



ANÁLISE COMPARATIVA DE BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS PARA A GESTÃO DE ATIVOS NO SISTEMA AVAC DE UM AMBIENTE CRÍTICO

COMPARATIVE ANALYSIS OF AIR-SOURCE AND GEOTHERMAL HEAT PUMPS FOR ASSET MANAGEMENT IN THE HVAC SYSTEM OF A CRITICAL ENVIRONMENT

[10.29073/rae.v2i1.784](https://doi.org/10.29073/rae.v2i1.784)

RECEÇÃO: 14 de julho de 2023.

APROVAÇÃO: 6 de dezembro de 2023.

PUBLICAÇÃO: 6 de fevereiro de 2024.

AUTOR/A 1: Pedro Barandier , CISE — Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Portugal, pedro.barandier@mail.com.

AUTOR/A 2: Antonio Cardoso , CISE — Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior, Portugal, ajmcardoso@ieee.org.

AUTOR/A 3: Victor Cavaleiro , Department of Civil Engineering, University of Beira Interior, Portugal, victorc@ubi.pt.

RESUMO

O presente trabalho aborda a gestão de ativos num ambiente crítico — o Biotério da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) da Universidade da Beira Interior (UBI), Portugal — uma instalação onde as condições ambientais devem ser mantidas ininterruptamente a uma temperatura de 21 °C e com uma humidade relativa de 50%. A manutenção de tais condições exige uma constante utilização do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), sobretudo dos *chillers* e caldeiras para o arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Consequentemente, devido à significativa variação climática ao longo do ano, uma avaria no sistema pode resultar em drásticas consequências para os ativos da instalação e também, para as atividades em curso.

Visto que, eventualmente, os *chillers* e caldeiras deverão ser encaminhados para o abate, o objetivo deste artigo é efetuar uma análise de possíveis alternativas para a substituição de tais equipamentos levando em conta os aspetos económicos e ambientais. Por esta razão, são aqui abordadas as Bombas de Calor (BC), que operam segundo o ciclo de compressão de vapor, pois são equipamentos que satisfazem ambos os aspetos ao promoverem quer o arrefecimento quer o aquecimento do ambiente de modo mais eficiente e sustentável. Deste modo, são discutidas as tecnologias de BC aerotérmicas e geotérmicas e os aspetos de operação intrínsecos às mesmas. Por fim, é realizada uma simulação, em linguagem Python, de ambos os equipamentos, para diversos cenários de aquecimento e arrefecimento do ambiente em questão, com vista a uma análise mais detalhada do tema.

PALAVRAS-CHAVE: Ambiente Crítico; Biotério; Bombas de Calor; Gestão de Ativos; Python; Sistema AVAC.

ABSTRACT

The present work addresses the asset management in a critical environment — the Bioterium of the Faculty of Health Sciences (FCS) of the University of Beira Interior (UBI), Portugal — a facility where the environmental conditions must be uninterruptedly maintained at a temperature of 21 °C, and with a relative humidity of 50%. The maintenance of such conditions requires the constant use of the Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system, especially chillers and boilers for cooling and heating, respectively. Consequently, due to the significant weather variations throughout the year, a system failure may result in drastic consequences for the facility assets and for the ongoing activities as well.



Since, the chillers and boilers must be eventually replaced, the objective of this article is to carry out an analysis of possible alternatives for the replacement of such equipment, considering the economic and environmental aspects. For this reason, it is discussed here the Heat Pumps (HP) which operate according to the vapor compression cycle, as they are an equipment that satisfy both aspects by promoting both the cooling and heating of the environment in a more efficient and sustainable way. In this way, aerothermal and geothermal HP technologies and their intrinsic operational aspects are discussed. Finally, a simulation in Python of both equipment, for several scenarios of heating and cooling of the considered environment is performed, for a more detailed analysis of the subject.

KEYWORDS: Asset Management; Critical Environment; Heat Pumps; HVAC System; Python; Vivarium.

1. INTRODUÇÃO

Um biotério é uma área para a criação e manutenção de animais de laboratório utilizados para a pesquisa e/ou atividades de ensino. O principal objetivo de um biotério é assegurar as condições ambientais, nutricionais e do controlo da saúde dos animais (FMUC, n.d.; Institui & Oficial, 2019). Um biotério é, pois, um ambiente crítico onde as condições ambientais devem ser mantidas ininterruptamente em termos dos parâmetros de temperatura e humidade relativa do ar. Tais condições requerem uma utilização contínua do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), e qualquer anomalia no seu funcionamento pode levar a sérios problemas quer para os seres vivos (cobaias) quer para as atividades em curso (Barandier & Cardoso, 2022).

O sistema AVAC analisado, para além de outros elementos, tais como, Unidades de Tratamento de Ar (UTA), Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN), Bombas Hidráulicas de Circulação e Ventiladores-Convectores, é composto por dois chillers e duas Caldeiras para arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Em ambos os casos, enquanto um equipamento opera, o outro encontra-se como backup para o caso de avaria e/ou manutenção. No entanto, tal sistema encontra-se sobredimensionado, pois o mesmo foi projetado para todas as instalações da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) e nos períodos de férias e de suspensão/interrupção das atividades letivas tal sistema opera unicamente para o biotério, o que eleva significativamente os custos referentes ao consumo de energia elétrica e de gás propano.

Os chillers e as caldeiras foram adquiridos no ano de 2005. Isto significa que os mesmos estão a caminho do fim da sua vida útil, considerando-se esta em cerca de 20 anos para ambos os equipamentos. Deste modo, devido à sua maturidade, os chillers e as caldeiras deverão ser encaminhados para abate e substituídos.

A fim de garantir uma fiável gestão dos ativos, levando em conta a criticidade do ambiente em questão, os chillers e as caldeiras devem ser, eventualmente, substituídos por outros equipamentos que cumpram os requisitos necessários, sejam eles de frio ou de calor. Deste modo, uma escolha satisfatória seria a sua substituição por Bombas de Calor (BC) e/ou até mesmo, a implementação de um sistema AVAC independente para o biotério.

A substituição por BC é justificada não apenas pelo maior rendimento destas, quando comparadas aos chillers e caldeiras, como também pelo facto de que as BC, quando reversíveis, unificam os sistemas de arrefecimento e aquecimento visto que executam ambas as funções. Além disso, de acordo com a Norma Europeia de Controlo e Gestão de Edifícios (Cen/Tc 247, 2006), esta unificação é uma característica de um alto desempenho de um sistema de controlo e automação de edifícios, e também, da gestão técnica de edifícios.

Numa perspetiva económica, um sistema de BC adequadamente projetado pode retornar o investimento num período de cinco anos devido ao seu baixo consumo. Após o retorno do investimento, o sistema proporciona um conforto térmico a mínimos custos e impactos ambientais (Heat Pump Technology: Systems Design, Installation, and Troubleshooting, n.d.; MacKay, 2008).

Um outro ponto a ser considerado fundamenta-se no pacote de diretivas da União Europeia que surgiu do Acordo de Paris para a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). De acordo com este pacote, diversas medidas foram tomadas (Barandier & Cardoso, 2022), entre elas, o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (APA, 2019) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (Portuguesa, n.d.). Deste modo, todos os equipamentos que utilizam quaisquer fontes energéticas que resultem na emissão de algum tipo de GEE devem ser substituídos nos próximos anos.

Consequentemente, com base nas informações supracitadas e por meio de uma simulação desenvolvida em Python, este trabalho analisa e discute as BC que operam segundo o ciclo de compressão de vapor aerotérmicas e geotérmicas, levando em conta o seu desempenho em relação às temperaturas do ar e do solo. Tudo isto, com o propósito de identificar as melhores e mais viáveis alternativas para a substituição dos atuais equipamentos e, assim, garantir uma fiável gestão dos ativos das instalações.

Visto que a carga térmica das instalações ainda deve ser estimada a fim de garantir um dimensionamento correto do sistema, as análises comparativas apresentadas entre os dois tipos de equipamento, no presente artigo, são realizadas tomando em consideração uma potência térmica de 1 kW, quer para arrefecimento, quer para aquecimento. Deste modo, ao considerar equipamentos com uma mesma potência elétrica, independentemente da carga térmica do local, os resultados manter-se-ão válidos. Isto ocorre uma vez que o desempenho das BC é adimensional, sendo este a razão entre a potência térmica e a potência elétrica como será elucidado no capítulo 3. A manutenção destes parâmetros é realizada por meio dos já referidos chillers e caldeiras.

2. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES

O biotério da Faculdade de Ciências da Saúde (FCS) da Universidade da Beira Interior (UBI), localiza-se na cidade da Covilhã, Portugal (Figura 1). Com uma área de 630 m², o seu principal propósito é abrigar algumas espécies de animais, tais como coelhos e ratos, empregues para as atividades de ensino e investigação. Visto que a Covilhã se encontra na região da Beira Interior, há uma significativa variação climática ao longo de todo o ano, com uma temperatura média máxima de 34 °C e uma temperatura mínima de -4 °C. Apesar do clima e temperatura no exterior, o biotério necessita que as condições internas sejam mantidas ininterruptamente a uma temperatura e humidade relativa constantes de 21 °C e 50%, respetivamente.

FIGURA 1: Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior.



3. BOMBAS DE CALOR

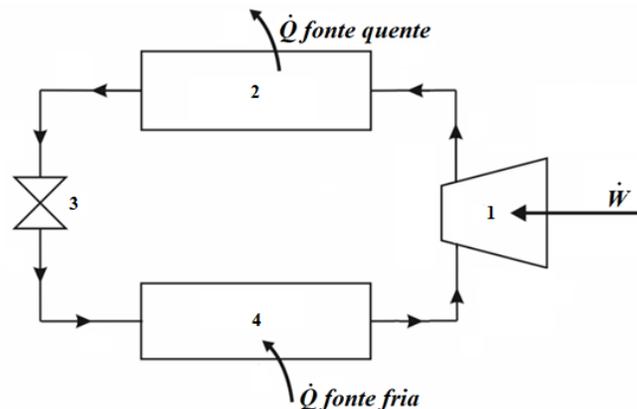
As bombas de calor podem ser categorizadas como químicas, de absorção ou de compressão (Osterman & Strith, 2021). No entanto, serão analisadas no presente trabalho apenas as BC de compressão. As BC baseiam-se fundamentalmente num ciclo de Carnot Inverso, isto é, em vez de transformar energia térmica em energia mecânica,

faz o oposto, converte a energia mecânica em energia térmica. Deste modo, com base na segunda lei da termodinâmica, mais precisamente o enunciado de Clausius, as BC transferem calor de uma fonte fria para uma fonte quente através de um fluido denominado fluido refrigerante, possibilitando, conseqüentemente, o arrefecimento e o aquecimento de espaços e produção de águas quentes sanitárias (AQS) (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

De acordo com Duarte (2013), as BC que operam de acordo com o ciclo de compressão de vapor são compostas por quatro componentes principais, sendo estes o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador. Outros componentes auxiliares podem, ou não, estar presentes, tais como, acumulador, recetor, separador de óleo, filtro, secador, válvula de retenção e válvula solenóide. Um ciclo básico de compressão de vapor com os seus quatro componentes fundamentais é apresentado na Figura 2. Este ciclo termodinâmico pode ser descrito do seguinte modo:

1. **Compressor:** que eleva a pressão e, conseqüentemente, a temperatura do fluido refrigerante já previamente aquecido após sair do evaporador. Devido ao gradiente de pressão gerado, o compressor faz com que o fluido refrigerante circule por todo o ciclo termodinâmico;
2. **Condensador:** que transfere a energia térmica do fluido refrigerante durante a sua compressão para a fonte quente, podendo esta ser o ambiente ou a água a ser aquecida;
3. **Válvula de Expansão:** que reduz a pressão do fluido refrigerante para, assim, reduzir a temperatura do mesmo para uma temperatura inferior à do ambiente;
4. **Evaporador:** que transfere a energia térmica da fonte fria para o fluido refrigerante e o encaminha para o compressor, a fim de reiniciar o ciclo termodinâmico.

FIGURA 2: Ciclo Básico de Compressão de Vapor.



A principal vantagem destes equipamentos é a sua reversibilidade, isto é, a capacidade de tanto aquecer como arrefecer. Isto só é possível devido à capacidade de inverter o ciclo termodinâmico e, deste modo, inverter a direção do fluxo do fluido refrigerante por meio de uma válvula inversora, ou válvula de quatro vias, como também é conhecida. Dependendo do modo de operação, aquecimento ou arrefecimento, as funções dos permutadores de calor externo e interno são alteradas. Por outras palavras, no caso do aquecimento, o permutador de calor interno é o condensador e o externo o evaporador. No caso do arrefecimento, o permutador de calor interno torna-se o evaporador e o externo o condensador (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

É importante enfatizar o facto de que o compressor é o elemento mais importante de todo o sistema, principalmente no que se refere ao tamanho, custos e consumo energético. As bombas de calor mais básicas apresentam



compressores de velocidade fixa, isto é, o seu funcionamento ocorre apenas para a potência total. Deste modo, o compressor do sistema deve ser ligado e desligado frequentemente para, assim, manter uma determinada temperatura interna. Estes arranques e paragens do sistema implicam uma redução do rendimento do sistema e podem causar variações indesejadas na temperatura pretendida, como por exemplo, ultrapassar a temperatura desejada no aquecimento ou reduzi-la no arrefecimento (Staffell et al., 2012).

O desempenho de uma bomba de calor é caracterizado pelo Coefficient of Performance (COP), que é estimado pela razão da energia térmica fornecida ao ambiente pela energia elétrica utilizada. De acordo com Osterman & Stritih (2021), alguns autores consideram apenas a energia elétrica utilizada pelo compressor, no entanto, a energia elétrica utilizada pelos equipamentos auxiliares, tais como, bombas circuladoras e ventiladores adicionais também deveriam ser considerados (Equação 1). É importante salientar que o COP de aquecimento pode ser diferente do de arrefecimento, de modo que é necessário analisar os dois separadamente.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_{compressor} + \dot{W}_{auxiliares}} \quad (1)$$

O COP de qualquer BC é inversamente proporcional ao gradiente de temperatura (ΔT) entre a fonte fria e a fonte quente, isto é, quanto maior for o diferencial de temperatura entre os ambientes nos quais se encontram o evaporador e o condensador, respetivamente, menor será o desempenho do sistema (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

Apesar de existirem diversos tipos de Bombas de Calor, tais como Ar-Água, Água-Água, Salmoura-Água, Ar-Ar, Água-Ar, Salmoura-Ar, as BC podem ser divididas em duas categorias principais de acordo com a localização do permutador de calor externo, sendo estas as BC aerotérmicas e as BC geotérmicas (Staffell et al., 2012; Carroll et al., 2020).

3.1. BOMBAS DE CALOR AEROTÉRMICAS

As BC aerotérmicas, são aquelas que utilizam o ar externo como fonte fria ou fonte quente, conforme a operação em curso. As BC aerotérmicas são extremamente populares em muitos países e muito utilizadas devido à sua ampla variedade de aplicações, à sua flexibilidade e ao seu menor custo de investimento (Staffell et al., 2012; Osterman & Stritih, 2021).

Esta flexibilidade resulta da facilidade de instalação em edifícios já existentes e com pouco espaço disponível, onde outras alternativas seriam inviáveis, como é o caso de apartamentos e outras áreas com uma alta densidade urbana (Carroll et al., 2020). Além disso, numa perspetiva económica, Jenkins et al. (2008) conduziu uma análise económica, no Reino Unido, da qual resulta que as BC aerotérmicas podem apresentar uma redução de quase 60% dos custos anuais em comparação com sistemas de caldeiras e ar-condicionado.

Este tipo de bombas de calor pode ser subdividido em duas categorias, os sistemas Ar-Ar e os sistemas Ar-Água. Na primeira categoria, a energia térmica é distribuída através das condutas de ar do local; já na segunda categoria, a energia térmica é distribuída através de ventilo-convetores, radiadores ou de pisos radiantes (Carroll et al., 2020). Apesar da segunda categoria ser mais utilizada para o aquecimento de ambientes e de águas sanitárias, também é possível a sua utilização para o arrefecimento de ambientes.

As bombas de calor aerotérmicas apresentam, contudo, algumas desvantagens. Devido ao facto de que um maior gradiente de temperatura implica uma redução do desempenho do equipamento, o rendimento das BC aerotérmicas é, geralmente, reduzido nos períodos de maior necessidade de climatização, principalmente no que se refere ao

aquecimento, em virtude de uma maior variação da temperatura do ar ao longo do dia e ao longo do ano (Deng et al., 2019).

Além disso, durante os períodos de aquecimento em locais mais frios e com uma elevada humidade relativa do ar, a exposição do permutador de calor externo acarreta o risco de congelamento do mesmo. Este risco pode, porém, ser amenizado ao instalar o equipamento num local resguardado ou ensolarado (Carroll et al., 2020; Osterman & Strith, 2021).

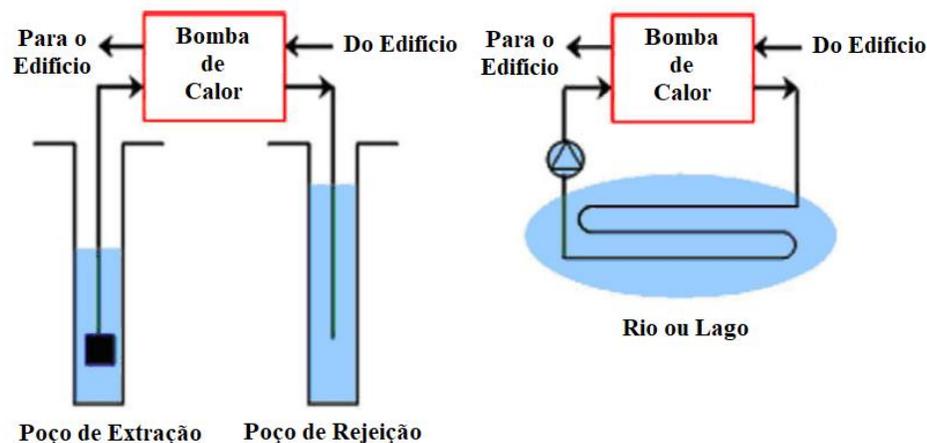
3.2. BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

As bombas de calor geotérmicas, utilizam a terra como fonte quente ou fonte fria, de acordo com a operação em curso. Isto é concretizado por meio de permutadores de calor enterrados no subsolo, o que permite a exploração de uma ótima fonte térmica, podendo esta ser o solo, propriamente dito, ou a água subterrânea. No entanto, a instalação de um sistema geotérmico é significativamente mais dispendiosa e disruptiva, visto que necessita de mais espaço (Mustafa Omer, 2008; Staffell et al., 2012).

As BC geotérmicas são compostas por três subsistemas, sendo estes o subsistema de conexão geotérmico, o subsistema da BC e o subsistema de distribuição. Visto que tais equipamentos podem utilizar a água subterrânea ou o solo, estas são também categorizadas de acordo com o seu subsistema de conexão com a fonte térmica, podendo este ser de circuito aberto ou de circuito fechado. Quando a fonte térmica utilizada é a água subterrânea, a conexão pode ser tanto mediante um circuito aberto quanto fechado. Quando a fonte térmica utilizada é o solo, a conexão é exclusivamente de circuito fechado (Sarbu & Sebarchievici, 2014; Atam & Helsen, 2016).

Nos sistemas de circuito aberto utiliza-se a água de poços artesianos, rios ou lagos (Figura 3). Estes sistemas extraem a água, utilizam-na na troca térmica e, em seguida, rejeitam-na de volta para os recursos hídricos de origem. Embora seja uma opção geotérmica mais barata, visto que pode ser implementada com poços artesianos simples, esta é limitada por fatores como disponibilidade dos recursos hídricos, impurezas na água que podem danificar o sistema e até mesmo as regulações ambientais vigentes relativas ao uso da água subterrânea (Staffell et al., 2012).

FIGURA 3: Circuitos Abertos de Bombas de Calor Geotérmicas. Adaptado de: Sarbu & Sebarchievici (2014).

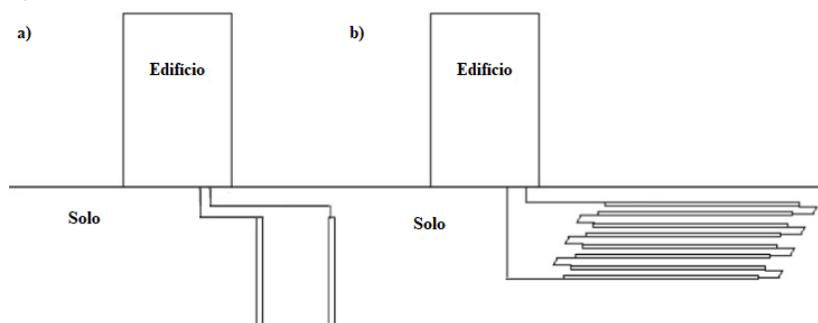


Os circuitos fechados podem ser verticais ou horizontais (Figura 4). Estes circuitos constituem os sistemas mais comuns. Tais sistemas podem ser de expansão direta ou indireta. Nos sistemas de expansão direta o fluido refrigerante circula por tubos de cobre permitindo, assim, uma transferência de calor diretamente entre os tubos e a fonte térmica. Os sistemas de expansão indireta realizam a troca térmica mediante um permutador de calor secundário, no qual circula água ou salmoura. Apesar dos sistemas de expansão direta apresentarem um rendimento relativamente mais elevado, tais sistemas são limitados pelo facto de que o circuito deve ser inteiramente soldado

no mesmo local e requer uma maior carga de fluido refrigerante, cerca de 3 a 10 vezes a carga de um sistema de expansão indireta. Deste modo, tais sistemas caíram num maior desuso devido às regulamentações vigentes, no que se refere às fugas de fluidos refrigerantes. A maior desvantagem dos circuitos fechados, quer verticais quer horizontais, é que, requerem, para além de um estudo geológico do local, a escavação no local, o que eleva significativamente os custos de instalação (Staffell et al., 2012; Lucia et al., 2017).

Apesar dos custos de instalação dos sistemas geotérmicos serem significativamente mais elevados, quando comparados com os sistemas aerotérmicos, aqueles apresentam um rendimento substancialmente maior. Isto deve-se ao facto da temperatura da terra, ao contrário da do ar, dispor de uma maior constância não só ao longo de todo o dia, mas também de todo o ano (Atam & Helsen, 2016; Osterman & Strith, 2021).

FIGURA 4: Circuitos Fechados de Bomba de Calor Geotérmica. a) Circuito Vertical b) Circuito Horizontal. Adaptado de: Lucia et al. (2017).



4. COMPARAÇÃO ENTRE AS BC AEROTÉRMICAS E GEOTÉRMICAS NA LITERATURA

De Swardt e Meyer (2001) conduziram um estudo no qual foi efetuada uma análise comparativa entre o desempenho de BC aerotérmicas e geotérmicas de circuito fechado, sendo ambos os equipamentos reversíveis. Nesse estudo foi analisada, ao longo de todo um ano, a relação entre parâmetros referentes às temperaturas do ar e do solo em diversas profundidades, e também, a humidade relativa do ar, e o desempenho dos equipamentos. O gradiente dos valores medidos pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 5, onde é possível perceber que a profundidade do solo é diretamente proporcional a constância da temperatura ao longo do ano.

Atendendo a que, conforme mencionado anteriormente, o gradiente térmico entre a fonte fria e a fonte quente, tem um impacto direto no desempenho do equipamento, e a que o solo apresenta uma maior invariabilidade na temperatura quando comparado ao ar, no referido estudo as BC geotérmicas apresentam um COP consideravelmente maior, de aproximadamente 19% para o arrefecimento e 13% para o aquecimento, tal como pode ser visto nas Figuras 6 e 7, respetivamente (De Swardt & Meyer, 2001). É importante salientar que o estudo foi realizado na África do Sul, de modo que os períodos de arrefecimento e aquecimento são contrários aos do hemisfério norte.

Visto que os sistemas geotérmicos, apesar de requererem um maior investimento inicial, apresentam um rendimento consideravelmente maior, em virtude de uma menor variação do gradiente térmico, os custos operacionais destes acabam por serem inferiores aos dos sistemas aerotérmicos (De Swardt & Meyer, 2001), o que pode justificar a sua aquisição em determinados casos, como é, possivelmente, o caso do biotério, uma vez que requer uma utilização constante do sistema AVAC.



FIGURA 5: Propriedades mensais do ar e do solo (Pretoria, África do Sul) ao longo de um ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).

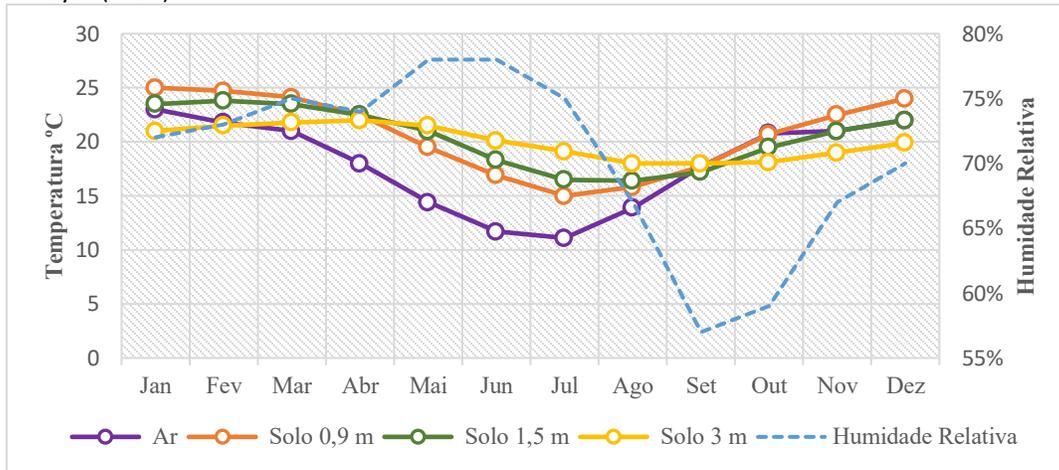


FIGURA 6: COP de arrefecimento ao longo do ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).

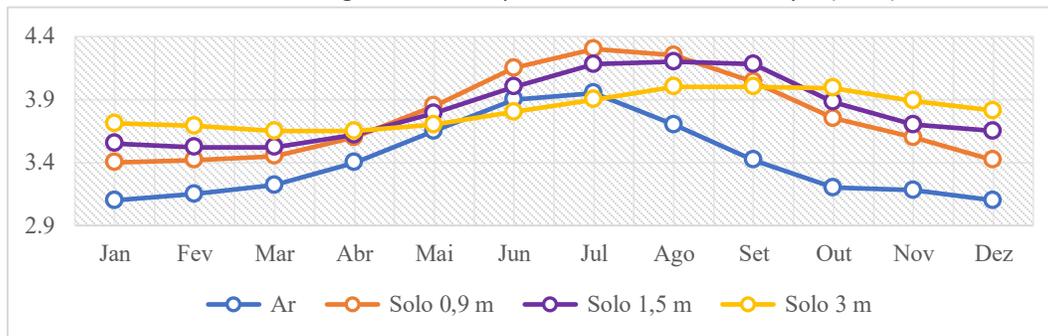
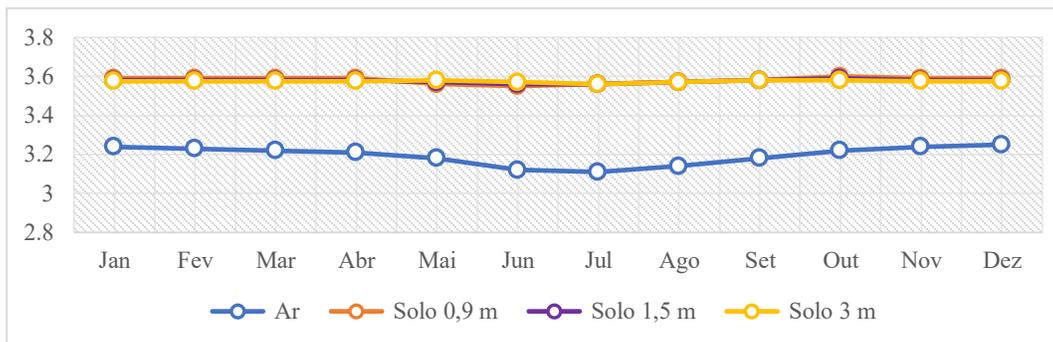


FIGURA 7: COP de aquecimento ao longo do ano. Adaptado de: De Swardt & Meyer (2001).



5. CASO DE ESTUDO

O presente caso estudo justifica-se pelo facto de que somente o sistema AVAC representa 70% da eletricidade consumida no biotério. E este, apesar de corresponder a menos de 3% da área da FCS, representa cerca de 7% do consumo total das instalações. Além disso, o consumo médio por metro quadrado do biotério representa mais do que o triplo do resto das instalações, sendo estes 218 kWh/m² e 70 kWh/m², respetivamente (Barandier, 2020; Barandier & Cardoso, 2022).

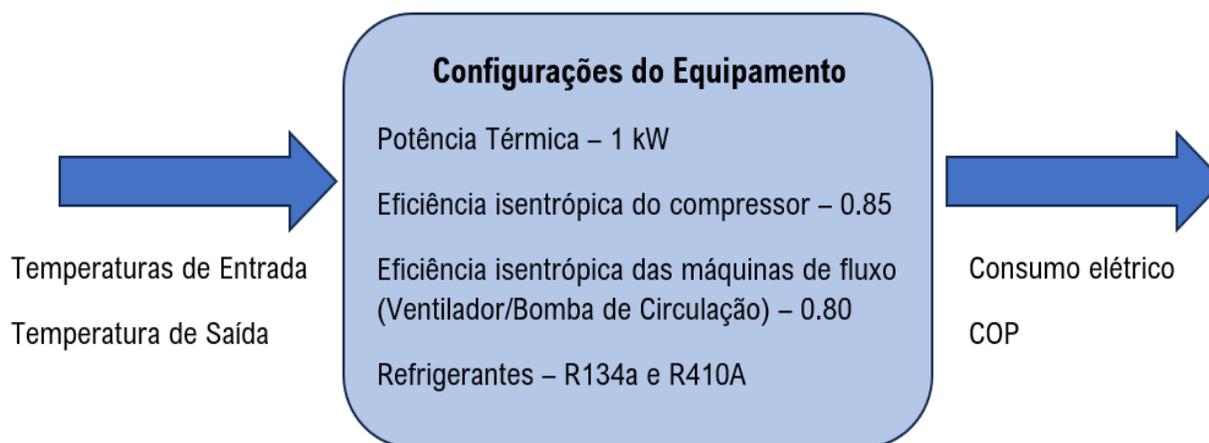
Visto que os *chillers* e caldeiras, responsáveis pelo arrefecimento e aquecimento, respetivamente, se encontram, atualmente, no fim da sua vida útil, deverão ser consideradas alternativas para uma eficiente gestão destes ativos. Além disso, uma vez que se trata de um ambiente crítico, tais equipamentos devem funcionar ininterruptamente a fim de manter as condições internas, o que acaba por elevar o consumo energético das instalações.



Com o propósito de avaliar qual a melhor solução para o local, duas BC com a mesma configuração, com exceção da fonte externa, foram consideradas. As modelações de uma BC aerotérmica e de uma BC geotérmica foram realizadas em Python por meio do pacote TESPy, *Thermal Engineering Systems in Python*, (Witte & Tuschy, 2020) e ambos os equipamentos foram simulados quer para o aquecimento quer para o arrefecimento do local. Uma melhor exemplificação do algoritmo encontra-se ilustrada na Figura 8, onde os dados de entrada referem-se às temperaturas da fonte quente e da fonte fria a fim de fornecer ou retirar 1 kW de carga térmica nas operações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Para a BC geotérmica, foi selecionado um circuito fechado dado que uma análise hidrológica do local ainda deverá ser realizada para verificar a disponibilidade da utilização dos recursos hídricos. Ainda que possam possuir outros componentes que melhorem o COP, tais como acumuladores, depósitos de líquido e sistemas de armazenamento térmico, o ciclo termodinâmico básico de compressão de vapor mencionado anteriormente foi selecionado para uma maior simplicidade do sistema.

FIGURA 8: Fluxograma do Algoritmo.



Os dados relativos às temperaturas do ar utilizados na simulação da BC aerotérmica correspondem às temperaturas médias mínimas e máximas, registadas durante o inverno e o verão, uma vez que são os períodos de maior utilização do equipamento. Já os dados relativos às temperaturas do solo na simulação da BC geotérmica foram coletados a diversas profundidades como se descreve na secção 5.1. As temperaturas consideradas neste estudo podem ser encontradas nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1: Temperatura do Ar Externo.

TEMPERATURA DO AR EXTERNO, NO INVERNO (°C)	TEMPERATURA DO AR EXTERNO, NO VERÃO (°C)
-4	26
-2	28
0	30
2	32
4	34
6	36
8	38
10	40



5.1. RECOLHA DE DADOS GEOTÉRMICOS

Procedeu-se à realização de 12 furos com uma profundidade de 100 metros, numa zona de afloramento granítico, no Vale do rio Alva, no concelho de Oliveira do Hospital. Ainda que o local de perfuração não corresponda exatamente ao local de estudo, por se encontrarem na mesma região, os valores de temperatura podem ser considerados homogêneos. Todas as captações apresentam características idênticas de furação. Apresenta-se um exemplo típico:

- Furos com inclinação vertical.
- Método de furação: Rotopercurssão.
- Profundidade máxima: 100 m.
- Diâmetro: iniciou-se com 12" até 6 m, continuou com 10" até 80 m, e finalizou-se com 6,5" até aos 100 m, sendo necessário o estrangulamento por conta de pressões laterais.
- Embuquilhamento: Um tubo liso de PVC com densidade 12,5 kg/m² e 190 mm de diâmetro foi inserido até uma profundidade de 64 m. Em seguida, com o propósito de impedir eventuais misturas com água de aquíferos superiores e do Rio Alva, foi aplicado maciço filtrante em material impermeável (cimentação).
- Sequência geológica atravessada: terreno vegetal de 0,3 m, granito essencialmente biotítico, porfiróide de grão grosseiro, até aos 100 m com diferentes estágios de alteração e de fraturação.

De todos estes furos apenas um se apresenta produtivo, com água mineral natural do tipo sulfúrea, com um caudal da ordem de 10 l/s. Este recurso hidromineral embora de baixa entalpia, constitui uma ótima reserva energética que se conserva de forma permanente ao longo do ano.

As temperaturas em todos os furos, produtivos ou não, foram registadas com o auxílio de uma sonda multiparamétrica. As temperaturas efetuadas ao longo do ano apontam para um gradiente de temperatura constante entre os 15 °C (mais próximo à superfície) e os 28 °C até aproximadamente 20 metros, apresentando 33 °C até aos 100m.

Os furos sem produtividade, permaneceram em *open hole*, isto é, abertos. Nestes furos, os registos de temperatura apresentam valores entre os 15 e os 100 m de profundidade, nos quais a temperatura registada é constante e de cerca de 26 °C.

TABELA 2: Temperatura do solo.

PROFUNDIDADE (M)	TEMPERATURA DO SOLO (°C)
1	15
2	18
4	21
8	24
16	26
20	28

O sistema/equipamento preconizado pressupõe a instalação de uma bomba de calor geotérmica, com sistema de captação vertical no furo, com recuperação de calor através de um segundo condensador, possibilitando desta forma a produção de água quente e de água fria em simultâneo. De referir que a água fria produzida será, em termos energéticos, praticamente gratuita, aproveitando para tal, a energia despendida na produção de água quente. Em complemento às bombas de calor geotérmicas serão instalados depósitos de acumulação de água quente e água fria. Estes irão funcionar como acumuladores de inércia térmica permitindo que em situações de cargas parciais, previsivelmente um quarto do período de funcionamento da instalação, não será necessário o recurso ao funcionamento das bombas de calor geotérmicas, ficando a instalação a funcionar apenas com a energia acumulada nos depósitos de inércia — funcionamento a carga parcial.



A bomba de calor geotérmica faz trocas de calor com o recurso, tirando partido da temperatura aproximadamente constante a que ele se encontra em sistema fechado. No Verão é energeticamente mais eficiente conseguir a temperatura confortável de 22 °C, partindo do sistema projetado em recuperação de energia, já que a carga térmica necessária para manter as temperaturas desejadas é similar às necessidades de arrefecimento do edifício. Existe apenas permuta entre o recurso hidromineral quando o sistema deixa de estar em equilíbrio.

Com base nestes dados o COP das BC para diversas temperaturas foi calculado. Ainda que seja possível calculá-lo para os mais diversos fluidos refrigerantes, as simulações do presente estudo foram efetuadas utilizando o R134a e o R410A. Estes fluidos, apesar de serem hidrofluorcarbonetos que nos próximos anos serão descontinuados em virtude das vigentes regulações, ainda são utilizados em muitos sistemas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser visto a seguir, o desempenho das BC geotérmicas é superior ao das aerotérmicas em ambas as operações de aquecimento e arrefecimento quer com o fluido refrigerante R134a quer com o R410A.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os COP das BC geotérmica e aerotérmica com R134a como fluido refrigerante. Os cenários considerados foram quer o modo de aquecimento quer de arrefecimento em diversas temperaturas do solo e do ar. No modo de aquecimento, Figura 9, considerando-se as temperaturas mínimas do solo e do ar, 15 e -4 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,97) revelou-se 48% superior ao da BC aerotérmica (2,69). No modo de arrefecimento com o mesmo fluido, Figura 10, e com as temperaturas máximas do solo e do ar de 28 e 40 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,70) também se revelou superior (2,71). Desta vez, em cerca de 37%.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os COP das BC geotérmica e aerotérmica, desta vez com R410A como fluido refrigerante. Os cenários considerados foram os mesmos. No modo de aquecimento, Figura 11, considerando-se as temperaturas mínimas do solo e do ar, 15 e -4 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,70) revelou-se cerca de 44% superior ao da BC aerotérmica (2,57). No modo de arrefecimento, Figura 12, com o mesmo fluido e com as temperaturas máximas do solo e do ar de 28 e 40 °C, respetivamente, o COP da BC geotérmica (3,38) também se revelou superior (2,34). Desta vez, em cerca de 44%.

FIGURA 9: COP de aquecimento x temperatura do ar e do solo — R134a.

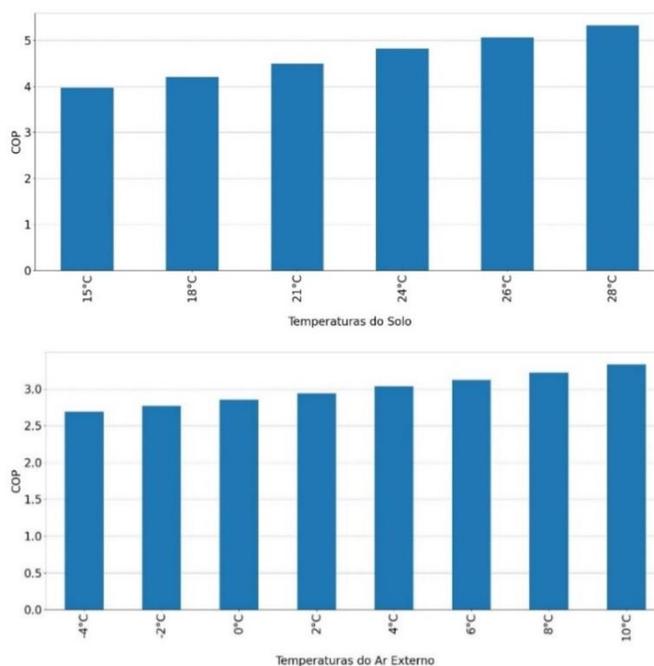




FIGURA 10: COP de Arrefecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R134a.

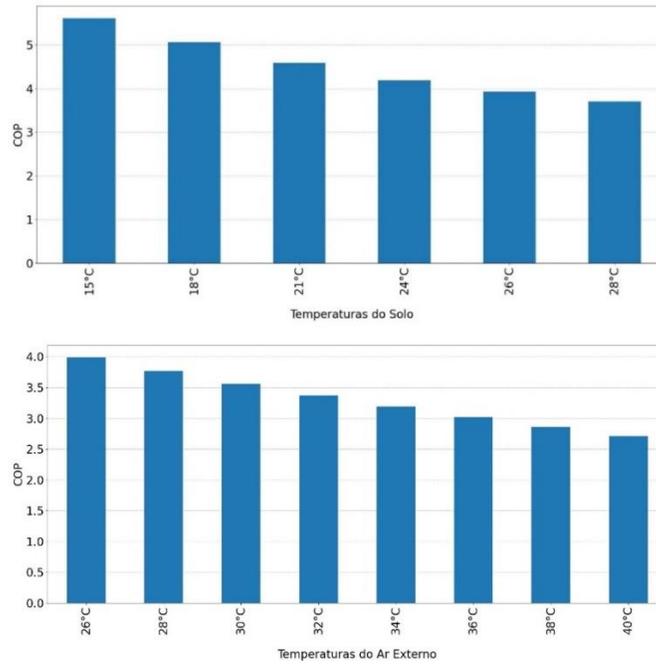


FIGURA 11: COP de Aquecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R410A.

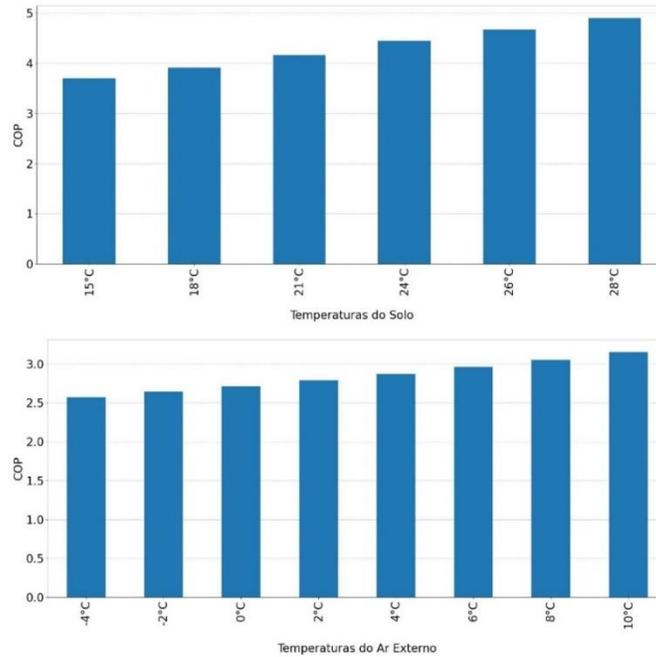
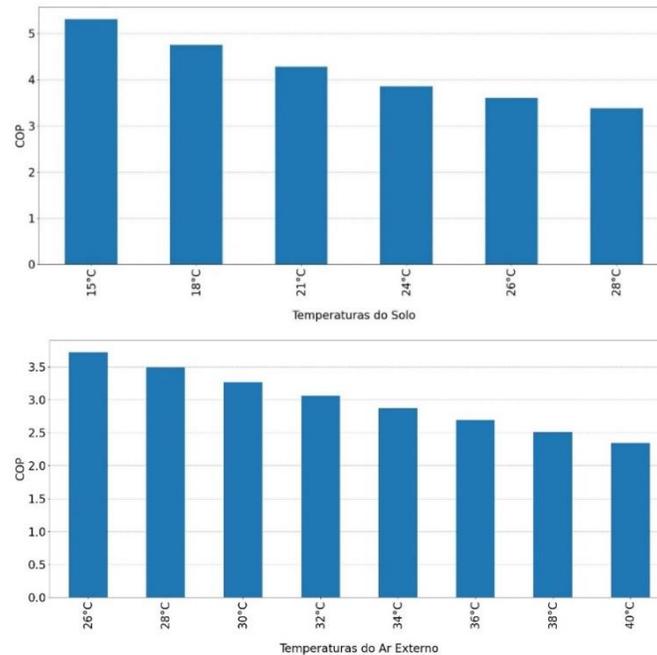


FIGURA 12: COP de Arrefecimento x Temperaturas do Ar e do Solo — R410A.



6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma breve discussão e análise no que se refere às tecnologias de bombas de calor aerotérmicas e geotérmicas. Esta análise insere-se na tomada de decisão acerca de alternativas de projetos de investimento relativos à substituição de equipamentos AVAC, *chillers* para o arrefecimento e caldeiras para o aquecimento, que já se encontram num período de fim de vida útil. Tal gestão de ativos reveste-se de suma importância, visto que a mesma se refere a um ambiente crítico, concretamente um biotério, onde o sistema AVAC é ininterruptamente utilizado e qualquer anomalia no seu funcionamento pode assumir consequências drásticas.

Apesar das bombas de calor aerotérmicas, quando comparadas às geotérmicas, apresentarem uma maior vantagem no que se refere aos custos de aquisição, por constituir um investimento inicial mais reduzido, esta tecnologia também se revela particularmente vulnerável às alterações climáticas e propriedades do ar, o que pode afetar negativamente o seu desempenho e, por consequência, os seus custos operacionais, restringindo, assim, a viabilidade do investimento.

No que se refere à tecnologia geotérmica, a qual pode apresentar diversos tipos, para além da necessidade de um investimento inicial relativamente maior, é também necessário tomar em consideração a instalação do subsistema de conexão geotérmico, visto que requer mais espaço, caso a conexão geotérmica seja diretamente no solo, ou a disponibilidade de recursos hídricos, caso a conexão geotérmica seja efetuada com recurso a poços, rios ou outra fonte hídrica. No entanto, para além de um recurso renovável, a energia geotérmica apresenta diversas vantagens relativamente a outras fontes de energia renováveis e tradicionais, visto não sofrer, nomeadamente, da intermitência e inconstância de fatores meteorológicos que condicionam, por exemplo, a energia eólica, solar térmica e fotovoltaica ou hídrica. Deste modo, a tecnologia geotérmica apresenta um desempenho consideravelmente maior, e por consequência, menores custos operacionais.

Embora seja ainda necessário efetuar um cálculo exaustivo da carga térmica de todo o biotério, para determinar de forma adequada os requisitos de aquecimento e arrefecimento, as tecnologias de bombas de calor geotérmicas revelam-se, porventura, mais vantajosas, numa perspetiva económica, o que constituirá um dos trabalhos a serem desenvolvidos futuramente. Isto deve-se ao facto de que, dependendo das circunstâncias, o equipamento pode ter



um COP superior em mais de 100% em relação às bombas de calor aerotérmicas. Deste modo, a aquisição das BC geotérmicas pode ser justificada pelo facto de que estas apresentam custos operacionais consideravelmente menores e que estarão num regime de funcionamento ininterrupto.

Atendendo a que o local dispõe de espaço suficiente de implantação, bem como de recursos hídricos, conclui-se que há diversas possibilidades para a implementação de um sistema de tecnologia geotérmica. Por forma a determinar o tipo mais adequado de sistema, está prevista a realização a curto-prazo de um estudo geológico e hidrológico do local. Antevê-se, no entanto, que circuitos fechados verticais, conectados diretamente no solo, se podem revelar como uma ótima solução, dado que o local não sofreria uma disrupção tão intensa devido ao processo de escavação e não seria necessária a utilização de recursos hídricos.

Em conclusão, para além dos fatores económicos, também fatores operacionais e ambientais, como a unificação dos sistemas de aquecimento e arrefecimento e a redução das emissões de GEE, respetivamente, a substituição dos atuais equipamentos de AVAC, ainda que apenas para a zona do biotério, por bombas de calor de compressão de vapor, revela-se como uma solução promissora para uma eficiente estratégia na gestão dos ativos do sistema AVAC de um ambiente crítico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projeto POCI-01-0145-FEDER-029494; e por Fundos Nacionais através da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito dos Projetos PTDC/EEI-EEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020.

REFERÊNCIAS

APA. (2019). *Plano Nacional Energia e Clima. Plan Nacional de Energia y Clima 2021–2030 (PNIEC), 2030(Pnec 2030)*, 1–200. <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Paginas/DetalleParticipacionPublica.aspx?k=236>

Atam, E., & Helsen, L. (2016). Ground-coupled heat pumps: Part 1 — Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1653–1667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.007>

Barandier, P. H. N. C. W. (2020). *O Controlo da Qualidade e Manutenção na Gestão Energética Associada à Redução de Custos Mediante a Implementação de Princípios Lean e Ferramentas da Qualidade*. MSc Thesis, Universidade da Beira Interior (Portugal).

Barandier, P., & Cardoso, A. J. M. (2022). *Asset Management and Energy Improvements in a Critical Environment — The Case of a University Bioterium* (pp. 364–373). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96794-9_33

Carroll, P., Chesser, M., & Lyons, P. (2020). Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>

CEN/TC 247. (2006). *prEN 15232 (official 2007)*. Energy performance of buildings — Impact of Building Automation Control and Building Management. 00247046, 1–63.

De Swardt, C. A., & Meyer, J. P. (2001). A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, 25(10), 899–910.



- Deng, J., Wei, Q., Liang, M., He, S., & Zhang, H. (2019). Does heat pumps perform energy efficiently as we expected: Field tests and evaluations on various kinds of heat pump systems for space heating. *Energy and Buildings*, 182, 172–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.014>
- Duarte, M. V. (2013). *Estudo da bomba de calor — Fluidos de trabalho e eficiência energética* (Master's dissertation). Retrieved from Ubi Thesis.
- FMUC. (n.d.). *Biotério*. Biotério. Retrieved December 10, 2020, from <https://www.uc.pt/fmuc/bioterio>
- Institui, A., & Oficial, J. (2019). ► *B DIRECTIVA 2010/63/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 22 de Setembro de 2010 relativa à protecção dos animais utilizados para fins científicos*. 19, 1–61.
- Jenkins, D., Tucker, R., Ahadzi, M., & Rawlings, R. (2008). The performance of air-source heat pumps in current and future offices. *Energy and Buildings*, 40(10), 1901–1910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.015>
- Langley, B. C. (1989). *Heat Pump Technology: Systems Design, Installation, and Troubleshooting* (2.^a ed.). Prentice Hall.
- Lucia, U., Simonetti, M., Chiesa, G., & Grisolia, G. (2017). Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 867–874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.268>
- MacKay, D. J. C. (2008). *Sustainable Energy—without the hot air*. UIT cambridge.
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Osterman, E., & Stritih, U. (2021). Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings. *Journal of Energy Storage*, 39, 102569.
- Portuguesa, R. (n.d.). *ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050) ESTRATÉGIA DE LONGO PRAZO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA DA ECONOMIA PORTUGUESA EM 2050 PT Ambiente*.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441–454. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., & Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy and Environmental Science*, 5(11), 9291–9306. <https://doi.org/10.1039/c2ee22653g>
- UBI. (2017). *Inauguração do BioBanco da Faculdade de Ciências da Saúde*. <https://www.ubi.pt/Noticia/5899>
- Witte, F., & Tuschy, I. (2020). Tespy: Thermal engineering systems in python. *Journal of Open Source Software*, 5(49), 2178.



DECLARAÇÃO ÉTICA

CONFLITO DE INTERESSE: Nada a declarar. **FINANCIAMENTO:** Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projeto POCI-01-0145-FEDER-029494; e por Fundos Nacionais através da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito dos Projetos PTDC/EEI-EEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020. **REVISÃO POR PARES:** Dupla revisão anónima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — REVISTA DE ATIVOS DE ENGENHARIA** é licenciado sob [Creative Commons](#), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.