

Sistema de refrigeração mecânica acoplado a um aquífero: comparação entre o desempenho energético com o mesmo sistema frigorífico a operar isoladamente

Mechanical refrigeration system connected to an aquifer: comparison between energy performance with the same refrigeration system alone

Clito Afonso

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

resumo

Neste trabalho fez-se uma comparação, em termos energéticos, entre um sistema frigorífico de compressão de vapor cujo fluido de trabalho é o R404A (sistema de referência) e o mesmo sistema acoplado a um aquífero. O espaço a arrefecer tem uma potência frigorífica de 90 kW. Enquanto que o sistema frigorífico opera durante todo o ano, o acoplado funciona nos meses mais frios, de janeiro a maio e de setembro a dezembro onde o COP é maior e, no intervalo destes meses é a água do aquífero que garante a refrigeração do espaço, juntamente com uma contribuição mínima do sistema de compressão de vapor. Pôde concluir-se que o valor médio do COP do sistema de compressão de vapor a operar todo o ano era de 5,96 enquanto que o do sistema acoplado o valor era de 6,75, o que mostra que este último é mais eficaz em termos energéticos. Estes valores resultam numa poupança de energia elétrica de 11,8%.

Palavras-chave: Sistemas frigoríficos de compressão de vapor, simulação dinâmica, aquíferos, COP.

abstract

In the present work, a comparison was made, in energetic terms, between a vapor refrigeration compression system whose working fluid is the R404A (reference system) and the same system coupled to an aquifer. The space to be cooled has a cooling capacity of 90 kW. While the refrigeration system operates throughout the year, the coupled one runs in the cooler months, from January to May and from September to December where the COP is higher. In the interval of these months is the water from the aquifer which ensures the refrigeration of the space, together with a minimal contribution from the vapor compression system. It was concluded that the average COP value of the vapor compression system operating throughout the year was 5.96 while that of the coupled system the value was 6.75, which shows that the latter is more effective in energetic terms. These figures result in an annual energy saving of 11.8%.

Keywords: Vapour compression refrigeration systems, dynamic simulation, refrigeration, aquifers, COP.

1- INTRODUÇÃO

Na nossa sociedade, principalmente hoje em dia, é impossível imaginar viver-se sem sistema frigoríficos principalmente para a conservação de produtos perecíveis (quer em câmaras poitivas ou negativas), para espaços onde exista elevadas cargas térmicas (por exemplo, data centers) e para o condicionamento do ar em espaços onde seja necessário garantir conforto térmico. Existem vários sistema para resolver tais desideratos, [1], sendo os mais comuns, de um modo geral, os ciclos de compressão de vapor que podem ser implementados de diversas formas, [2, 3].

Em termos energéticos, a importância do setor do frio, hoje em dia, no que concerne à potência instalada para o seu acionamento, encontra-se em crescendo contínuo, [4]. Na Figura 1 mostram-se as perspetivas do crescimento da energia utilizada no setor do frio segundo dois senários: “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 senário.

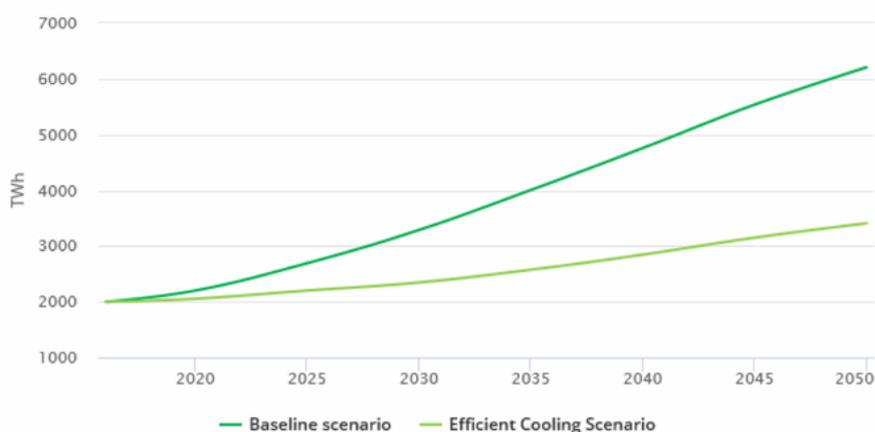


Fig. 1 | Crescimento da utilização de energia na refrigeração e potencial de poupança, [4].

É nesta sequência que este trabalho se insere, no sentido de se procurar diminuir a utilização de energia elétrica em sistemas frigoríficos e conseqüentemente as emissões de CO₂. Consiste na comparação entre um sistema frigorífico mecânico clássico (compressão de vapor), Fig.2, [5], para arrefecimento ambiente de um espaço com uma carga térmica calculada de 90 kW a funcionar todo o ano (arrefecimento a ar), e um segundo igual, mas acoplado a um sistema de arrefecimento proveniente de água de aquíferos existentes no subsolo, Fig.3, [6]. Neste caso ambos circuitos de arrefecimento são independentes. Este segundo possui um circuito fechado onde flui água, para arrefecimento do espaço através de ar. Ambos podem operar simultaneamente.

No sistema acoplado, o sistema frigorífico mecânico funciona durante parte do ano (meses mais frios, como se verá adiante) enquanto que o sistema de arrefecimento com água do aquífero opera somente nos restantes meses para proceder ao arrefecimento. Este sistema, como se pode verificar em detalhe na Fig.4, necessita de duas condutas independen-

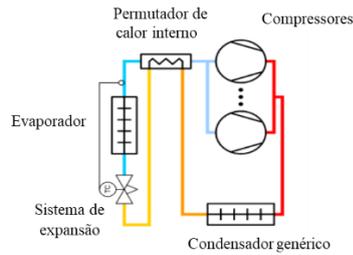


Fig. 2 | Sistema de compressão de vapor simples, adaptado de [5].

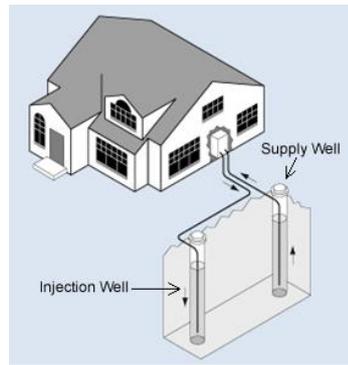


Fig. 3 | Arrefecimento por água de um aquífero, [6].

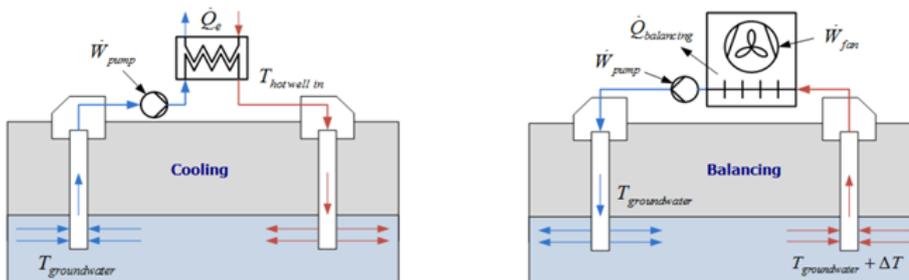


Fig. 4 | Arrefecimento por água de um aquífero em detalhe, [5].

tes de transporte de água inseridas no aquífero e tem duas fases de operação: uma, indicada na figura 4 à esquerda, é a fase de arrefecimento do espaço e a segunda, à direita, a fase de arrefecimento da água do aquífero – regeneração – de forma a repor a sua temperatura inicial.

Neste sistema existe um circuito fechado dentro do espaço a arrefecer, onde circula água. Esta retira calor do espaço, arrefecendo-o, e à saída, o fluido com temperatura mais elevada (recebeu calor do espaço) tem de ser arrefecido de forma a voltar à sua temperatura inicial. Tal é realizado através de um permutador de calor como mostrado na figura 4 à esquerda. A água fria proveniente das condutas do aquífero é bombeada para um permutador, arrefecendo a água proveniente do espaço. Esta fase de arrefecimento é usualmente realizada nos meses mais quentes do ano.

Como consequência, a água fria do aquífero na sua passagem pelo permutador aquece durante a permuta de calor, tendo então de ser rejeitada para o mesmo através de outras condutas. Assim, é expectável que a água bombeada do aquífero, ao receber água quente do permutador veja a sua temperatura aumentar, tendo como consequência um aumento da temperatura na tubagem de injeção, diminuindo deste modo a sua capacidade de

arrefecimento. Dá-se então início à segunda fase, como se pode ver na figura 4 à direita, a de regeneração. A circulação da água no aquífero faz-se agora em sentido contrário. A tubagem de descarga de água existente na primeira fase passa agora a ser a de admissão e vice-versa. A água do aquífero, agora mais quente, é bombeada para um outro permutador de calor arrefecido a ar de sorte que à sua saída a água volte à temperatura inicial e possa ser de novo injetada, estando assim terminado o ciclo.

A utilização deste tipo de sistema é muito difundida em regiões onde possam existir aquíferos, lagos, etc. A título de exemplo, foi utilizado num centro de supercomputadores em Perth na Austrália com 2,5 MWth de potência frigorífica, [7]. Um outro exemplo foi implementado num túnel do metro em Londres, Fig.5, [8], em que se recorreu à água do rio Tamisa para se proceder ao arrefecimento. Neste caso não há necessidade de regeneração, uma vez que a água do rio Tamisa é corrente.

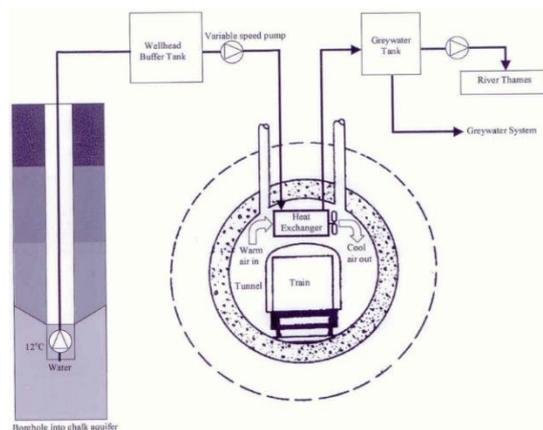


Fig. 5 | Sistema de arrefecimento numa secção do metro de Londres com água do Tamisa, [8].

Este trabalho consistiu na comparação energética entre um sistema frigorífico mecânico, para arrefecimento ambiente de uma sala com uma carga térmica calculada de 90kW a operar todo o ano, e um outro igual, mas acoplado a um sistema de arrefecimento proveniente de água de aquíferos existentes no subsolo. Pôde concluir-se que o primeiro sistema utilizava muito mais energia elétrica para o seu funcionamento quando comparado como segundo, o que leva a que este último tenha menores emissões de CO₂ para o meio ambiente.

2- METODOLOGIA

Para a realização das simulações dos dois sistemas foi utilizado código Pack Calculation Pró, [9].

Para ambos sistemas de compressão de vapor, a temperatura do espaço a arrefecer foi estabelecida no intervalo entre 20°C e 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 optou por uma temperatura de evaporação de 10°C, com um sobreaquecimento útil de 5°C. No condensador a ar a temperatura de condensação foi estabelecida como sendo igual à temperatura do ar ambiente mais 8°C. O fluido de trabalho é o R404A. Para o funcionamento de cada um dos sistemas foram selecionados quatro compressores comerciais. As simulações foram realizadas com os dados climáticos da cidade de Bragança.

No sistema que opera acoplado com o aquífero, admitiu-se que a temperatura da água à saída do permutador de calor na fase de arrefecimento era de 20°C.

Todos os dados de projeto foram introduzidos no programa de simulação referido, apresentando-se na secção seguinte os resultados obtidos nas 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 da cidade de Bragança.

As barras a azul escuro - sistema de compressão de vapor e a amarelo - sistema de compressão de vapor acoplado a um aquífero - respeitam à energia elétrica consumida pelos compressores nas duas situações e, no topo destas, a azul claro e a branco respetivamente à energia associada aos equipamentos auxiliares (ventiladores, bombas, etc.). As barras a branco inferiores respeitam à energia elétrica despendida para o acionamento do aquífero desde maio a agosto.

Pela análise da figura 6 podem-se fazer algumas constatações:

- A primeira (óbvia), é que a energia utilizada em ambos sistemas de compressão de vapor é a mesma nos meses em que ambos funcionam, já que os sistemas são iguais.

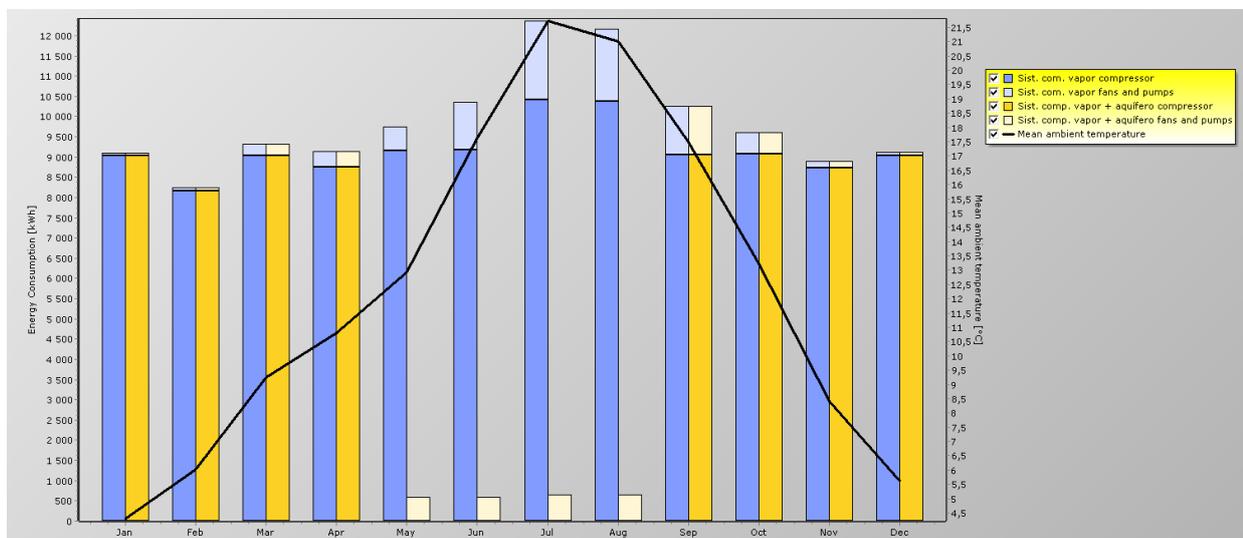


Fig. 6 | Energia elétrica mensal consumida num ano típico para os casos em estudo.

- A segunda concerne à energia elétrica utilizada pelos ventiladores do sistema de arrefecimento mecânico. O mínimo observado foi no mês de janeiro – 59,2 kWh – e o máximo foi obtido no mês de julho – 1846,7 kWh. Tal prende-se com o fato da temperatura ambiente ir aumentando sempre no intervalo de meses mencionados o que leva a que os ventiladores do evaporador e condensador necessitam de circular mais ar para que o efeito frigórico seja obtido. A partir deste último mês dá-se o processo inverso.
- A terceira é que a energia utilizada para o acionamento do aquífero (bomba) para o arrefecimento do espaço – maio a agosto (ver figura 4) – em que o sistema de compressão de vapor praticamente não funciona, é significativamente inferior à do sistema de arrefecimento mecânico, já que esta diz respeito exclusivamente ao acionamento da bomba na fase de arrefecimento, 613 kWh em média nos meses em preço.

O parâmetro mais comum para avaliar o desempenho energético dos sistemas frigoríficos, é o COP, [10], eq. 1:

$$COP = Q_E / \Sigma W_e \quad (1)$$

onde: ΣW_e - energia elétrica total consumida por todos os equipamentos do sistema necessários ao seu bom funcionamento.

Poder-se-iam apresentar todas as variáveis em jogo num só gráfico, mas não seria possível tirar nenhuma conclusão uma vez que as diferentes curvas estariam muito sobrepostas.

Assim, para o sistema de compressão de vapor acoplado ao aquífero, mostra-se na Fig.7 a evolução da temporal da temperatura ambiente na base diária (curva a castanho), a potência (kW) total de acionamento dos compressores, ventiladores e bombas de todo o sistema ao longo do ano (curva a amarelo) bem como exclusivamente a potência de acionamento dos compressores (curva a vermelho coincidente com a base da última curva e pontualmente dentro da oval assinalada). É também mostrada a variação do COP (curva a verde) e o COP caso o sistema de compressão de vapor estivesse acionado nos meses mais quentes (curva a azul escuro).

Como se pode verificar no sistema frigorífico acoplado, a potência de acionamento dos ventiladores do evaporador e condensador apresentam picos acentuados nos meses de março a abril e de setembro a outubro. Tal deve-se ao fato de nestes a temperatura ambiente ser mais elevada, o que obriga a que estes equipamentos tenham de funcionar mais tempo e com maior potência de forma a satisfazer as trocas de calor nos equipamentos mencionados.

A potência de compressão também regista ligeiros aumentos, o que faz que o COP diminua nesses períodos relativamente à situação normal. No entanto, o seu valor médio, quando comparado com o do COP do sistema de compressão de vapor simples é superior, pelo que sempre que possível deve fazer-se recurso a aquíferos ou rios.

Constata-se também que de maio a agosto praticamente só funciona para o arrefecimento a água do aquífero. No entanto, devido às elevadas temperaturas ambientes,

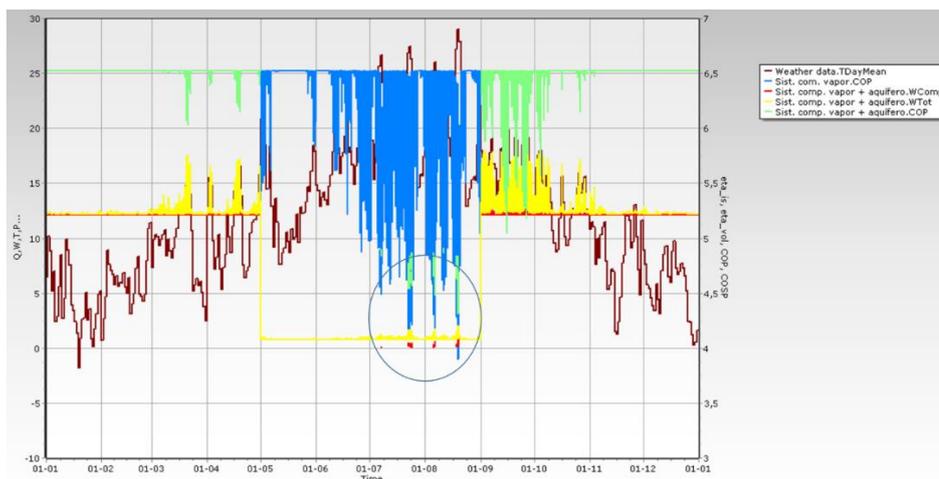


Fig. 7 | Parâmetros relevantes do sistema acoplado e COP do sistema de compressão de vapor.

principalmente em julho e agosto, o sistema mecânico de refrigeração também funciona pontualmente para satisfazer a carga térmica, como pode ser verificado na mesma figura (círculo oval), onde se mostra o seu trabalho de compressão e o COP. Mostram-se na Tabela 1 os resultados obtidos para os consumos de energia elétrica dos dois sistemas no período de arrefecimento, de maio a setembro, [kWh].

Como se pode verificar, nos meses mais quentes (maio a agosto), o sistema de compressão de vapor acoplado ao aquífero, apresenta uma diminuição significativa de consumo de energia elétrica total quando comparado com o sistema de compressão de vapor – cerca de 94%. Tem-se também que o trabalho dos compressores é manifestamente inferior no primeiro caso, o que corresponde a uma diminuição aproximada de 100%. Tendo por base a tabela 1 pode calcular-se o nº de horas em que os compressores operam no período mencionado. Assim, no mês de julho o sistema de compressão de vapor opera durante 25,2 min, no mês de agosto durante 41,2 min. e nos meses de maio e junho encontra-se desligado.

Mostram-se na Fig.8 as potências frigoríficas (kW) retiradas do espaço ao longo do ano com o sistema de compressão de vapor acoplado ao aquífero bem como a evolução da temporal da temperatura ambiente na base diária (curva a castanho). A curva a preto que se estende de janeiro a abril, de setembro a dezembro e pontualmente em julho e agosto (como visto) é a potência frigorífica associada exclusivamente ao sistema de compressão de vapor – médio de 80 kW, calculado através do COP do sistema mecânico deste sistema, 6,28 (ver tabela 2). A curva a azul respeita à potência frigorífica obtida pela água do aquífero nos restantes meses. Consoante a variação da temperatura ambiente, a potência frigorífica devido à água do aquífero varia entre os 80 a 90 kW.

Tabela 1 | Resultados dos consumos de energia elétrica dos dois sistemas no período de arrefecimento, de maio a setembro, [kWh].

Meses	Compressão de vapor			Compressão de vapor + aquífero		
	Comp.	Ventil.	Total	Comp.	Ventil.+bomba	Total
maio	9150,2	540,4	9690,6	0,0	582,5	582,5
junho	9151,3	1084,8	10236,0	0,0	580,8	580,8
julho	10352,9	1846,7	12199,5	5,9	645,6	651,5
agosto	10307,8	1711,4	12019,2	9,5	641,7	651,3
Total	38962,2	5183	44145,3	15,4	2450,6	2466,1

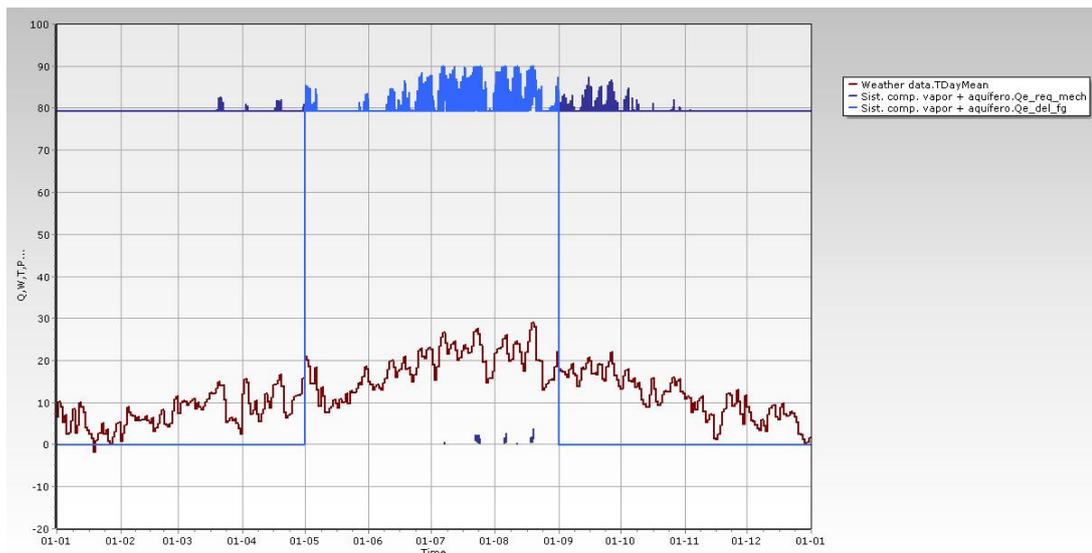


Fig.8 | Potências frigoríficas (kW) retiradas do espaço ao longo do ano com o sistema de compressão de vapor acoplado ao aquífero.

Indicam-se na Tabela 2 os valores mais relevantes respeitantes a ambos sistemas. Como se constata, o sistema de compressão de vapor que opera todo ano tem um valor médio anual do COP de 5,96. No entanto o mesmo sistema acoplado ao aquífero tem um COP mecânico maior - 6,28 - já que praticamente não opera durante os meses mais quentes. A contribuição da água do aquífero para o arrefecimento, consumindo relativamente pouca energia elétrica - 2450 kWh -, faz com que o COP médio anual do sistema seja de 6,75.

Na situação analisada, na presença de regeneração, vê-se que a energia elétrica consumida pelos ventiladores e bombas é de 32810 kWh. Este valor resulta da soma da energia anual utilizada por estes equipamentos, exclusivamente para o arrefecimento, cujo valor é 4938,8 kWh, com a energia despendida na regeneração cujo valor é de 27871 kWh. Com estes valores verifica-se que, recorrendo a um aquífero, existe uma poupança de energia elétrica de 13808 kWh que corresponde a 11,8%.

Uma outra análise complementar pode ser feita: a água para o arrefecimento provir de um rio onde existe água corrente, pelo que não existe necessidade de regeneração. Esta situação também está contemplada na tabela 2. Neste caso a poupança de energia elétrica é de 41679,4 kWh que corresponde a 35,5%.

4- CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se uma comparação, em termos energéticos, entre um sistema frigorífico de compressão de vapor cujo fluido de trabalho é o R404A (sistema de referência) e o mesmo sistema acoplado a um aquífero. O espaço a arrefecer tem uma potência frigorífica de 90 kW. Pode concluir-se que:

Tabela 2 | Valores mais relevantes respeitantes a ambos sistemas.

	Sistema Comp. Vapor	Sistema Comp. Vapor Acoplado
COP anual:		
médio	5,96	6,75
médio mecânico	5,96	6,28
Aquífero [kWh]:		
Bomba no arrefecimento		2450
Bomba e ventilador na regeneração		27871
Caudais de H ₂ O [m ³ /ano]:		
arrefecimento		27107
regeneração		164755
Consumo de energia elétrica s/ regeneração [kWh]:		
Bombas e ventiladores	7671	4938,6
Compressores	109831	70884
total	117502	75882,6
Consumo de energia elétrica c/regeneração [kWh]:		
Bombas e ventiladores	7671	32810
Compressores	109831	70884
total	117502	103694
Poupanças anuais s/regeneração:		
[kWh]	-	41679,4
[%]	-	35,5
Poupanças anuais c/regeneração:		
[kWh]	-	13808
[%]	-	11,8

- o COP do sistema de compressão de vapor se funcionasse todo o ano teria um valor de 5,96. O valor do COP do sistema acoplado é de 6,75 já que a água do aquífero contribui para o arrefecimento do espaço.
- o sistema acoplado tem um potencial de poupança de energia elétrica anual de 13808 kWh correspondente a 11,8%. Pode assim inferir-se que é a sua utilização é vantajosa.
- o valor da energia elétrica consumida na fase de regeneração é de 27871 kWh. No entanto este valor nem sempre é necessário para os cálculos, já que este processo não se destina ao objetivo final do sistema acoplado que é o arrefecimento do espaço. Trata-se simplesmente de arrefecer a água do aquífero para que ela retome o seu valor original de temperatura. Se a água destinada ao arrefecimento fosse obtida de um rio, não havia necessidade da regeneração.
- na sequência do ponto anterior, foram também indicados na tabela 2 os valores da energia elétrica e poupanças calculadas caso não houvesse regeneração. Assim, a poupança de energia elétrica passa ser de 41679,4 kWh o que corresponde a 35,5%.

REFERÊNCIAS

- [1] Afonso, C. “Sistemas Frigoríficos”. ISBN: 978-989-54350 -1-2. Edição Efeitos Gráficos. 2019.
- [2] Afonso, C., Moreira, J. “Otimização de Energia num Sistema de Climatização de um Centro de Processamento de Dados, Incluindo a Utilização de Sistema de Arrefecimento Gratuito”. Revista Mecânica Experimental. ISSN 1646-7078. 2018.
- [3] Afonso, C. “Desempenho de Sistema Frigoríficos com Condensadores a Ar ou Evaporativos”. Revista Mecânica Experimental. ISSN 1646-7078. 2020.
- [4] Fonte: The Future of Cooling - IEA.
- [5] <http://www.en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/software-and-simulation.aspx>
- [6] <https://www.bing.com/images/search?q=groundwater+cooling+system&FORM=HDRSC2>
- [7] Leigh H. “Groundwater Cooling Systems for Supercomputers Eco-friendly and Efficient”. The Green Optimistic, 2013.
- [8] F. Ampofo, G. Maidment e J. Missenden. “Ground Water cooling systems in London”. Applied Thermal Engineering. Vol. 26, 2006.
- [9] IPU - Pack Calculation Pro. Version 4.02.
- [10] Afonso, C. "Termodinâmica para Engenharia". ISBN; 978-972-752-143-2. Edições FEUP. 2012.