quando comparado com o caso dos condensadores

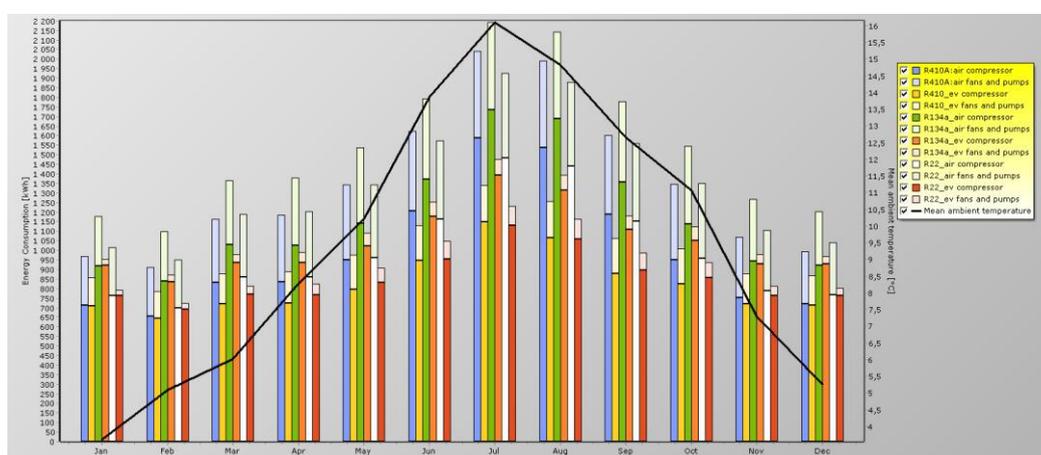


Fig.6 - Energia elétrica mensal consumida num ano típico para os casos em estudo.

arrefecidos a ar. Tal prende-se com o fato de na segunda situação haver necessidade de se recorrer a ventiladores para impulsionar o ar ambiente para o condensador, o que não ocorre na primeira situação (a energia consumida pelos ventiladores dos evaporadores é idêntica). Como consequência, para cada fluido de trabalho e por mês, o consumo elétrico total do sistema é sempre inferior quando na presença de condensadores evaporativos quando comparado com condensadores a ar.

Indica-se na Tabela 1 os consumos energéticos (dos compressores, equipamentos auxiliares e totais) de cada um dos fluidos de trabalho e com os dois tipos de condensadores. Nesta são também indicados os valores do COP e COSP dados respetivamente pela equação 1 e 2.

$$COP = \frac{Q_E}{W} \quad (1)$$

em que

Q_E - energia frigorífica

W - energia elétrica consumida pelo(s) compressor(es)

$$COSP = \frac{Q_E}{\sum W_e} \quad (2)$$

onde

$\sum W_e$ - energia elétrica total consumida por todos os equipamentos do sistema necessários ao seu bom funcionamento.

Tendo como referência o sistema com R410A com condensador a ar, mostram-se também as diferenças entre o consumo

elétrico (e em %) dos restantes sistemas e o de referência.

A primeira constatação a fazer é que para cada fluido, o valor do COSP é sempre inferior ao do COP (ver equações 1 e 2).

Como se pode verificar, com condensadores a ar, o fluido R134a é o que apresenta maiores consumos elétricos totais, sendo em média os consumos do R410A e do R22 praticamente idênticos. Com condensadores evaporativos, e por ordem decrescente, o que apresenta melhor desempenho é o R22, seguido do R410A e R134a. Tal prende-se com as propriedades termodinâmicas de cada um dos fluidos.

A título de exemplo, mostra-se na Figura 7, para o sistema com R410A, as potências em jogo (kW) num ano típico, quer com o condensador a ar quer com o evaporativo. Como se verifica, as potências de compressão são maiores nos meses de verão o que, sensivelmente para potências de evaporação sensivelmente idênticas tem como consequência uma maior potência de condensação para ambos tipos de condensadores, Primeira Lei da Termodinâmica [5]. Também, as potências de compressão com condensador evaporativo são sistematicamente inferiores quando comparadas com os condensadores a ar, à exceção dos dois meses mais frios onde são praticamente idênticas Este fato verifica-se para qualquer fluido de trabalho. Tal pode ser melhor analisado através da Figura 8 onde se mostram as pres-

Tabela 1 - COP, COSP e consumo energético do sistema com vários fluidos e com os dois tipos de condensadores.

		R410A (cond. ar)	R410A (cond. ev.)	R134a (cond. ar)	R134a (cond. ev.)	R22 (cond. ar)	R22 (cond. ev.)
	COP médio	7,35	10,0	6,46	9,00	7,40	10,81
	COSP médio	5,39	8,29	5,66	8,52	5,78	10,02
Consumo de eletricidade (kWh)	Ventiladores e bombas	4308	2037	4367	706	4234	799
	Compressores	11924	9898	14102	12551	11895	10240
	Totais	16231	11926	18468	13257	16129	11039
Poupanças	Anuais (kWh)	-	4305	-2237	2974	102	5193
	Anuais (%)	-	26,5	-13,8	18,3	0,6	32,0

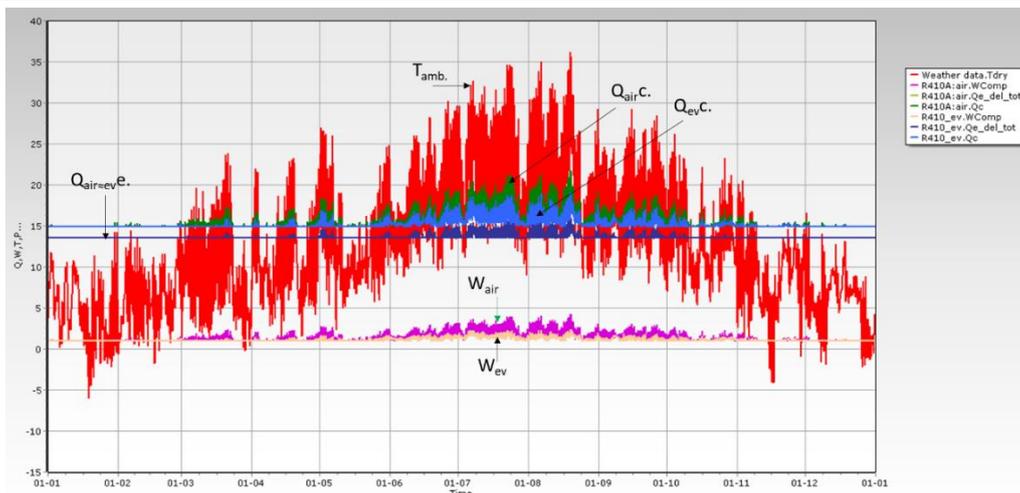


Fig.7 – Potências em jogo (kW) no sistema com R410A num ano típico.

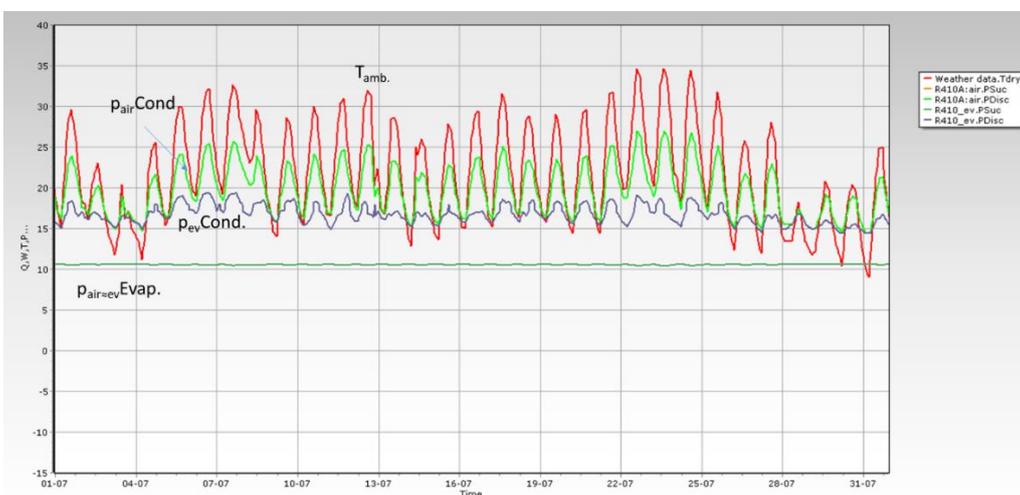


Fig. 8 – Pressões de evaporação e de condensações em jogo (bar) no sistema com R410A no mês de julho, bem como a evolução da temperatura ambiente.

sões de evaporação e de condensação (bar) para o mesmo fluido, com ambos condensadores, bem como a evolução da temperatura ambiente longo do mês mais quente do ano (julho).

Como seria de esperar as pressões de condensação seguem a variação da temperatura ambiente, mantendo-se semelhantes as pressões de evaporação. Verifica-se também que na presença de condensadores a ar, a pressão de condensação é fortemente influenciada pela temperatura do ar ambiente, enquanto que nos condensadores evaporativos esta influência é muito menos significativa, já que o fluido de trabalho é arrefecido a água, em que a temperatura é mais constante e inferior.

Nesta conformidade, para razões de pressões maiores existentes nos condensadores

a ar, equação 3, o trabalho de compressão é maior quando comparado com os condensadores evaporativos em que a razão de pressões é menor.

$$r_p = \frac{p_{cond}}{p_{evap}} \tag{3}$$

O mesmo acontece com os restantes fluidos de trabalho. Tipicamente na situação de inverno, janeiro e fevereiro, a razão de pressões é idêntica pelo que os trabalhos de compressão são semelhantes. Tal pode ser visto na Figura 3.

Na Figura 9 mostra-se a variação do COP mensal ao longo de um ano e a sua dependência com a variação da temperatura ambiente, novamente para o fluido de referência e com o evaporador arrefecido a ar.

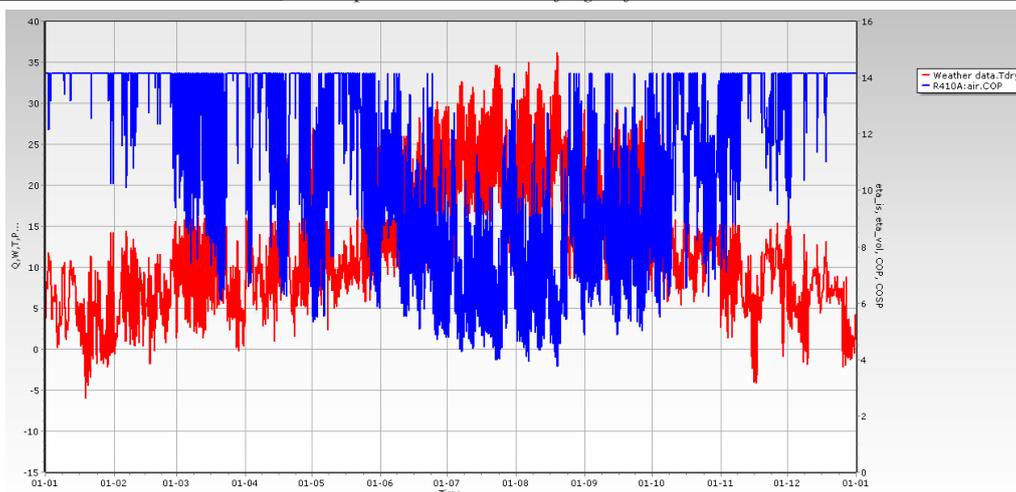


Fig. 9 - Variação do COP e evolução da temperatura ambiente mensal num ano típico com o fluido R410A e evaporador arrefecido a ar.

Como exetável, o COP é tanto maior (menor) consoante a temperatura ambiente é menor (ou maior). Tal tem a ver com o fato de que quanto maior for esta última, maior é a potência de compressão, mantendo-se praticamente constante a potência frigorífica - ver Figura 7 - o que acarreta uma diminuição do COP, equação 1. O COSP tem o mesmo andamento do COP, mas com valores inferiores, equação 2.

Analisa-se de seguida, a influência que a temperatura de evaporação tem no desempenho do ciclo. Admitiu-se que o fluido era o R410A sendo o condensador arrefecido a ar. Em toda a análise anterior considerou-se que a temperatura de evaporação era de 15°C. Mostra-se na Tabela 2 os valores obtidos para uma temperatura de evaporação de 15, 16 e de 17°C.

Como se pode verificar, à medida que a temperatura de evaporação do fluido aumenta, existem maiores poupanças no consumo de eletricidade anual e um acréscimo do valor do COP e do COSP. Esta constatação é fácil de se verificar através da equação do COP de um ciclo frigorífico ideal, equação 4.

$$COP_{teórico} = \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad (4)$$

Deste modo, para uma dada temperatura de condensação, T_{cond} , quanto maior for a temperatura de evaporação, T_{evap} , maior será o valor do COP. A influência das temperaturas mencionadas é igualmente válida para os ciclos reais, como o do caso em análise. No caso de a temperatura de evaporação ser de 17°C e com os 2K de sobreaquecimento, que perfaz 19°C, verifica-se que

Tabela 2 - Influência da temperatura de evaporação no desempenho do sistema para o R410A com condensador a ar.

		$T_e = 15^\circ\text{C}$	$T_e = 16^\circ\text{C}$	$T_e = 17^\circ\text{C}$
	COP médio	7,35	7,76	8,22
	COSP médio	5,4	5,6	5,81
Consumo de eletricidade (kWh)	Ventiladores e bombas	4308	4261	4251
	Compressores	11924	11114	10257
	Totais	16231	15375	14508
Poupanças	Anuais (kWh)	-	+856	+1723
	Anuais (%)	-	+5,17	+10,61

o ΔT entre o fluido de trabalho e do espaço interior é de 5°C, valor mínimo para que haja uma boa transferência de calor, como já mencionado, pelo que o sistema pode operar com a temperatura de evaporação de 17°C.

Estes resultados são semelhantes (com valores absolutos diversos) para os restantes fluidos bem como para o sistema a operar com condensadores evaporativos.

3.1. Emissões equivalentes de CO₂

As emissões equivalentes de CO₂ nos sistemas frigoríficos podem subdividir-se em três categorias a saber:

- Fugas
- Perdas na reciclagem
- Indiretas (devido à produção de energia elétrica)

A carga de refrigerante para o R410A com condensador a ar e evaporativo foi estimada como sendo respetivamente 6,5kg e de 8,8kg. As perdas na reciclagem foram estimadas em 20% nos dois casos e as fugas foram de 10%/ano para o evaporador a ar e de 20%/ano para o condensador evaporativo (neste caso a possibilidade de fugas são superiores devido a um maior comprimento de tubagem). Os cálculos foram efetuados para o tempo de vida do sistema (10 anos). Os resultados são mostrados na Figura 10.

Os valores numéricos correspondentes à Figura 10 estão indicados na Tabela 3.

Como se pode verificar, o peso das fugas na presença de condensadores evaporativos é superior às dos condensadores a ar como já mencionado. Uma implicação direta é que o peso da reciclagem também é superior na primeira situação. No entanto, relativamente às emissões indiretas ocorre o oposto. Tal prende-se com o fato de que a energia elétrica consumida pelos compressores no sistema com

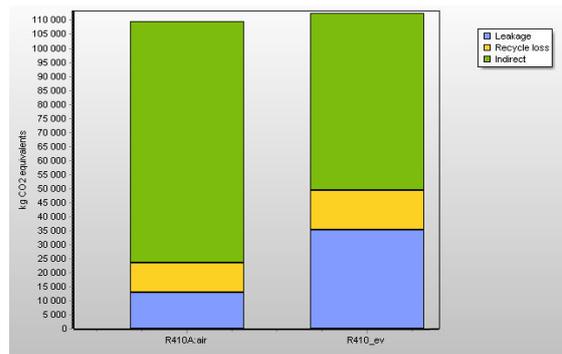


Fig.10 - Emissões de CO₂ equivalentes para o R410A com condensadores a ar e evaporativos.

condensador evaporativo ser menor do que a do sistema com condensador a ar, ver Figura 3. Somando todas as parcelas resulta um total de emissões de CO₂ aproximadamente idêntico em ambos sistemas: 2,8% maior no sistema com condensador evaporativo.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se a influência no desempenho energético de um sistema frigorífico de compressão de vapor a poder trabalhar com três fluidos de trabalho diferentes, a saber, o R410A (referência), o R134a e o R22. Para cada um deles admitiu-se que o sistema poderia operar com condensadores a ar ou evaporativos. Conclui-se que:

- Para os três fluidos, o sistema com condensadores evaporativos são os que consomem menos energia elétrica total quando comparados com os sistemas com condensadores arrefecidos a ar.
- Apesar disto os condensadores evaporativos têm emissões de CO₂ equivalentes ligeiramente superiores aos condensadores arrefecidos a ar - 2,8% maiores. Tal prende-se com o fato dos primeiros terem comprimentos de tubagens superiores, o que

Tabela 3 - Valores numéricos correspondentes à Figura 7.

	Fugas [kg CO ₂]	Reciclagem [kg CO ₂]	Indiretas [kg CO ₂]	Total [kg CO ₂]
R410A_ar	13000 (11,9%)	10400 (9,5%)	86027 (78,6%)	109427
R410A_ev	35200 (31,3%)	14080 (12,5%)	63209 (56,2%)	112489

leva a que possa haver mais fugas do fluido de trabalho para o meio ambiente.

- Com condensadores a ar, o fluido R134a é o que apresenta maiores consumos elétricos totais, sendo em média os consumos do R410A e do R22 praticamente idênticos. Com condensadores evaporativos, e por ordem decrescente, o que apresenta melhor desempenho é o R22, seguido do R410A e R134a.

Para uma dada instalação frigorífica que se pretenda instalar, há necessidade de se compararem diversas hipóteses de sistemas possíveis bem como de equipamentos e, aquilatar, dentro da panóplia de fluidos de

trabalho existentes qual a melhor combinação possível para o caso em estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Fonte: The Future of Cooling-IEA
- [2] Afonso, C. "Sistemas Frigoríficos. ISBN: 978-989-54350 -1-2". Edição Efeitos gráficos. 2019
- [3] <http://www.en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/software-and-simulation.aspx>
- [4] Mcquiston, F., Parker, J. "Heating, Ventilation, and Air Conditioning. Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc.1994.
- [5] Afonso, C. "Termodinâmica pra Engenharia". ISBN; 978-972-752-143-2.Edições FEUP. 2012.