



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO COM BOMBA DE CALOR EM CORRENTE GEOTÉRMICA**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## ***ENERGY SAVING WITH HEAT PUMP AND GEOTHERMAL***

**Autor**

**Gil Caldeira Ferreira Rocha**

**Orientadores**

**José Leandro Simões de Andrade Campos**

**Jorge Alexandre Costa de Andrade Vieira**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da  
**Silva Ribeiro**

**Vogais** Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor José Carlos Miranda Góis  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor José Leandro Simões de Andrade  
**Campos**

**Orientadores** Professor Associado da Universidade de Coimbra  
Engenheiro Jorge Alexandre Costa de Andrade Vieira  
Membro Convidado - Matereospace

**Matereospace**

---

MATEREO  
UMA UNIV. PARTICIPANTE EM UM MUNDO MELHOR

**Matereospace**

**Coimbra, Julho, 2016**



## **Agradecimentos**

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, um agradecimento aos meus orientadores: o Professor Doutor José Leandro Simões de Andrade Campos e o Engenheiro Jorge Alexandre Costa de Andrade Vieira, pelas suas orientações, constante motivação e profissionalismo.

À empresa Matereospace, por todos os conselhos oportunos e experiências constantes, que me foram bastante úteis, quer para o melhoramento na realização deste trabalho, quer para a valorização meu futuro profissional.

Um grande agradecimento aos meus pais e irmãos, por toda a motivação e apoio.

Aos meus amigos, o meu obrigado, pelo companheirismo e conselhos.



## Resumo

O objetivo do documento é a análise da *performance* de diferentes fluidos frigoríficos para aquecimento e arrefecimento, fazendo uma comparação entre duas fontes: uma aerotérmica e uma geotérmica. Foi também analisada a possibilidade de arrefecimento passivo e feita uma análise económica entre o sistema com fonte geotérmica e o sistema com fonte aerotérmica, utilizando como base uma habitação unifamiliar na Figueira da Foz, Portugal.

A habitação em estudo foi simulada com o programa HAP da Carrier, onde foram obtidos os valores de potência térmica de arrefecimento de 8.7 kW e de aquecimento de 12.9 kW

A análise dos fluidos frigoríficos, em aquecimento, com 40 °C de temperatura do condensador, demonstrou um aumento médio de 28% de eficiência do sistema geotérmico, face ao aerotérmico; e, com 65 °C de temperatura, revelou um aumento médio de 15%. Os fluidos r600 e r134a provaram ser os mais eficientes, com coeficientes de *performance* máximos de 6.8 e 6.56, respetivamente. Em arrefecimento, verificou-se um aumento médio de 34% para o sistema geotérmico, em relação ao aerotérmico, para uma temperatura de evaporação de -20 °C, em que o melhor valor de coeficiente de frio de 3.79 é obtido com o r600 e o segundo melhor, de 3.7, com o r134a.

A análise económica demonstrou um tempo de retorno mínimo, para a infraestrutura geotérmica, não incluindo furo, de um ano e três meses e um retorno efetivo ao fim de quinze anos, para uma habitação onde já existisse anteriormente um furo instalado. Um tempo de retorno de quatro anos e 6 meses é alcançado quando toda a infraestrutura, incluindo o furo, é contabilizada.

**Palavras-chave:** Geotermia, bombas de calor, eficiência, fluidos frigoríficos, arrefecimento passivo, COP.



## Abstract

The purpose of the document is the *performance* analysis of different thermal fluids for heating and cooling, comparing two sources, aérothermal and geothermal. It also analyzed the possibility for passive cooling and made an economic analysis of the system with geothermal source and aérothermal source using as baseline a single-family house in Figueira da Foz, Portugal.

The house was simulated with the Carrier software, HAP, where the values of 8.7kW for cooling and 12.9 kW for heating were obtained.

The analysis of the refrigerants demonstrates, in heating mode, a 28% increase in the efficiency of the ground system in comparison to the air system, for a temperature in the condenser of 40 °C, and a minimum of 15% for 65 °C. The refrigerants r600 and r134a proved to be the more efficient, with maximum coefficients of *performance* of 6.8 and 6.56 respectively. In cooling mode, a 34% increase in efficiency is observed for the geothermal system for the evaporator temperature of -20 °C, the best cooling *performance* of 3.79 is obtained with r600 and the second best of 3.7 with r134a.

The economic analysis demonstrates a minimum payback time, of the geothermal infrastructure, in one year and three months and an effective return at the end of fifteen years, for a family home where already existed a water borehole. A payback time of four years and six months is achieved when all the infrastructure, including the borehole, is taken into account.

**Keywords** Geothermal, heat pump, efficiency, refrigerants, passive cooling, COP.





---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiii
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Bombas de calor.....	3
2.2. Fluidos frigoríficos .....	8
2.3. Projeto europeu .....	8
2.3.1. Groundhit.....	9
2.3.2. Ground-Med .....	9
3. Projeto de climatização e ventilação .....	13
3.1. Descrição da habitação .....	13
3.1.1. Espaços climatizados.....	14
3.2. Ventilação .....	16
3.2.1. Caudal ar novo.....	16
3.2.2. Potência térmica .....	17
4. Estudo de fluidos térmico para aquecimento e arrefecimento.....	19
4.1. Temperaturas em estudo .....	19
4.2. Aquecimento .....	19
4.2.1. Valores de <i>performance</i> e pressão para modo de aquecimento de vários fluidos .....	20
4.3. Arrefecimento .....	24
4.3.1. Arrefecimento passivo.....	24
4.3.2. Arrefecimento ativo.....	25
5. Estudo de viabilidade económica .....	27
5.1. Cálculo energético anual.....	27
5.1.1. Período de retorno da bomba de calor com fonte geotérmica .....	28
6. Conclusões.....	31
Referências bibliográficas .....	33
Anexo A.....	35
Anexo B.....	37
Anexo C.....	41
Anexo D.....	53



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema (adaptado) do Sistema de Bomba de Calor com fonte geotérmica (Chua, Chou, & Yang, 2010). .....	4
Figura 2.2. Esquema de sistemas de Bomba de Calor Geotérmicos (adaptado) a) Sistema vertical fechado; b) Sistema horizontal fechado; c) Sistema vertical aberto ( <a href="http://www.altren.net/whathow.htm">http://www.altren.net/whathow.htm</a> ) .....	5
Figura 2.3. Demonstração do arrefecimento passivo ( <a href="http://www.calordaterra.com/geotermia_vertical.html">http://www.calordaterra.com/geotermia_vertical.html</a> ).....	6
Figura 2.4. Esquema do furo de GWHP (Rees <i>et al</i> , 2004). .....	7
Figura 2.5. Temperatura de ida e retorno da água nos furos geotérmicos (GroundHit, 2009) .....	9
Figura 2.6. Temperatura de ida e retorno da água nos furos geotérmicos (Carvalho, 2015). .....	10
Figura 2.7. Variação do COP com a variação da temperatura definida na bomba de calor.10	
Figura 2.8. Ground-Med: (a) Relação entre COP e temperatura do furo; (b) Potência Térmica em função da diferença entre a temperatura de saída da bomba de calor e de saída do furo (Carvalho, 2015). .....	11
Figura 2.9. Variação dos COP sazonais nas semanas analisadas (Carvalho, 2015). .....	11
Figura 3.1. Termostato HAP: (a) Ocupação Semana; (b) Ocupação Fim-de-semana.....	13
Figura 3.2. Piso 0: Sala de Jantar, Cozinha, Sala de Inverno e Sala de Verão .....	14
Figura 3.3. Plantas: (a) Piso 1 com três quartos e as respetivas I.S.; (b) Acesso ao Terraço .....	15
Figura 4.1. Diagrama pressão-entalpia do r134a (Coolpack).....	20
Figura 4.2. Coeficientes de <i>Performance</i> das temperaturas de evaporador de 2 °C (Aero) e 10 °C (Geo). .....	22
Figura 4.3. Ciclos de bomba de calor do r134a para temperaturas do condensador de 40 e 65 °C com temperaturas do evaporador de 2 e 10 °C. ( <i>Coolpack</i> ). .....	23
Figura 4.4. Pressões de saída do compressor para as temperaturas e fluidos em estudo. ...	23
Figura 4.5. Temperatura máxima à saída do compressor para fonte geotérmica. ....	24
Figura 5.1. Comparação Económica entre os sistemas Geotérmico e Aerotérmico.....	29
Figura A.1. Informações dos fluidos refrigerantes da Linde ( <a href="http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17_108590.pdf?v=3.0">http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17_108590.pdf?v=3.0</a> ).....	35
Figura B.1. Relatório Solterm do projeto de AQS .....	37

Figura B.2. Informação climática anual da Figueira da Foz do programa Solterm .....	38
Figura B.3. Relatório HAP, Potência térmica ventilação.....	39
Figura B.4. Relatório HAP, Potências térmicas máximas.....	40
Figura C.1. Diagrama p-h r134a com fonte geotérmica (Coolpack).....	41
Figura C.2. Diagrama p-h r134a com fonte aerotérmica (Coolpack).....	42
Figura C.3. Diagrama p-h r290 com fonte geotérmica (Coolpack).....	42
Figura C.4. Diagrama p-h r290 com fonte aerotérmica (Coolpack) .....	43
Figura C.5. Diagrama p-h r407c com fonte geotérmica (Coolpack).....	43
Figura C.6. Diagrama p-h r407c com fonte aerotérmica (Coolpack).....	44
Figura C.7. Diagrama p-h r410a com fonte geotérmica (Coolpack).....	44
Figura C.8. Diagrama p-h r410a com fonte aerotérmica (Coolpack).....	45
Figura C.9. Diagrama p-h r600 com fonte geotérmica (Coolpack) .....	45
Figura C.10. Diagrama p-h r600 com fonte aerotérmica (Coolpack) .....	46
Figura D.1. Diagrama p-h r134a com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack).....	53
Figura D.2. Diagrama p-h r290 com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack).....	53
Figura D.3. Diagrama p-h r407c com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack).....	54
Figura D.4. Diagrama p-h r410a com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack).....	54
Figura D.5. Diagrama p-h r600 com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack).....	54

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Inflamabilidade e fator de GEE dos fluidos em estudo .....	8
Tabela 3.1. Soluções Construtivas paredes, teto e janelas.....	15
Tabela 3.2. Caudal Ar Novo.....	16
Tabela 3.3. Potências térmicas máximas necessárias .....	17
Tabela 4.1. COP dos fluidos em estudo em múltiplas temperaturas .....	21
Tabela 4.2. COP de arrefecimento dos fluidos em estudo .....	26
Tabela 5.1. Energia Térmica e Elétrica Anual.....	27
Tabela 5.2. Preço, tempo de retorno e vantagem económica .....	29
Tabela C.1. Valores de Entalpia, pressão e COP para a fonte geotérmica .....	46
Tabela C.2. Valores de Entalpia, pressão e COP para a fonte aerotérmica.....	50
Tabela D.1. Valores de Entalpia, pressão e CF para a fonte geotérmica.....	55
Tabela D.2. Valores de Entalpia, pressão e CF para a fonte aerotérmica .....	55



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$Q$  – Potência térmica

$m$  – Caudal mássico

$cp$  – Calor específico

$\Delta T$  – Diferença de temperatura

### Siglas

AQS – Água Quente Sanitária

ASHP – *Air Source Heat Pump*, Bomba de calor com fonte aerotérmica.

CF- Coeficiente de frio

COP – *Coefficient Of Performance*. (Coeficiente de Desempenho)

GSHP – *Ground Source Heat Pump*, Bomba de calor com fonte geotérmica

SCOP – *Seasonal Coefficient Of Performance* (Coeficiente de Desempenho

Sazonal)





## 1. INTRODUÇÃO

As bombas de calor com fonte de calor geotérmica são sistemas de elevada eficiência e fiabilidade, com elevado potencial de crescimento e utilização como fonte aquecimento e arrefecimento em todo o mundo (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Estes sistemas contudo têm associado custos iniciais elevados, dissuadindo a sua utilização, divulgação e fornecedores (Chua, Chou, & Yang, 2010).

O sistema de GSHP (Ground Source Heat Pump) é considerado dos mais limpos na produção de energia térmica, pois transfere energia de fontes naturais com um consumo elétrico bastante reduzido (Chua, Chou, & Yang, 2010). Este é um dos objetivos da presente dissertação: demonstrar o funcionamento de uma bomba de calor com fonte geotérmica e valorizar a sua capacidade de climatizar um sistema unifamiliar.

Na Política Climática UE 2020, pretende-se a redução dos GEE (Gases de Efeito de Estufa), o aumento da eficiência energética e o aumento de energia a partir de energias renováveis em 20%. Os sistemas de bomba de calor com fonte geotérmica cumprem os três parâmetros acima referenciados, demonstrando o seu potencial como fonte de energia térmica.

A estrutura do texto que aqui se apresenta será a seguinte. No capítulo 2, a demonstração do funcionamento do sistema de bomba de calor e resultados de casos de estudo europeus de GSHP, em Portugal. No capítulo 3, a descrição da habitação unifamiliar, utilizada como base para este estudo, dando particular destaque às suas cargas de aquecimento, de arrefecimento e necessidades térmicas anuais. No capítulo 4, a análise de fluidos frigoríficos, nas condições de funcionamento de fonte aerotérmica e geotérmica, para aquecimento e arrefecimento e as suas diferenças em termos de eficiência. No capítulo 5, o estudo de viabilidade económica do sistema com fonte geotérmica, face ao aerotérmico. E, finalmente, no capítulo 6, as conclusões retiradas do estudo efetuado.

Ainda existe um longo caminho a percorrer na utilização dos GSHP, principalmente em Portugal. Espera-se que esta dissertação e as que a precederam venham a influenciar a sua generalização.



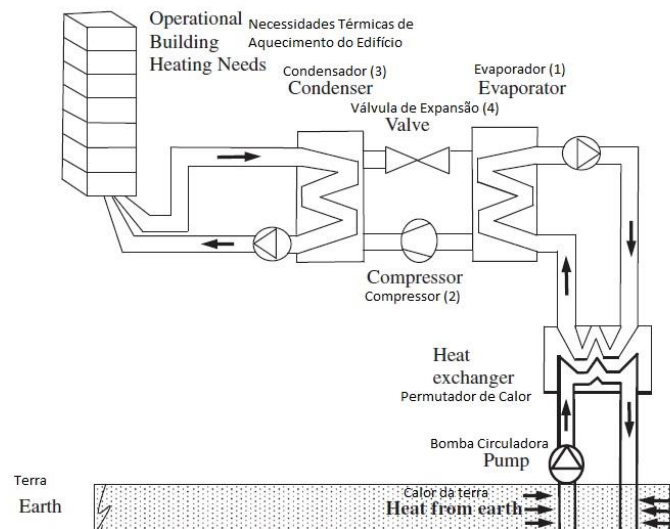
## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No presente capítulo é apresentada uma primeira abordagem a bombas de calor aerotérmicas e geotérmicas, do ponto de vista teórico/funcional. O capítulo apresenta ainda um levantamento de duas fases de um projeto europeu, que integrou estas tecnologias.

### **2.1. Bombas de calor**

As bombas de calor são sistemas que permitem transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente, com recurso ao ciclo inverso de Carnot, utilizando energia mecânica para produzir energia térmica (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Estes sistemas são considerados renováveis, devido à utilização dos recursos térmicos do ambiente (ar, terra e água) e por não libertarem emissões diretas para o ambiente.

Na Figura 2.1. está representado um esquema do ciclo de bomba de calor com fonte geotérmica. No ciclo ocorre evaporação do fluido refrigerante na fonte fria (1), compressão até aos valores de pressão e temperatura pretendidos para o condensador (2) no qual se liberta o calor e se condensa o fluido (3). Por fim, o fluido é encaminhado para a válvula de expansão (4), que diminui a pressão e arrefece o fluido até atingir uma temperatura inferior à da fonte de calor, de modo a permitir retirar calor ao meio e evaporar o fluido, completando assim o ciclo.



**Figura 2.1.** Esquema (adaptado) do Sistema de Bomba de Calor com fonte geotérmica (Chua, Chou, & Yang, 2010).

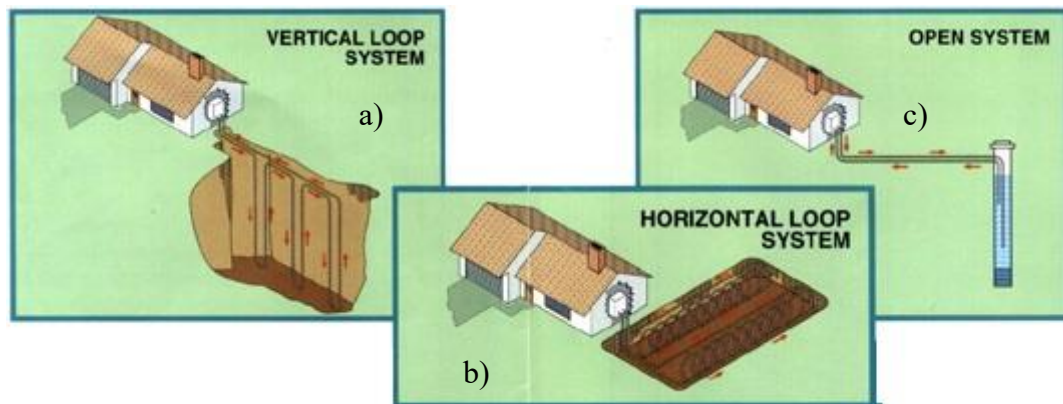
As bombas de calor com fonte geotérmica utilizam as vantagens de a temperatura do solo ou da água subterrânea serem praticamente constantes ao longo do ano, sem variações significativas da estação de aquecimento para a estação de arrefecimento.

As bombas de calor com fonte geotérmica podem ser de circuito aberto ou de circuito fechado. No circuito fechado é sempre a mesma água em circulação nos tubos, sem contacto direto com o ambiente. No circuito aberto a água é retirada do ambiente, através de infraestruturas próprias (por exemplo, furo de captação de água), e reposta posteriormente. As bombas de calor com fonte geotérmica com circuito fechado podem ser horizontais ou verticais.

Na Figura 2.2. mostram-se as principais diferenças entre cada esquema de montagem. O sistema vertical (a) é um dos mais comuns já que necessita de uma baixa área de ocupação. O sistema horizontal (b) é uma solução mais económica do que a solução vertical, mas tem uma área de ocupação muito superior, que representa cerca de uma vez e meia o espaço a climatizar. Porém, como a tubagem é soterrada, este sistema horizontal exige um estudo térmico local, de modo a que as alterações climáticas não afetem a sua eficiência.

Ainda na Figura 2.2. é apresentado o sistema vertical de circuito aberto (c), com aspiração e rejeição no furo de captação de água. Neste sistema, a temperatura de referência é a da água subterrânea e não a do solo, tal como é exemplificado nas figuras (a) e (b).

Esta é a solução que se pretende aprofundar com o presente estudo.



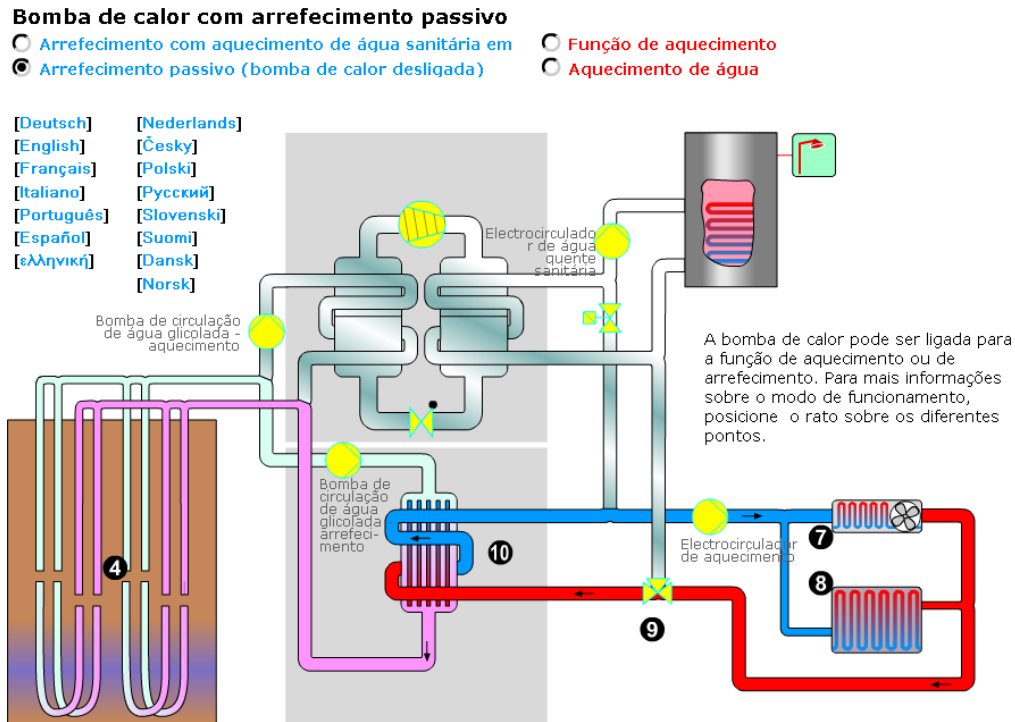
**Figura 2.2.** Esquema de sistemas de Bomba de Calor Geotérmicos (adaptado)

a) Sistema vertical fechado; b) Sistema horizontal fechado; c) Sistema vertical aberto

(<http://www.altren.net/whathow.htm>)

Qualquer um dos sistemas descritos anteriormente têm associada a capacidade de arrefecimento passivo, também intitulado como *free cooling*. Esta capacidade consiste na utilização exclusiva da temperatura do solo (ou da água subterrânea) no período de arrefecimento, sem necessidade da utilização da bomba de calor ( Figura 2.3.)

No entanto, como *o free cooling* não contém o consumo do compressor, as potências térmicas dadas por este tipo de arrefecimento são limitadas. Por isso, deverão ser consideradas apenas como parciais. Para além disso, a temperatura de funcionamento de, aproximadamente, 15 °C exige velocidade de ar desconfortáveis nos ventilosconvetores.



**Figura 2.3.** Demonstração do arrefecimento passivo  
 ([http://www.calordaterra.com/geotermia\\_vertical.html](http://www.calordaterra.com/geotermia_vertical.html)).

Calcula-se a potência térmica do arrefecimento passivo da seguinte forma:

$$Q \cdot [kW] = m \cdot \left[ \frac{kg}{s} \right] * cp \left[ \frac{kJ}{kg.K} \right] * \Delta T [K]. \quad (2.1)$$

Onde o caudal mássico **m** é dado pela bomba de circulação; o calor específico **cp** é o da água à temperatura média do furo e da zona a climatizar; e a diferença de temperaturas **ΔT** é entre a da divisão a climatizar e a do furo.

O sistema de circuito aberto considerado acima apenas necessita de um furo e de dois tubos (um coaxial ou dois anexos). Apresenta grandes vantagens em relação às soluções de circuito fechado verticais e horizontais, uma vez que requer muito menor volume de trabalhos em infraestruturas: escavação, furação e tubagem de circulação.

Na Figura 2.4. está representado o esquema de funcionamento de um sistema de circuito aberto com indicação dos fluxos térmicos e mássicos na aspiração e retorno da água no furo, favorecendo a recirculação, tanto interior, como exterior. O processo de aspiração

no fundo do poço vai forçar a infiltração de água existente no solo nessa zona aspirada. Pelo contrário, o retorno da água, porque em excesso, irá infiltrar-se no solo. Esta recirculação de água no solo permite uma transferência de energia ou de calor superior com a vizinhança e o aproveitamento da corrente geotérmica na melhoria da eficiência da bomba de calor face a outros sistemas de furo.

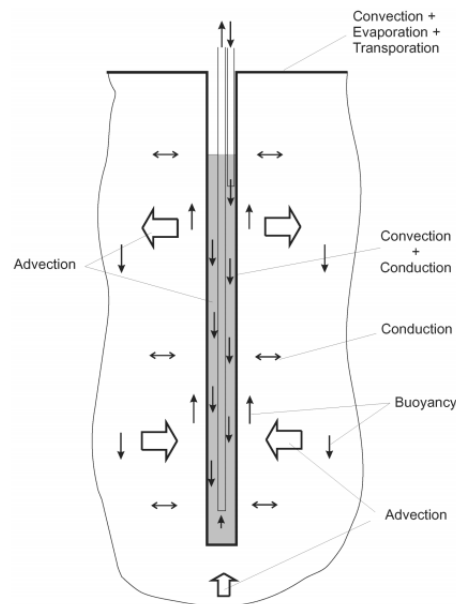


Figura 2.4. Esquema do furo de GWHP (Rees *et al.*, 2004).

Em termos de eficiência energética, o circuito aberto tem ainda uma outra vantagem em relação aos circuitos fechados, que se deve à captação da água com uma temperatura muito próxima da do solo, o que não acontece nos circuitos fechados. Este fator permite eficiências da bomba de calor superior ao dos outros sistemas (Rees *et al.*, 2004). Os sistemas geotérmicos são também considerados fiáveis e duradouros, por se encontrarem normalmente soterrados e dentro dos edifícios, o que garante maior proteção perante condições climáticas adversas (Chua *et al.*, 2010).

A maior desvantagem dos circuitos abertos em relação aos circuitos fechados reside na própria qualidade da água. Num circuito aberto, o sistema encontra-se sujeito às condições de limpeza e composição da água, o que obriga a uma maior atenção na manutenção da tubagem, respetivos filtros e quantidade de água (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Para além disso, é necessária aprovação legal da proteção dos recursos hídricos.

## 2.2. Fluidos Frigoríficos

Os fluidos frigoríficos escolhidos na presente dissertação – r134a, r290, r407c, r410 e r600 – apresentam características termofísicas que merecem ser referenciadas. Na Tabela 2.1. estão indicadas informações sobre a inflamabilidade, toxicidade, o seu índice de GEE (Gases de Efeito de Estufa) a cem anos, ODP (*Ozono Depletion Potential*) e temperatura crítica. Estas informações foram retiradas da empresa Linde [www.linde-gas.com/en/index.html](http://www.linde-gas.com/en/index.html) (informação completa no ANEXO A).

**Tabela 2.1. Inflamabilidade e fator de GEE dos fluidos em estudo**

	<b>134a</b>	<b>R290</b>	<b>R407c</b>	<b>R410a</b>	<b>R600</b>
<b>Inflamável</b>	Não	Sim	Não	Não	Sim
<b>Toxico</b>	Não	Não	Não	Não	Não
<b>GEE</b>	1430	3	1774	2088	3
<b>ODP</b>	0	0	0	0	0

## 2.3. Projeto Europeu

Neste subcapítulo são analisadas duas fases de um projeto europeu (1ª fase GroundHit e 2ª fase Ground-Med) que pretende demonstrar vantagens energéticas da utilização de sistemas de bomba de calor com fonte geotérmica, GSHP.

Para a primeira fase, GroundHit, o local português de implantação foi Setúbal. Tinha como objetivo principal o desenvolvimento de uma bomba de calor de circuito fechado com eficiência 10-20% superior às existentes no mercado e um coeficiente de *performance* mínimo em aquecimento de 5.5 (GroundHit, 2009).

A segunda fase, Ground-Med, teve participação portuguesa em Coimbra. Tinha como objetivo tentar garantir um SCOP (*Seasonal Coefficient Of Performance*), superior a 5 (Ground-med, 2012). Esta fase também foi efetuada com uma bomba de calor de fonte geotérmica com circuito fechado.



### 2.3.1. GroundHit

Durante o projeto GroundHit foram analisados dezasseis fluidos frigoríficos, considerando o COP e o CF (coeficiente de frio), as características termofísicas, o índice de GEE e o estado do mercado – o de fornecimento dos fluidos e o dos compressores. Os três fluidos com melhores resultados foram: o r134a, como o melhor da análise, seguido do r407c e do r410a (GroundHit, 2009).

Desse projeto foi considerada relevante para o presente estudo a informação da temperatura média do solo ao longo do ano (de 18 °C). Este valor de temperatura do solo, na estação de aquecimento, permite alcançar valores de saída a rondar os 15 °C (Figura 2.5.).

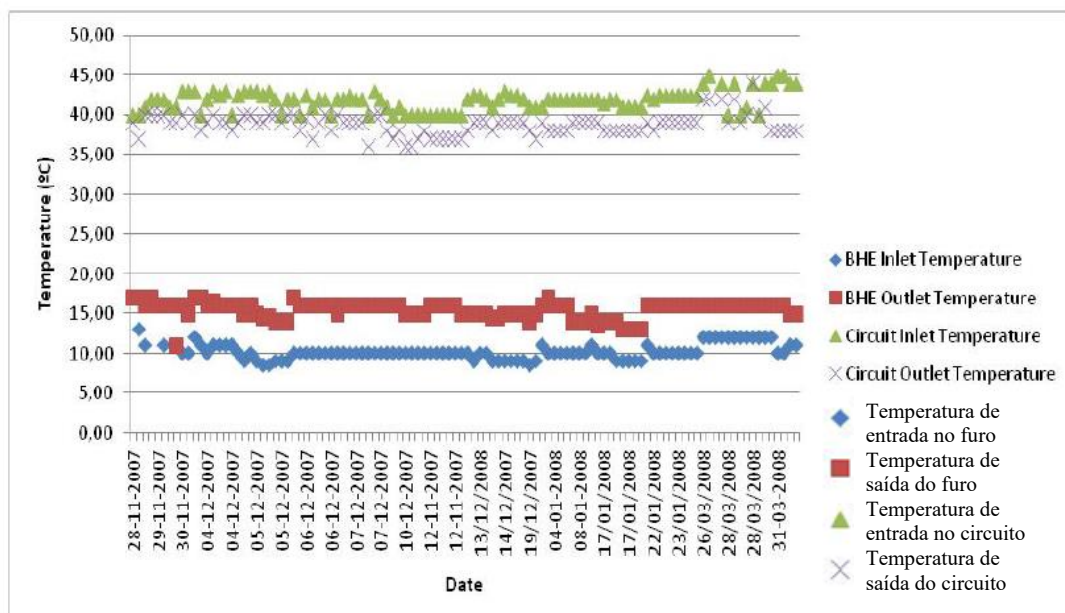


Figura 2.5. Temperatura de ida e retorno da água nos furos geotérmicos (GroundHit, 2009)

O COP médio do projeto em aquecimento foi de 5.23 e o máximo de 6.05 (GroundHit, 2009)

### 2.3.2. Ground-Med

Como foi referido acima, o projeto Ground-Med teve como objetivo a demonstração da possibilidade de atingir SCOP superiores a 5 com circuito fechado. Deste projeto foram retiradas informações importantes para o estudo desenvolvido nesta

dissertação: a influência das temperaturas dos furos geotérmicos e de saída da bomba de calor na *performance* do sistema.

Na Figura 2.6 mostra-se uma temperatura média do solo, em Coimbra ao longo do ano, acima dos 15 °C. Este valor foi utilizado nos cálculos da *performance* dos fluidos refrigerantes.

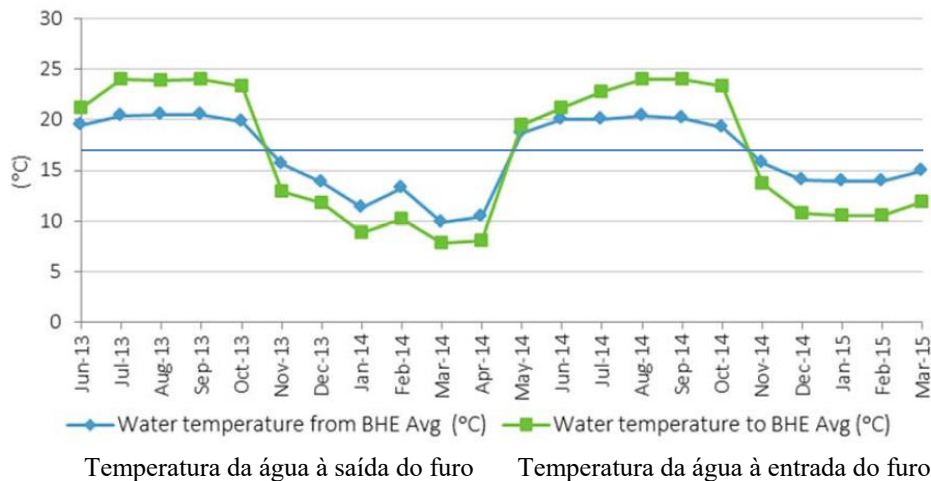


Figura 2.6. Temperatura de ida e retorno da água nos furos geotérmicos (Carvalho, 2015).

Como indicado na Figura 2.7., a utilização de temperaturas de saída da bomba de calor mais baixas em aquecimento traduz-se num aumento da *performance* da própria bomba, DPF1\_Br3.

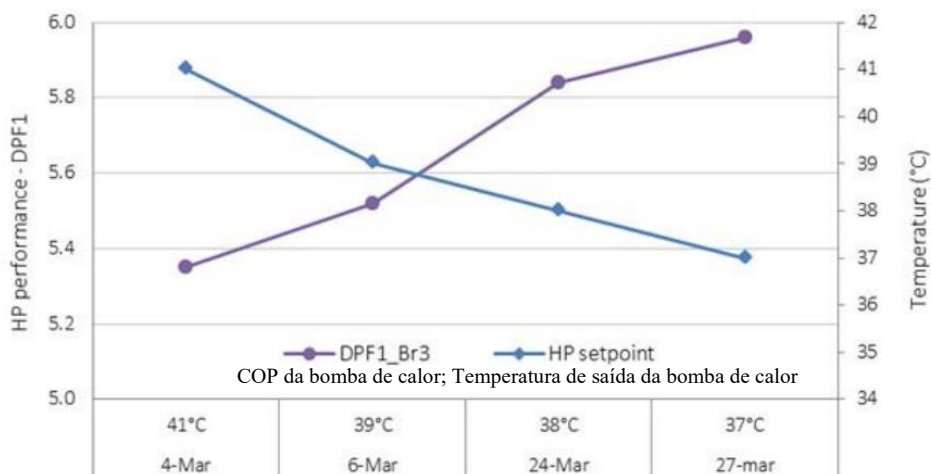
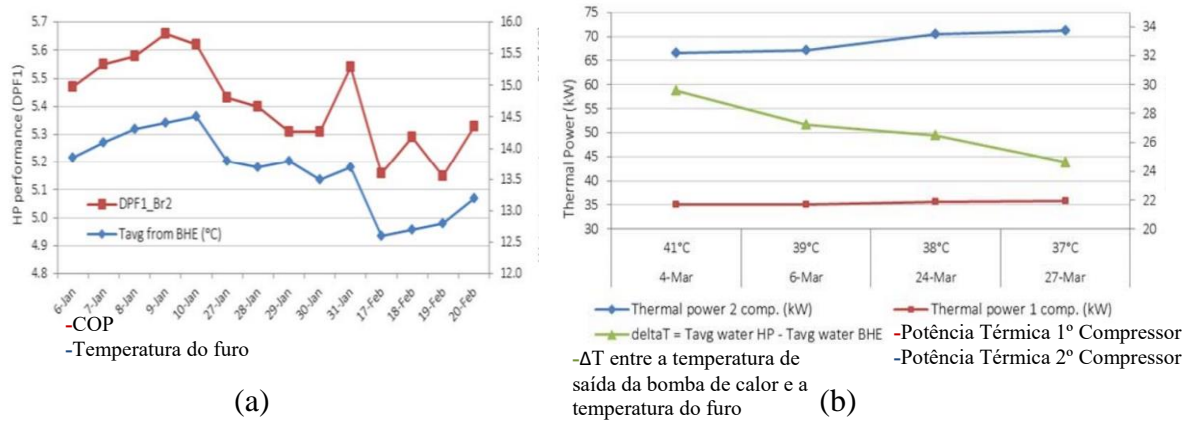


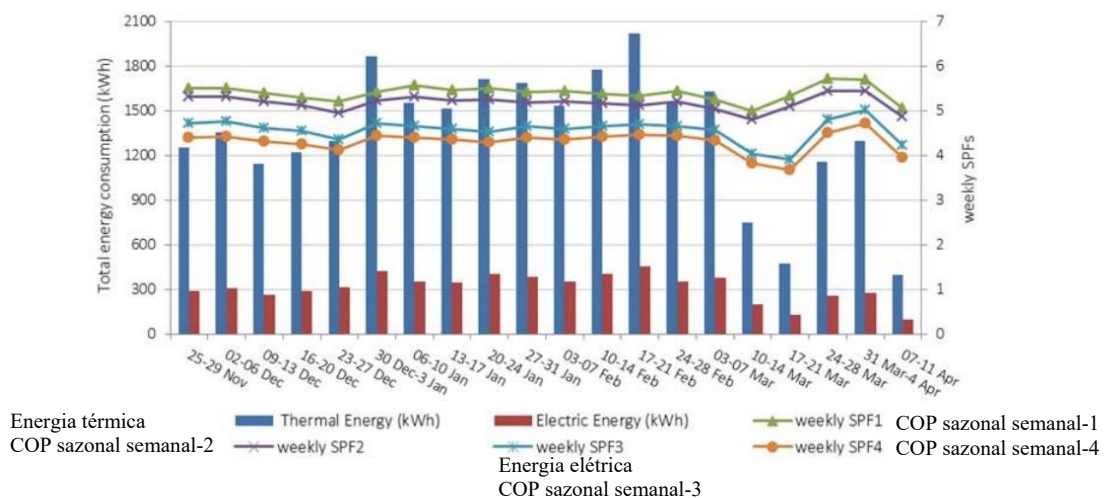
Figura 2.7. Variação do COP com a variação da temperatura definida na bomba de calor.

Na Figura 2.8. (a) é demonstrada uma correlação entre a temperatura de saída do furo geotérmico e a *performance* da bomba de calor: quanto mais alta for esta temperatura, mais alto é o COP, devido ao menor trabalho necessário no compressor. Na Figura 2.8. (b) verifica-se que, quanto menor a diferença das temperaturas de saída do furo e de saída da bomba de calor, maior a potência térmica do sistema, o que permite uma *performance* superior.



**Figura 2.8. Ground-Med:** (a) Relação entre COP e temperatura do furo; (b) Potência Térmica em função da diferença entre a temperatura de saída da bomba de calor e de saída do furo (Carvalho, 2015).

Na Figura 2.9. são indicados os quatro COP sazonais, desde o SPF1 (apenas da bomba de calor) até ao SPF4, onde são contabilizadas todas as bombas de circulação e o consumo dos ventiloconvectores. Mesmo no SPF4 os COP são muito apelativos, variando entre 3,8 e 4,8 no período apresentado.



**Figura 2.9.** Variação dos COP sazonais nas semanas analisadas (Carvalho, 2015).

Na Figura 2.9. também se pode observar que a bomba de calor geotérmica (SPF1) obteve valores médios de coeficientes de *performance* bastante elevados durante todo o tempo analisado, com valores entre 5 e 6, que são muito difíceis de atingir com bomba de calor aerotérmica em aquecimento.

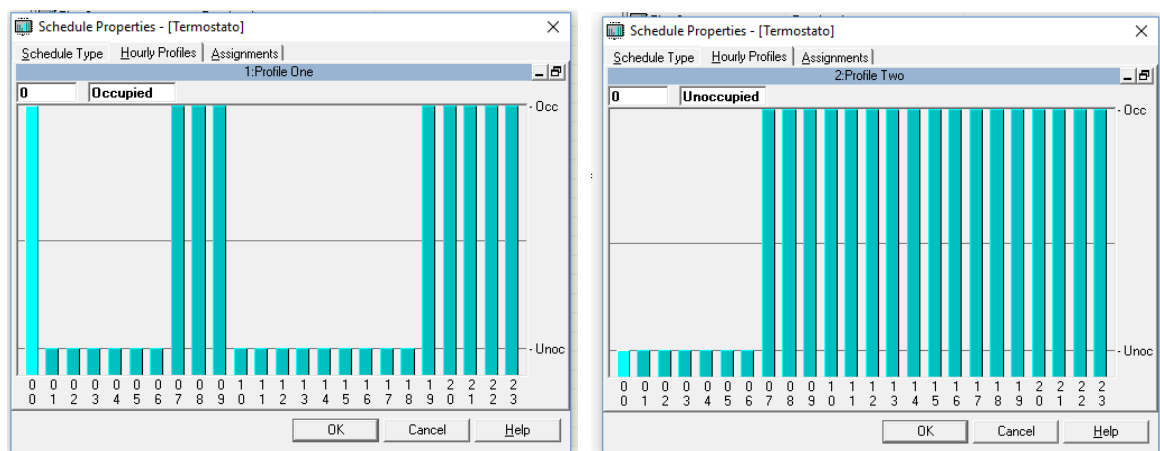
Esta comparação entre o sistema de bomba de calor com fonte geotérmica e um sistema aerotérmico convencional foi analisada no decurso do projeto Ground-Med. Foram apresentadas reduções de 37%, em relação ao sistema aerotérmico, na estação de arrefecimento e de 35.5% em aquecimento (Ground-Med, 2014. “Part A : June 2013 – april 2014”), demonstrando o potencial energético de poupança inerente à implementação dos sistemas com fonte geotérmica.

### 3. PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO

No presente capítulo é feita a descrição da habitação que se pretende estudar neste trabalho: as áreas dos espaços, as soluções construtivas das paredes, o volume de ar novo a ser introduzido por hora e as potências térmicas necessárias ao conforto na ventilação e climatização dos espaços.

#### 3.1. Descrição da Habitação

A habitação em estudo encontra-se em fase de projeto, tendo sido escolhida a Figueira da Foz como o local da implementação. Todas as informações referentes às soluções construtivas e à própria orientação do edifício foram recolhidas desse mesmo projeto. Esse projeto prevê três quartos, quatro instalações sanitárias, uma cozinha, três salas (inverno, verão e jantar), um terraço com o respetivo acesso e uma garagem (considerada não climatizada). São 266.32 metros quadrados. Foi admitida uma ocupação dos espaços, considerando uma ocupação diária das 7h às 9h da manhã e das 19h às 24h, durante a semana, como é representado na Figura 3.1 (a). A ocupação durante o fim-de-semana foi considerada das 7h às 23h, como é mostrado na Figura 3.1. (a).



(a)

(b)

Figura 3.1. Termostato HAP: (a) Ocupação Semana; (b) Ocupação Fim-de-semana

O programa HAP é um programa de simulação energética para climatização de edifícios. Como este programa permite o ajuste das condições mínimas de temperatura para os dois estados do termostato (ocupado e não ocupado) de forma independente, as horas de sono foram consideradas como não ocupadas, visto que, mesmo assim, são cumpridos os valores mínimos de conforto para este modo de atividade corporal.

### 3.1.1. Espaços climatizados

Todos os pisos da habitação foram considerados como climatizados, à exceção da cave/garagem. Uma vez que o acesso ao terraço prevê um elevado isolamento térmico, foi admitido como climatizado.

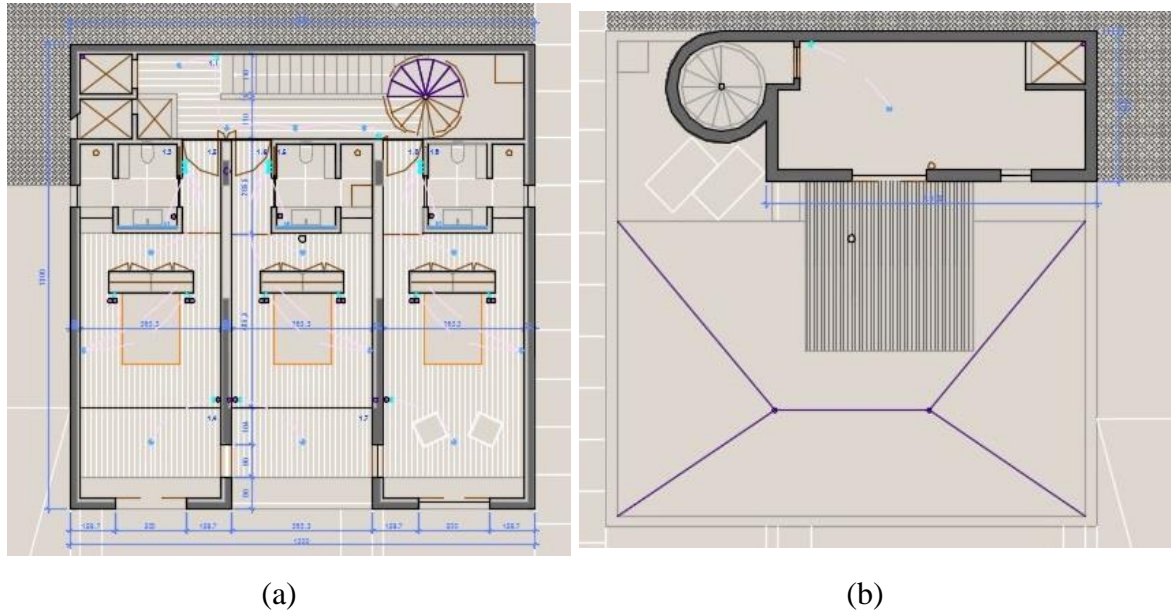
Para garantir um aquecimento eficiente, grande parte da habitação irá conter piso radiante com possibilidade de arrefecimento. Nas zonas onde este tipo de aquecimento não é utilizado recorre-se a radiadores de baixa temperatura ou ventiloconvectores. Foi considerada uma taxa de infiltração de 0.6 renovações por hora.

A área total da habitação, excluindo a cave, é de 266.32 m<sup>2</sup>. Está orientada a sudoeste. Na Figura 3.2. está representado o Piso 0. Este piso contém uma cozinha, uma sala de jantar, uma sala de inverno, uma sala de verão e uma instalação sanitária.



Figura 3.2. Piso 0: Sala de Jantar, Cozinha, Sala de Inverno e Sala de Verão

As Figura 3.3. (a) e (b) mostram as plantas do 1º e 2º pisos. Pode-se observar que têm três quartos com as respectivas instalações sanitárias(a) e o acesso ao terraço (b).



**Figura 3.3.** Plantas: (a) Piso 1 com três quartos e as respectivas I.S.; (b) Acesso ao Terraço

As soluções construtivas das paredes, tetos e janelas foram representadas quantitativamente na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1. Soluções Construtivas paredes, teto e janelas.**

Paredes		Janelas		Tetos	
Betão 15cm	$R_{\text{térmica}} = 0.144$	Caixilho Alumínio com corte térmico	Betão 20cm	$R_{\text{térmica}} = 0.196$	
XPS 5cm	$R_{\text{térmica}} = 1.75$	Vidro Duplo	Tela Betuminosa	$R_{\text{térmica}} = 0.051$	
Betão 20cm	$R_{\text{térmica}} = 0.196$	Cortinas Venezianas	XPS 8cm	$R_{\text{térmica}} = 2.8$	
			Geotêxtil	$R_{\text{térmica}} = 0.036$	
			Godo	$R_{\text{térmica}} = 0.059$	
	$U_{\text{médio}} = 0.441$	$U_{\text{médio}} = 2.810$		$U_{\text{médio}} = 0.285$	

## 3.2. Ventilação

Para cumprimento dos objetivos desta dissertação e um correto dimensionamento da bomba de calor, tendo em conta todas as necessidades da habitação unifamiliar, foi necessário calcular o caudal de ar novo a introduzir na casa. Desta forma poder-se-ão obter as potências térmicas necessárias ao ajuste térmico do ar de insuflação.

### 3.2.1. Caudal Ar Novo

O caudal de ar novo a ser insuflado na habitação foi obtido pelo método prescritivo. Este foi calculado para o piso 0, que consiste em salas e cozinha, e piso 1, com os quartos e instalações sanitárias. Não foi calculado para a garagem, nem para os corredores, nem para o acesso ao terraço, pois segundo a Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de Dezembro, por se tratar de níveis de ocupação inferiores a duas horas por dia, a renovação de ar é feita de forma natural, por ar infiltrado ou pela própria circulação de ar na habitação.

O caudal de ar novo para as múltiplas divisões está indicado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2. Caudal Ar Novo**

Piso	Divisão	Caudal Ar Novo [m <sup>3</sup> /h]
<b>Garagem</b>	Garagem	0
<b>Piso 0</b>	Vestíbulo de Entrada	0
	Cozinha	50
	I.S. Serviço (1 sanita)	90
	Sala de Jantar	250
	Sala de Inverno	70
	Sala de Verão	105
<b>Piso 1</b>	Vestíbulo	0
	Quarto1	85
	I.S.1 (1sanita)	90
	Quarto2	85
	I.S.2 (1 sanita)	90
	Quarto3	120
	I.S.3 (1 sanita)	90
<b>Terraço</b>	Acesso ao Terraço	0



### 3.2.2. Potência térmica

A potência térmica para a ventilação foi calculada com o programa HAP 4.91, utilizando os caudais de ar novo, indicados na Tabela 3.2., os perfis de ocupação da Figura 3.1. e tendo em conta as temperaturas exteriores para que o ar seja insuflado a uma temperatura neutra. As temperaturas neutras consideradas foram de 22 °C para arrefecimento, obtendo-se uma potência de 0.6 kW, e 23 °C para aquecimento, necessitando de 6.4 kW (Ver relatório no ANEXO B).

Em aquecimento, as potências térmicas de climatização são calculadas de forma a compensar infiltrações de ar frio e perdas térmicas por paredes e envidraçados. E em arrefecimento, a partir das cargas internas de equipamentos, pessoas, de ganhos solares e infiltrações de ar quente. As potências foram calculadas através de simulações no programa HAP 4.91, em que este considera as potências simultâneas mais altas, incluindo ventilação.

Apresenta-se na Tabela 3.3. o valor máximo de potência térmica da bomba de calor, em situação de aquecimento e de arrefecimento. A potência de 12.9 kW para aquecimento e a potência de 8.7 kW para arrefecimento permitem seleccionar, ou dimensionar, a bomba de calor necessária para a habitação. (Ver Relatório no ANEXO B.)

**Tabela 3.3. Potências térmicas máximas necessárias**

Estação	Potência Térmica Máxima [kW]
<b>Arrefecimento</b>	8.700
<b>Aquecimento</b>	12.900



## 4. ESTUDO DE FLUIDOS TÉRMICO PARA AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO

No capítulo atual é feita uma análise da *performance* dos fluidos de trabalho nas condições de funcionamento da bomba de calor (aquecimento e arrefecimento). Esta análise é considerada um dos pontos principais a estudar na otimização da eficiência de um sistema de bomba de calor.

Foram selecionados cinco fluidos frigorigêneos para o estudo do sistema de bomba de calor com fonte geotérmica: o r134a, o r290 ou propano, o r407c, o r410a e o r600, muito pouco utilizado devido à sua elevada inflamabilidade, embora com elevados COP.

### 4.1. Temperaturas em Estudo

Foram estudados dois parâmetros diferentes de temperatura do evaporador: um para analisar uma bomba de calor com fonte geotérmica; outro para analisar uma fonte aerotérmica. Para ambos foi considerando um  $\Delta T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a respetiva fonte.

As temperaturas consideradas do evaporador, para aquecimento, foram de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (fonte a  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  com base no Solterm), para a bomba de calor aerotérmica, e de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (fonte a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), para a bomba de calor geotérmica. As temperaturas do condensador foram analisadas entre  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  com um incremento de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ., sendo a temperatura de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  utilizada para um piso radiante de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  para um tratamento anti-legionela de temperaturas superiores a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  no depósito de AQS (Águas Quentes Sanitárias).

### 4.2. Aquecimento

Neste subcapítulo estão representados os valores teóricos de *performance*, pressão e temperatura à saída do compressor.

### 4.2.1. Valores de *performance* e pressão para modo de aquecimento de vários fluidos

Para os valores de COP que se seguem foi considerado uma eficiência do compressor de 70% com valores obtidos com recurso ao software *CoolPack*, confirmados com o *Genetron Properties* e com os diagramas p-h de cada um dos fluidos.

Para a obtenção dos valores de entalpia de cada um dos fluidos foi utilizado o *CoolPack*, Figura 4.1., calculando-se o COP de cada um dos fluidos, dividindo a diferença de entalpia no condensador pela diferença de entalpia no compressor.

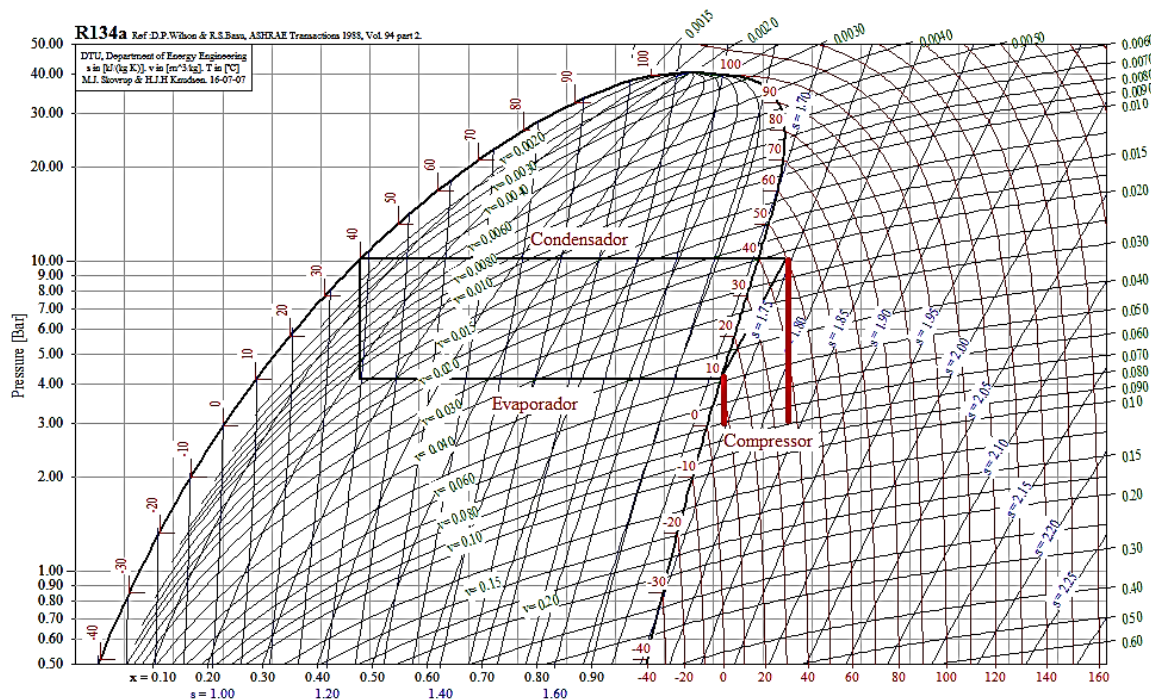


Figura 4.1. Diagrama pressão-entalpia do r134a (Coolpack)

Na Tabela 4.1. estão representados apenas os COP dos fluidos. (As entalpias utilizadas nestes cálculos encontram no ANEXO C.) Valores semelhantes aos calculados foram apresentados por Sarbu & Sebarchievici, 2014. Para geotermia em relação à aerotermia, verifica-se um aumento médio teórico do COP de 28.16%, para 40 °C; e 15.42%, para 65 °C. Esta relação entre a redução da eficiência e o aumento da temperatura, confirma as diferenças apresentadas pelo projeto Ground-Med, cujo gráfico foi apresentado no

subcapítulo 2.3.2. As percentagens apresentadas foram calculadas pela diferença absoluta de valores entre aerotermia e geotermia, dividindo pelos valores de aerotermia.

Tabela 4.1. COP dos fluidos em estudo em múltiplas temperaturas

$T_{\text{evap}}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{cond}}=$	40	%	45	50	55	60	65	%
<b>COP<sub>GEO</sub></b>	R134a	6.56	<b>28.38</b>	5.60	4.87	4.29	3.82	3.42	<b>15.93</b>
	R290	6.48	<b>28.10</b>	5.53	4.80	4.23	3.76	3.36	<b>15.61</b>
	R407c	6.41	<b>28.08</b>	5.45	4.71	4.11	3.62	3.20	<b>15.32</b>
	R410a	6.14	<b>27.93</b>	5.16	4.40	3.78	3.25	2.76	<b>14.16</b>
	R600	6.80	<b>28.30</b>	5.84	5.11	4.54	4.08	3.69	<b>16.08</b>
<b>Média</b>		6.48	<b>28.16</b>	5.52	4.78	4.19	3.71	3.29	<b>15.42</b>
<b>COP<sub>AERO</sub></b>	R134a	5.11		4.50	4.01	3.60	3.25	2.95	
	R290	5.06		4.45	3.96	3.55	3.21	2.90	
	R407c	5.00		4.39	3.88	3.46	3.10	2.77	
	R410a	4.80		4.17	3.64	3.20	2.80	2.41	
	R600	5.30		4.69	4.20	3.80	3.47	3.18	
<b>Média</b>		5.05		4.44	3.94	3.52	3.17	2.84	

Os valores da Tabela 4.1. encontram-se representados graficamente na Figura 4.2., juntamente com a percentagem de melhoria da bomba de calor geotérmica em comparação à aerotérmica.

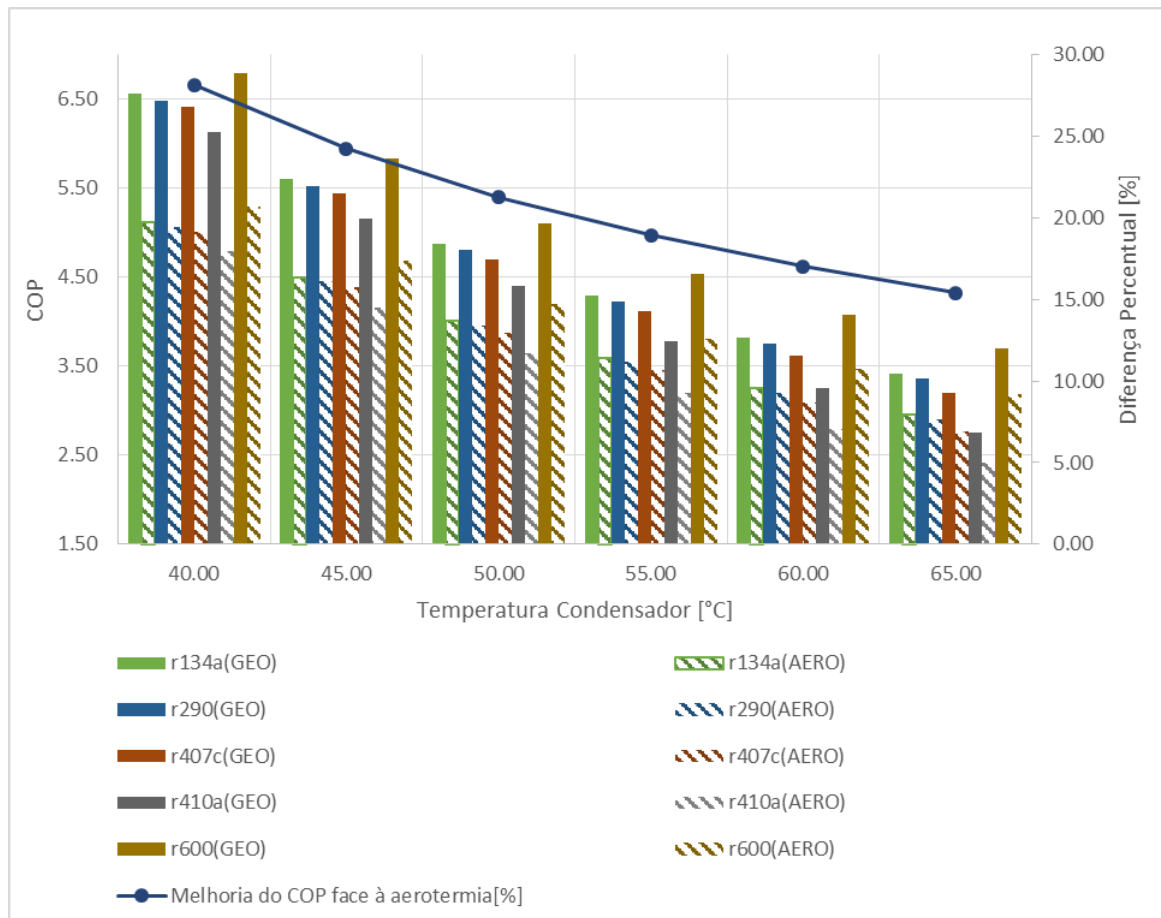
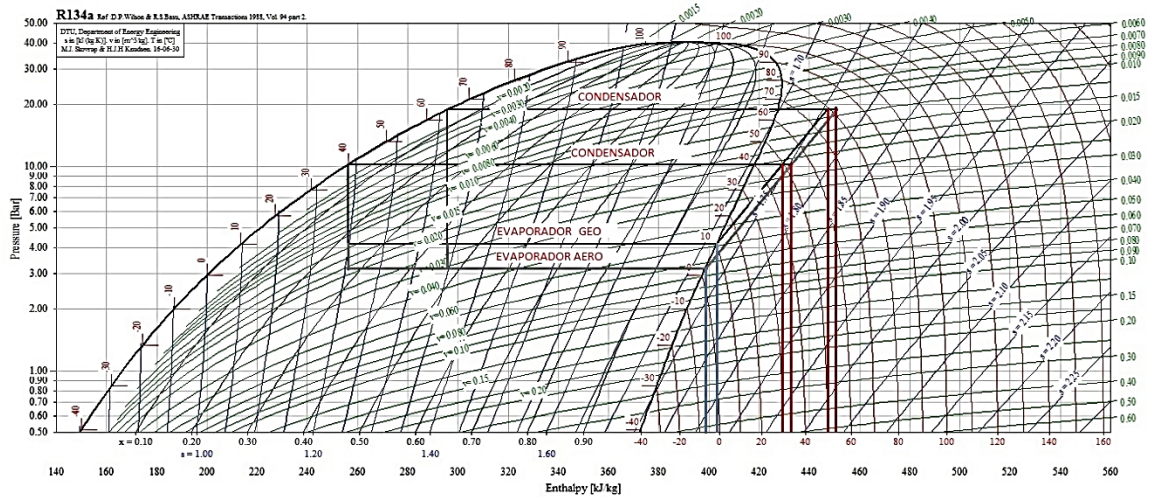


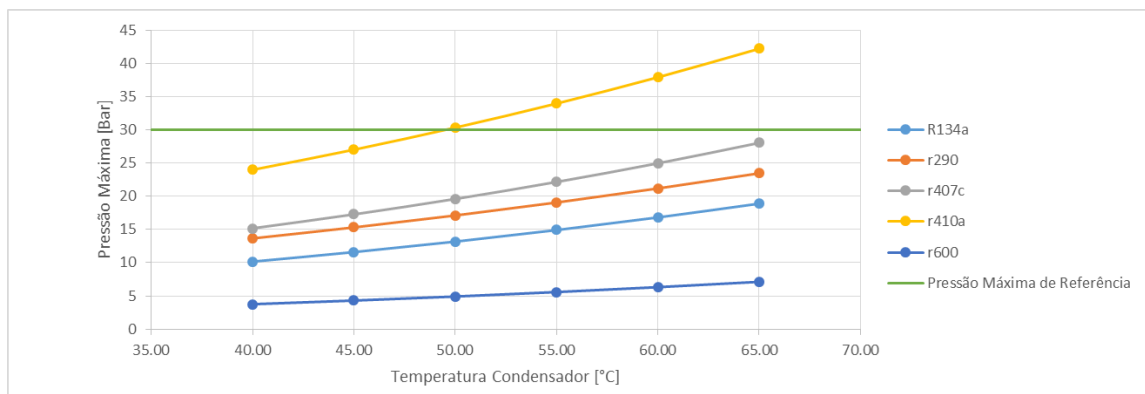
Figura 4.2. Coeficientes de Performance das temperaturas de evaporador de 2 °C (Aero) e 10 °C (Geo).

Pode-se verificar que, quanto menor a temperatura do condensador, mais eficiente é a geotermia face à aerotermia (como também se pode verificar na Figura 4.3.). Esta maior eficiência deve-se ao facto de que a diferença de trabalho dos compressores (linhas a azul) é constante. Assim, aumentando o trabalho do compressor (por exemplo, de 40 para 65 °C), esta diferença é menos significativa para a performance do ciclo. Por outro lado, com a maior temperatura do condensador, menor é a diferença de entalpias no mesmo. Isto significa que a temperatura superior de saída do compressor aerotérmico, comparativamente ao geotérmico, diminui também esta diferença percentual face à geotermia (linhas a vermelho).



**Figura 4.3.** Ciclos de bomba de calor do r134a para temperaturas do condensador de 40 e 65 °C com temperaturas do evaporador de 2 e 10 °C. (Coolpack).

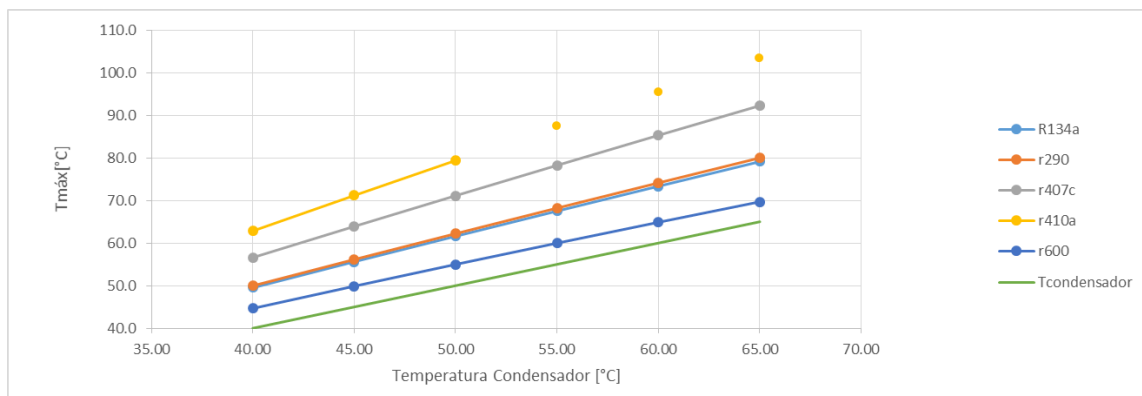
Na Figura 4.4. está representada a pressão máxima à saída do compressor para os fluidos em estudo, tendo em conta várias temperaturas do condensador. Considerou-se uma pressão máxima admissível de 30 bar como referência, pressão verificada em múltiplos catálogos. Para a temperatura máxima do condensador de 65 °C o único fluido a ultrapassar o nível de 30 bar foi o R410a, sendo que a mais baixa foi do r600, com apenas 7 bar.



**Figura 4.4.** Pressões de saída do compressor para as temperaturas e fluidos em estudo.

Observa-se na Figura 4.5. que a temperatura mais alta à saída do compressor é sempre do r410a. No entanto, não permite temperaturas de condensador superiores a 50 °C

(devido à pressão). Ainda assim, para a pressão de 30 bar, obtém-se um  $\Delta T$  de 30 °C (80-50°C), permitindo aquecer a água acima dessa temperatura apenas com calor sensível.



**Figura 4.5.** Temperatura máxima à saída do compressor para fonte geotérmica.

### 4.3. Arrefecimento

Como foi visto no capítulo 3 do projeto de climatização e ventilação, a maior potência necessária é em fase de aquecimento, mas a potência de arrefecimento não é desprezável.

Foi calculado o caudal necessário para produzir a potência de frio de 8.1 kW (sem contabilizar a ventilação), utilizando apenas o arrefecimento passivo. Nas situações em que a temperatura da água não está suficientemente baixa, é necessário recorrer à utilização do ciclo de bomba de calor com o evaporador a -20 °C. Com recurso a um permutador o circuito de água estaria a uma temperatura mínima de 5 °C.

#### 4.3.1. Arrefecimento Passivo

Uma das características da fonte geotérmica é a possibilidade de realizar arrefecimento passivo. Este consiste em utilizar diretamente a temperatura do subsolo para arrefecimento, sem a utilização do ciclo de bomba de calor; logo, sem o trabalho do compressor.

Não contando com a ventilação, a potência máxima de arrefecimento, é de 8.1kW; a temperatura do ar interior é de 22 °C e a da fonte geotérmica é de 15 °C ( $\Delta T=7$  °C).



Com estes dados e utilizando a equação 2.1 (apresentada no subcapítulo 2.1.), obtêm-se os valores de caudal mássico de 0.276 quilogramas por segundo e volúmico de 0.994 metros cúbico por hora. Estes valores são realistas para a bomba de circulação exterior. (Os valores de capacidade calorífica e massa volúmica foram retirados das tabelas de Çengel & Grajar, 2011.)

Devido ao facto de que, para a carga máxima, o caudal necessário da bomba se encontrar dentro dos limites das bombas de circulação, pode-se concluir que este tipo de arrefecimento cobre as cargas de arrefecimento totais ou parciais. O pavimento arrefecido é o equipamento mais indicado para este arrefecimento passivo, devido às temperaturas de funcionamento, normalmente entre os 15 °C e os 19 °C.

#### **4.3.2. Arrefecimento Ativo**

Para a utilização de ventiloconvectores, a temperatura da água para arrefecimento pode ser a do arrefecimento passivo (15 °C). Mas, de forma a evitar movimentação de ar excessiva, para manter o conforto térmico e sonoro, é necessária a utilização do ciclo de bomba de calor. Considerando um  $\Delta T$  entre os 15 °C e os 20 °C, a temperatura da água a circular nos ventiloconvectores teria de ser entre 2 °C e 7 °C.

Utilizando o mesmo método já exposto no subcapítulo 4.2., foi feito o estudo dos fluidos para o arrefecimento: num caso, utilizando como fonte quente a geotermia; no outro, a aerotermia. Considerou-se uma temperatura do evaporador de -20 °C e as temperaturas do condensador de 20 °C e 30 °C, correspondendo à fonte geotérmica e aerotérmica, respetivamente.

Na Tabela 4.2. verifica-se uma elevada diferença entre a bomba de calor com fonte geotérmica e outra com fonte aerotérmica, na ordem dos 33.52% em relação à ASHP (*Air Source Heat Pump*). O maior coeficiente de frio (CF) foi obtido para o r600, com o valor de 3.79, seguido do r134a, com 3.70.

**Tabela 4.2. COP de arrefecimento dos fluidos em estudo**

	<b>134a</b>	<b>R290</b>	<b>R407c</b>	<b>R410a</b>	<b>R600</b>	<b>Média</b>
<b>CF<sub>GEO</sub>[20 °C]</b>	3.70	3.68	3.66	3.58	3.79	<b>3.68</b>
<b>CF<sub>Aero</sub>[30 °C]</b>	2.78	2.76	2.74	2.64	2.88	<b>2.76</b>
<b>%</b>	<b>33.27</b>	<b>33.36</b>	<b>33.75</b>	<b>35.42</b>	<b>31.79</b>	<b>33.52</b>

Tendo em conta o objetivo desta dissertação, o fluido selecionado é o r134a, uma vez que tem elevada eficiência e, por outro lado, dentro dos fluidos não inflamáveis, é o que tem menor libertação de GEE. Esta conclusão corresponde à do projeto Groundhit (subcapítulo 2.3.1.). Nesse caso, num universo de dezasseis fluidos, incluindo os analisados nesta dissertação, o r134a foi considerado a melhor opção.

## 5. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÓMICA

Após os estudos anteriores, onde foi verificada a melhor eficiência da GSHP em relação à ASHP, e no âmbito do estágio na empresa *Matereospace*, foi realizada uma análise económica desta eficiência energética.

### 5.1. Cálculo Energético Anual

Tendo em conta duas temperaturas diferentes de aquecimento (45 e 65 °C) e duas de arrefecimento (5 e 15 °C), calcularam-se os consumos para cada uma destas temperaturas. Para efeitos de cálculo foi considerado o ajuste térmico na ventilação, piso radiante e ventiloconvectores com temperatura no condensador de 45 °C e ainda a situação pontual de 65°C para AQS (Águas Quentes Sanitárias). Os consumos associados ao apoio às AQS foram obtidos através de um projeto elaborado previamente pelo Engenheiro Jorge Vieira. (Ver ANEXO B)

Em termos de arrefecimento foi considerado piso arrefecido a 15 °C e o restante arrefecimento a 5 °C, com a temperatura do evaporador de -20 °C.

A energia térmica anual necessária para estas quatro condições estão indicadas na Tabela 5.1., juntamente com as respetivas energias elétricas dos compressores, utilizando os COP médios das tabelas Tabela 4.1. e Tabela 4.2.

**Tabela 5.1. Energia Térmica e Elétrica Anual**

	AQS (65 °C)	Ventilação e aquecimento (45 °C)	Poupança [%]	Ventilação e arrefecimento (5 °C)	Passivo (15 °C)	Poupança [%]
<b>kWh<sub>ano</sub></b>	<b>1003</b>	<b>11112</b>		<b>4417</b>	<b>2559</b>	
<b>Geotermia</b>	304.86	2013.04	18.83 [Geo- Aero]/Aero	1200.27	0	58.53 [Geo- Aero]/Aero
<b>COP</b>	3.29	5.52		3.68		
<b>Aerotermia</b>	353.17	2502.70		5.81		
<b>COP</b>	2.84	4.44		2527.54		
				2.76		

### 5.1.1. Período de Retorno da Bomba de Calor com fonte geotérmica

Considerando um preço 0.16 € por kWh e multiplicando pelo consumo elétrico de cada sistema, obtém-se os valores de 563.09 €/ano para a GSHP e 861.49 €/ano para a ASHP, obtendo-se uma diferença de 298.40 €/ano. Para estes cálculos não foram consideradas as bombas de circulação do circuito interior da habitação, porque seriam iguais para ambos os sistemas. Para a bomba de circulação exterior considerou-se que terá uma potência semelhante ao ventilador do sistema aerotérmico.

Para os cálculos anteriores foram consideradas duas situações: numa é necessário executar o furo de captação de água e instalar a tubagem e a bomba de circulação; noutra já existe furo, sendo somente neste caso necessário instalar um tubo coaxial e a bomba de circulação. O preço aproximado de diferença dos sistemas aerotérmico e geotérmico para a primeira situação seria de 1350€, sendo 900€ para o furo, 100€ para o enchimento das paredes do furo, 150€ para a tubagem e 200€ para a bomba de circulação. Dividindo este valor pelos 298.40 €/ano obtém-se um tempo de retorno aproximado de quatro anos e seis meses, em relação a uma bomba de calor com fonte aerotérmica. Na segunda situação apenas é considerado 150 € para a tubagem e 200 € para a bomba de circulação. Neste caso, calculando novamente o tempo de retorno, obtém-se um ano e três meses, aproximadamente.

As vantagens económicas estão apresentadas na Tabela 5.2. e graficamente na Figura 5.1. Verifica-se uma diferença de 3125 € ao fim de quinze anos e 4618 € ao fim de vinte anos de utilização.

Tabela 5.2. Preço, tempo de retorno e vantagem económica

	Sem Furo existente	Furo já existente	Aerotérmico
Furo [€]	900(Furo)+ 100(enchimento)		0
Tubagem de Aspiração/Rejeição [€]	150	150	0
Bomba Circuladora [€]	200	200	0
Diferença Custo Inicial [€]	1350	350	0
Preço Eletricidade [€/ano]	562.10	562.10	861.49
Retorno [Anos]	4.52	1.17	
Vantagem Económica a 15 anos [€]	3125	4125	

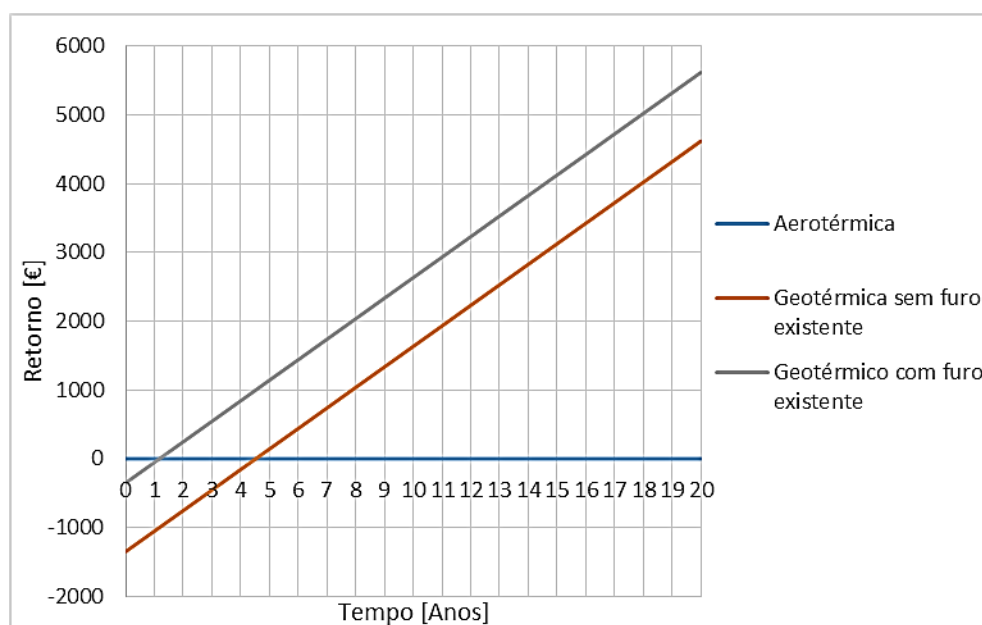


Figura 5.1. Comparação Económica entre os sistemas Geotérmico e Aerotérmico.

Com a utilização de um sistema de bomba de calor com fonte geotérmica com circuito aberto consegue-se um tempo de retorno máximo, aproximadamente em cinco anos, comparativamente a uma bomba de calor com fonte aerotérmica. Esta poupança nos

consumos entre a aerotermia e geotermia permite a compra de um sistema geotérmico novo, quando o anterior está no seu fim de vida.

Acrescente-se ainda a vantagem (não considerada anteriormente) das poupanças associadas à utilização da água do furo para outras funções.

## 6. CONCLUSÕES

A primeira conclusão que se retira da dissertação é a diferença de eficiência entre a bomba de calor com fonte geotérmica e a bomba de calor com fonte aerotérmica: a primeira consegue atingir em aquecimento os 28% de superioridade de COP para uma temperatura do condensador de 40 °C e de 15% para AQS para uma temperatura de 65 °C.

Para a temperatura de 40 °C os melhores COP apresentados foram de 6,8 para o r600 e 6.56 para o r134a; para 65 °C, os COP foram de 3.69 para o r600 e de 3.42 para o r134a. Em arrefecimento, obteve-se uma diferença de 34% para uma temperatura do evaporador de -20 °C com os melhores COP a pertencerem novamente ao r600 e r134a, com os valores de 3.79 e 3.70, respetivamente. Demonstrou-se ainda a eventualidade da utilização do arrefecimento passivo para a carga máxima de arrefecimento, possibilitando reduções significativas no consumo anual de energia.

Após ser considerada a inflamabilidade dos fluidos e o seu valor de GEE, conclui-se que, por questões de segurança e económicas, o fluido r134a apresenta melhores características, devido à não inflamabilidade, valores de *performance* elevados em aquecimento e arrefecimento. Dos fluidos não inflamáveis é o com menor GEE.

Por fim, tendo em conta as necessidades térmicas anuais, os valores médios de *performance* para a bomba de calor com fonte geotérmica e aerotérmica e ainda a capacidade do sistema geotérmico de permitir arrefecimento passivo, obteve-se uma poupança anual de 298,40 € e um tempo de retorno de quatro anos e seis meses com a construção do furo e um retorno de 3125 € ao fim de quinze anos. Com a existência do furo na habitação, a previsão é que o tempo de retorno diminua para um ano e três meses, com um ganho de 4125 € ao fim de quinze anos. O retorno obtido com a bomba de calor com fonte geotérmica permitiria a sua substituição desta no seu fim de vida.

Como proposta de trabalho futuro considera-se que uma análise dos futuros substitutos dos fluidos analisados é uma boa continuação do estudo aqui presente. Outra proposta seria um projeto com a mesma ordem de trabalhos do projeto Ground-Med, análises de COP sazonais, otimizações de velocidade de bombas de circulação e ainda um controlo

de custos de manutenção e comportamento dos equipamentos, quando este sistema estudado na presente dissertação for aplicado.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altren, Acedido a 4 de Julho de 2016, em <http://www.altren.net/whathow.htm>
- Calor da Terra, geotermia vertical. Acedido a 4 Julho de 2016, em [http://www.calordaterra.com/geotermia\\_vertical.html](http://www.calordaterra.com/geotermia_vertical.html)
- Carvalho, A. D. (2015). High Efficiency Ground Source Heat Pump Systems For Sustainable Building Space Conditioning. Tese de Doutoramento em Sistemas Sustentáveis de Energia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Çengel, Y. A., & Grajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor e massa: Uma abordagem pratica. Fisica Conceitual*. McGrawHill. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642009000100012>
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611–3624.
- Coolpack, software.  
Retirado de: <http://www.en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/coolpack.aspx>
- Genetron Propertires, software.  
Retirado de: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/genetron-properties-suite/>
- Ground-med, (2012). Demonstration Project 3 Administration building , Coimbra.  
Retirado de: [http://groundmed.eu/demonstration\\_projects/ground\\_med\\_project\\_3/](http://groundmed.eu/demonstration_projects/ground_med_project_3/)
- Ground-Med, (2014). PART A : JUNE 2013 – APRIL 2014, Demonstration Project 3 Administration building , Coimbra.  
Retirado de: [http://groundmed.eu/demonstration\\_projects/ground\\_med\\_project\\_3/](http://groundmed.eu/demonstration_projects/ground_med_project_3/)
- GroundHit, (2009). Conference Paper, Development of a High Efficient Ground Source Heat Pump.  
Retirado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/241703455\\_Development\\_of\\_a\\_High\\_Efficient\\_Ground\\_Source\\_Heat\\_Pump](https://www.researchgate.net/publication/241703455_Development_of_a_High_Efficient_Ground_Source_Heat_Pump).
- Linde, Refrigerants product data summary. Acedido a 20 de Maio de 2016 em [http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17\\_108590.pdf?v=3.0](http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17_108590.pdf?v=3.0).
- Rees, S. J., Spitler, J. D., Deng, Z., Orio, C. D., & Johnson, C. N. (2004). A study of geothermal heat pump and standing column well performance. *ASHRAE Transactions*, 110 PART 1, 3–13.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*.  
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>



## ANEXO A

### Product information

Type	Product R-Number	Other Common Names	ODP <sup>1</sup>	GWP <sup>2</sup>	Boiling Point* @ 1atm (°C)	Critical Temp <sup>3</sup> Tc (°C)	Critical Pressure* (bara)	ASHRAE Safety Group	Compatible Oils	Retrofit replacement for	
HCFC	22		0.055	1810	-41	96	50	A1	MO,AB		
	123		0.060	77	28	184	37	B1	MO	R11, R113	
	401A	Suva® MP39	0.033	1182	-33	107	46	A1	MO, AB	R12	
	401B	Suva® MP66	0.036	1288	-35	106	47	A1	MO, AB	R12	
	402A	HP80	0.019	2788	-49	76	42	A1	MO, AB	R502	
	402B	HP81	0.030	2416	-47	83	45	A1	MO, AB	R502	
	408A	Forane® FX10	0.024	3152	-44	83	43	A1	MO, AB, POE	R502	
	409A	Forane® FX56	0.046	1909	-34	107	45	A1	MO, AB, POE	R12	
	HFC	23		0	14800	-80	26	48	A1	POE	R13
32			0	675	-52	78	58	A2	POE		
134a			0	1430	-26	101	41	A1	PAG-Auto, POE	R12*, R22*	
404A		Suva® HP62	0	3922	-47	72	37	A1	POE	R22*, R502*	
407A		Klea® 60	0	2107	-46	82	45	A1	POE	R22*, R404A	
407C		Suva® 9000	0	1774	-44	86	46	A1	POE	R22*	
407F		Performax™ LT	0	1825	-46	83	48	A1	POE	R22*, R404A	
410A		Genetron® AZ-20	0	2088	-51	71	49	A1	POE	R13B1*	
417A		ISCEON® MO59	0	2346	-39	87	40	A1	MO, AB, POE	R22	
422A		ISCEON® MO79	0	3143	-47	72	37	A1	MO, AB, POE	R22, R502, HCFC blends	
422D		ISCEON® MO29™	0	2729	-43	80	39	A1	MO, AB, POE	R22	
423A		ISCEON® 39TC®	0	2280	-24	100	36	A1	POE	R12	
424A		RS-44	0	2440	-39	86	40	A1	MO, AB, POE	R22	
427A		Forane® FX100	0	2138	-43	85	44	A1	MO, AB, POE	R22*	
428A		RS-52	0	3607	-47	69	37	A1	MO, AB, POE	R22, R502, HCFC blends	
434A		RS-45	0	3245	-45	75	38	A1	MO, AB, POE	R22	
437A		ISCEON® MO49Plus™	0	1805	-29	96	41	A1	MO, AB, POE	R12, HCFC blends	
438A		ISCEON® MO99™	0	2265	-42	85	43	A1	MO, AB, POE	R22	
442A		RS-50	0	1888	-47	82	48	A1	POE	R404A, R507A	
507A		Genetron® AZ-50	0	3985	-47	71	37	A1	POE	R502*, R22*	
508B		Suva® 95	0	13396	-88	11	38	A1	POE	R503*, R13*	
MO89		ISCEON® MO89	0	3805	-53	64	36	TBC (A1)	MO, AB, POE	R13B1	
HFO		1234yf	Opteon® YF, Solstice™ yf	0	4	-29	95	34	A2	PAG-Auto, POE	
		1234ze	Solstice™ ze	0	6	-19	109	36	A2	POE	
Natural /not in kind		170	Ethane	0	6	-89	32	49	A3	MO, AB, POE	
		290	Propane, CARE® 40	0	3	-42	97	43	A3	MO, AB, POE	
		600a	Isobutane, CARE® 10	0	3	-12	135	36	A3	MO, AB, POE	
	717	Ammonia	0	0	-33	132	113	B2	Consult OEM		
	744	Carbon Dioxide	0	1	-57	31	74	A1	Consult OEM		
	1150	Ethylene, Ethene	0	4	-104	9.2	50	A3	MO, AB, POE		
	1270	Propylene, Propene, CARE® 45	0	2	-48	91	46	A3	MO, AB, POE		

\*When carrying out a retrofit replacement, an oil change will be necessary. For more details see retrofit information.

<sup>1</sup> Ozone Depletion Potential, UNEP (2006). R11 = 1

<sup>2</sup> Global Warming Potential (100 year), IPCC 4th Assessment Report, 2007. CO<sub>2</sub> = 1

**Figura A.1.** Informações dos fluidos refrigerantes da Linde ([http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17\\_108590.pdf?v=3.0](http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants-Product-Data-Summary17_108590.pdf?v=3.0))



## ANEXO B

Concelho de Figueira da Foz  
 Coordenadas nominais: 40.2°N, 8.8°W  
 TRY para RCCTE/STE e SOLTERM ( LNEG(2009) www.lneg.pt  
 solterm.suporte@lneg.pt)

Obstruções do horizonte: por defeito

Orientação do painel: inclinação 35° - azimute 0°

---

### Balanco energético mensal e anual

---

	Rad.Horiz. kwh/m <sup>2</sup>	Rad.Inclin. kwh/m <sup>2</sup>	Desperdiçado kwh	Fornecido kwh	Carga kwh	Apoio kwh
Janeiro	56	91	.	118	272	154
Fevereiro	74	107	.	135	244	110
Março	107	130	.	157	267	110
Abril	148	159	.	184	253	68
Maio	181	178	.	190	255	66
Junho	187	174	.	186	240	54
Julho	203	193	.	209	244	35
Agosto	184	191	.	216	244	28
Setembro	133	156	.	187	238	52
Outubro	100	137	.	169	253	85
Novembro	66	105	.	135	256	122
Dezembro	54	92	.	121	272	151
Anual	1492	1713	.	2007	3039	1033

Fracção solar: 66.0%  
 Rendimento global anual do sistema: 32%      Produtividade: 551 kwh/[m<sup>2</sup>  
 colector]

N.B. 'Fornecido' é designado 'E solar' nos Regulamentos Energéticos (DLs  
 78,79,80/06)

Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas() | 10/24/2015 9:08:55 PM |

**Figura B.1.** Relatório Solterm do projeto de AQS

Média	Global Média	Difusa	Directa	Mínima	Máxima
Janeiro	1.8	0.9	0.9	7.3	15.0
10.5	80				
Fevereiro	2.7	1.2	1.4	7.4	16.0
10.9	78				
Março	3.5	1.6	1.8	7.5	18.6
12.2	76				
Abril	4.9	2.1	2.8	8.9	21.1
14.2	71				
Maio	5.8	2.2	3.7	10.8	23.2
16.3	70				
Junho	6.2	2.5	3.7	12.7	26.1
18.7	66				
Julho	6.5	2.5	4.1	13.2	29.0
20.2	62				
Agosto	5.9	2.2	3.7	13.2	29.3
20.3	61				
Setembro	4.4	1.8	2.7	13.1	27.8
19.3	66				
Outubro	3.2	1.4	1.8	11.9	24.0
16.9	72				
Novembro	2.2	1.0	1.2	8.9	18.6
12.9	77				
Dezembro	1.8	0.8	0.9	6.9	15.4
10.4	79				

Figura B.2. Informação climática anual da Figueira da Foz do programa Solterm

**Air System Information**

Air System Name ... Casa figueira 2tubos Geotérmico  
 Equipment Class ..... TERM  
 Air System Type ..... 2P-FC

Number of zones ..... 3  
 Floor Area ..... 261.9 m<sup>2</sup>  
 Location ..... Coimbra, Portugal

**Sizing Calculation Information**

Calculation Months ..... Jan to Dec  
 Sizing Data ..... Calculated

Zone L/s Sizing ..... Peak zone sensible load  
 Space L/s Sizing ..... Individual peak space loads

**Cooling Coil Sizing Data**

Total coil load ..... 0.6 kW  
 Sensible coil load ..... 0.6 kW  
 Coil L/s at Aug 1900 ..... 297 L/s  
 Max coil L/s ..... 297 L/s  
 Sensible heat ratio ..... 1.000  
 Water flow @ 10.0 °K rise ..... 0.02 L/s

Load occurs at ..... Aug 1900  
 OA DB / WB ..... 23.8 / 19.9 °C  
 Entering DB / WB ..... 23.8 / 19.9 °C  
 Leaving DB / WB ..... 22.0 / 19.3 °C  
 Bypass Factor ..... 0.100

**Heating Coil Sizing Data**

Max coil load ..... 6.4 kW  
 Coil L/s at Des Htg ..... 297 L/s  
 Max coil L/s ..... 297 L/s  
 Water flow @ 11.1 °K drop ..... 0.14 L/s

Load occurs at ..... Des Htg  
 Ent. DB / Lvg DB ..... 5.0 / 23.0 °C

**Ventilation Fan Sizing Data**

Actual max L/s ..... 297 L/s  
 Standard L/s ..... 293 L/s  
 Actual max L/(s·m<sup>2</sup>) ..... 1.13 L/(s·m<sup>2</sup>)

Fan motor BHP ..... 0.00 BHP  
 Fan motor kW ..... 0.00 kW  
 Fan static ..... 0 Pa

**Exhaust Fan Sizing Data**

Actual max L/s ..... 297 L/s  
 Standard L/s ..... 293 L/s  
 Actual max L/(s·m<sup>2</sup>) ..... 1.13 L/(s·m<sup>2</sup>)

Fan motor BHP ..... 0.00 BHP  
 Fan motor kW ..... 0.00 kW  
 Fan static ..... 0 Pa

**Outdoor Ventilation Air Data**

Design airflow L/s ..... 297 L/s  
 L/(s·m<sup>2</sup>) ..... 1.13 L/(s·m<sup>2</sup>)

L/s/person ..... 34.53 L/s/person

**Figura B.3.** Relatório HAP, Potência térmica ventilação

**2. Cooling Plant Sizing Data:**

Maximum Plant Load ..... 8.7 kW  
 Load occurs at ..... Jul 1900  
 m<sup>2</sup>/kW ..... 30.2 m<sup>2</sup>/kW  
 Floor area served by plant ..... 261.9 m<sup>2</sup>

**3. Coincident Cooling Loads for Jul 1900**

Air System Name	Mult.	System Cooling Coil Load [kW]
Casa figueira 2tubos Geotémico	1	8.7

Air system loads are for coils whose cooling source is Jul 1900

**4. Chiller Design Capacities**

CH-1 ..... 8.7 kW  
 Total: ..... 8.7 kW

**5. Heating Plant Sizing Data:**

Maximum Plant Load ..... 12.9 kW  
 W/m<sup>2</sup> ..... 49.2 W/m<sup>2</sup>  
 Floor area served by plant ..... 261.9 m<sup>2</sup>

**6. Coincident Heating Loads for Jan 0000**

Air System Name	Mult.	System Heating Coil Load [kW]
Casa figueira 2tubos Geotémico	1	12.7

Air system loads are for coils whose heating source is Jan 0000

Coincident Service Hot Water Load ..... 0.2 kW

**Figura B.4.** Relatório HAP, Potências térmicas máximas



# ANEXO C

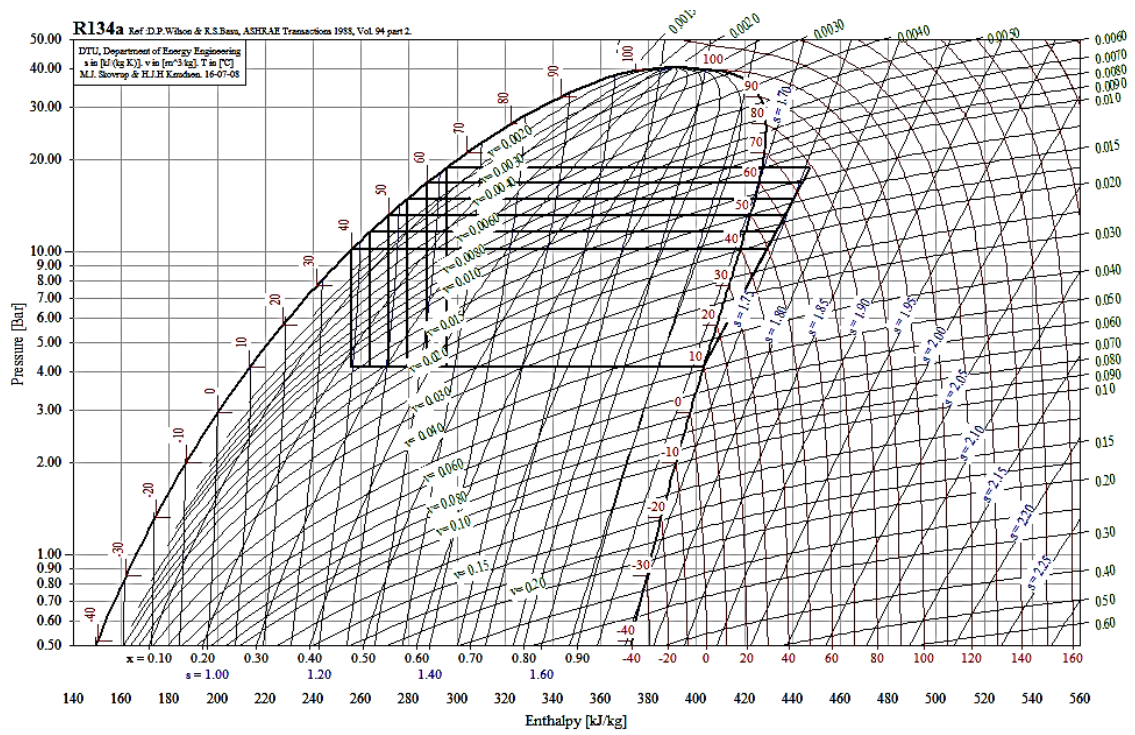


Figura C.1. Diagrama p-h r134a com fonte geotérmica (Coolpack)

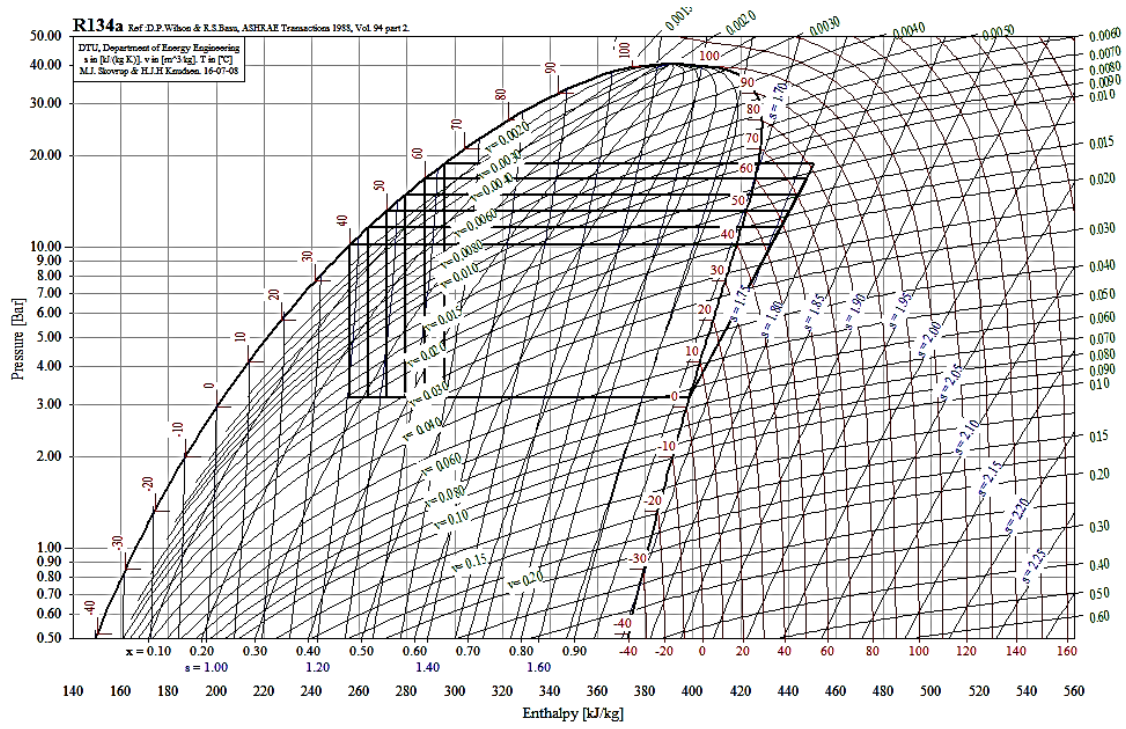


Figura C.2. Diagrama p-h r134a com fonte aerotérmica (Coolpack)

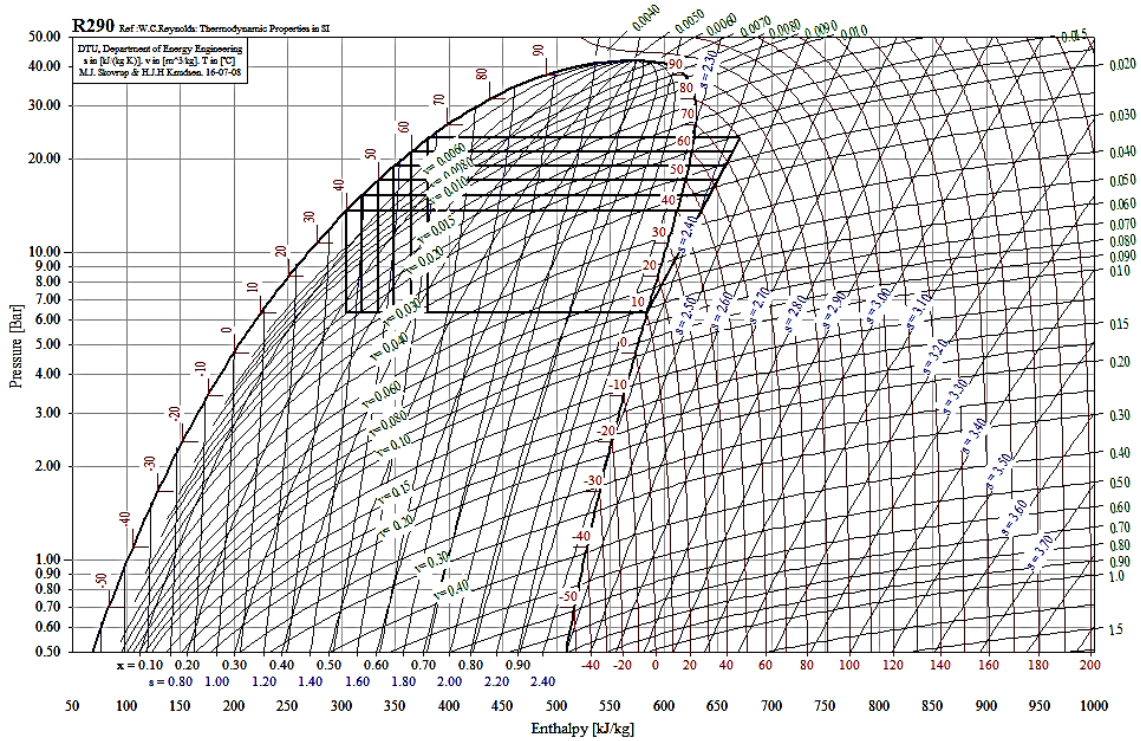


Figura C.3. Diagrama p-h 290 com fonte geotérmica (Coolpack)

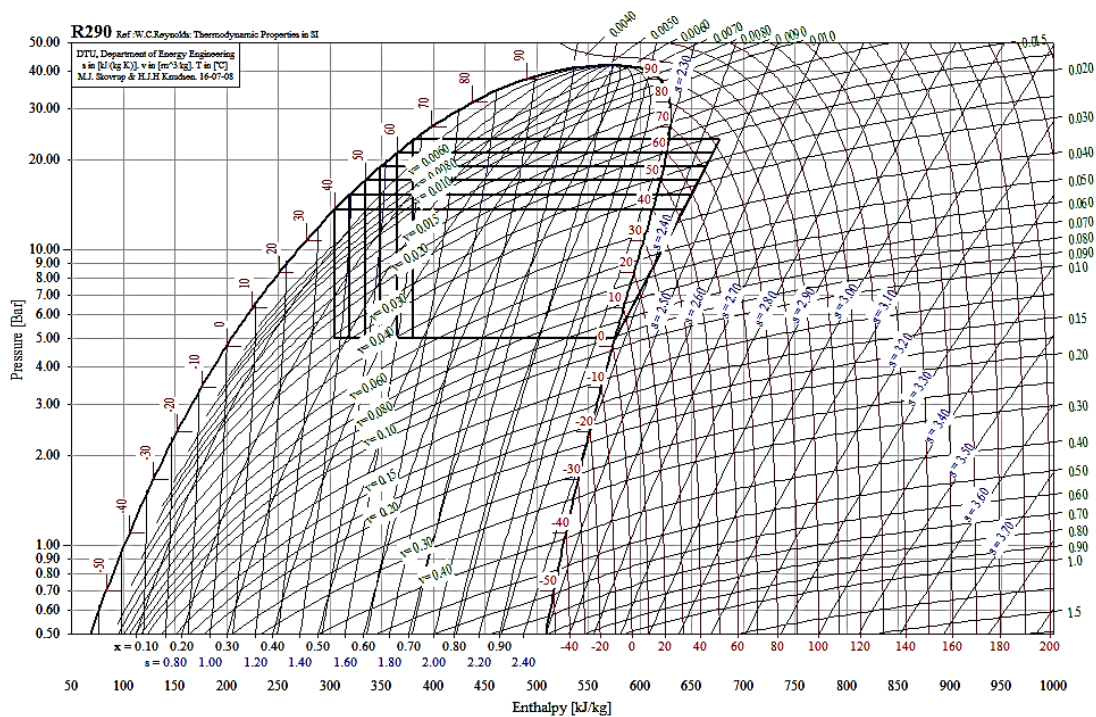


Figura C.4. Diagrama p-h r290 com fonte aerotérmica (Coolpack)

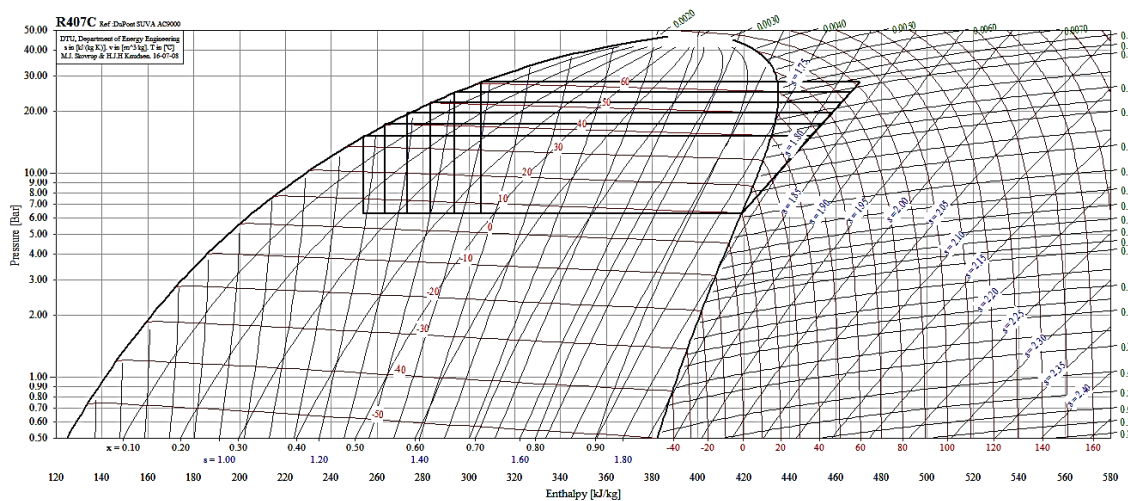


Figura C.5. Diagrama p-h 407c com fonte geotérmica (Coolpack)

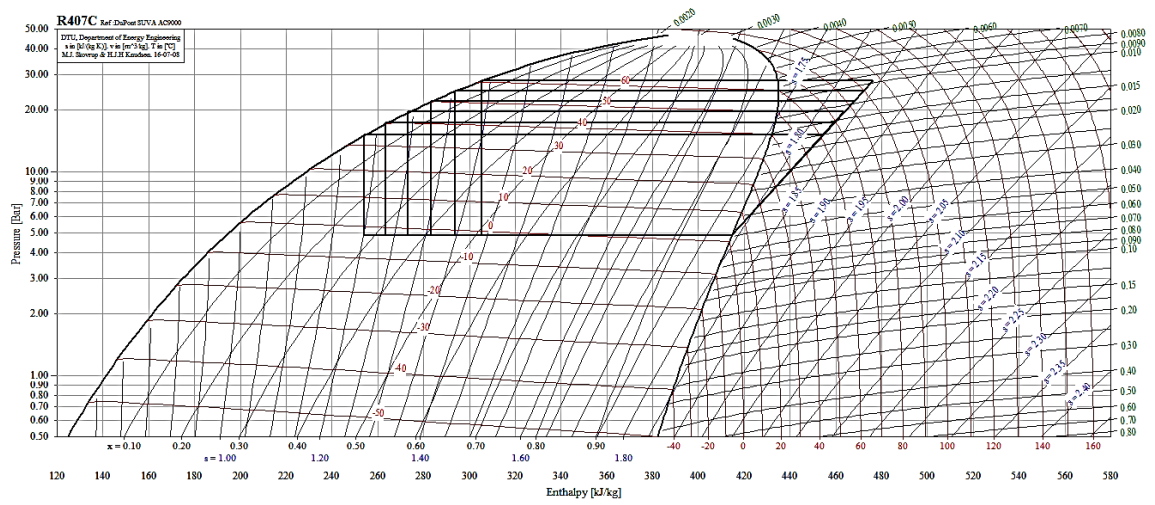


Figura C.6. Diagrama p-h r407c com fonte aerotérmica (Coolpack)

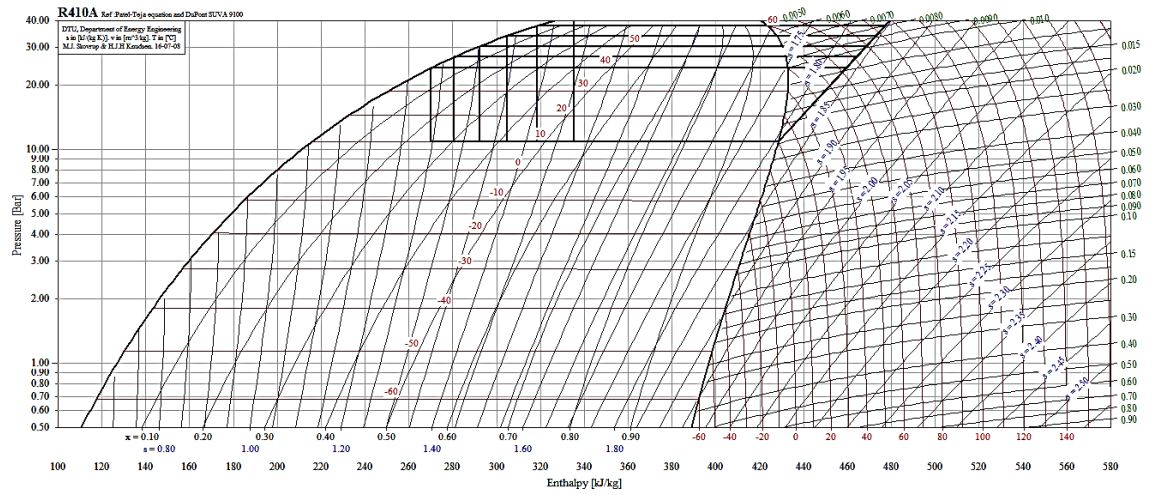


Figura C.7. Diagrama p-h 410a com fonte geotérmica (Coolpack)

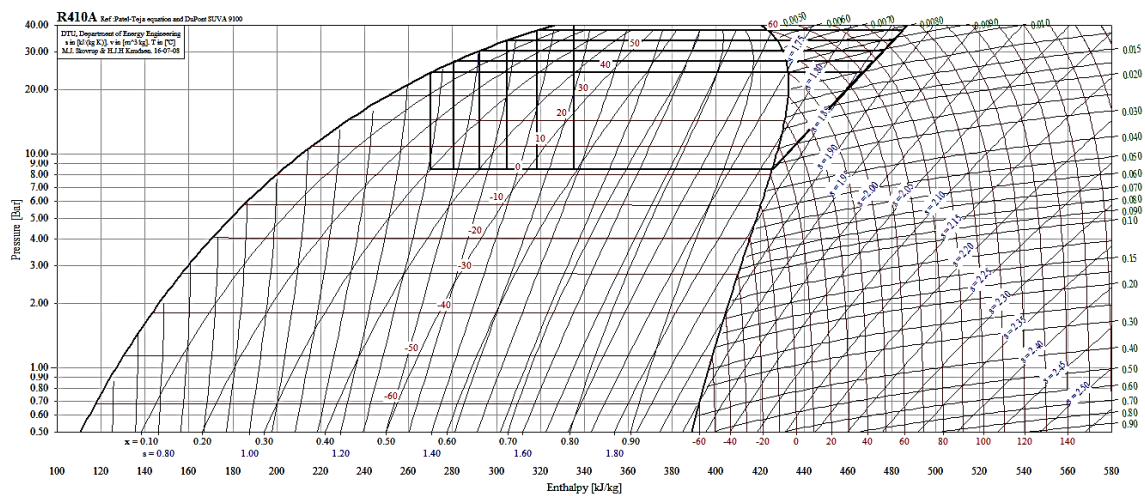


Figura C.8. Diagrama p-h r410a com fonte aerotérmica (Coolpack)

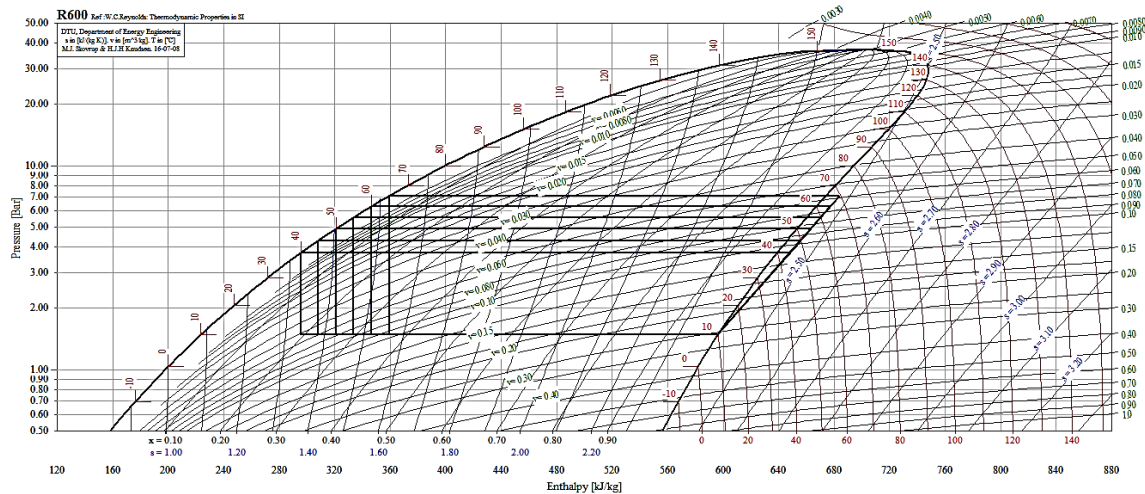


Figura C.9. Diagrama p-h r600 com fonte geotérmica (Coolpack)

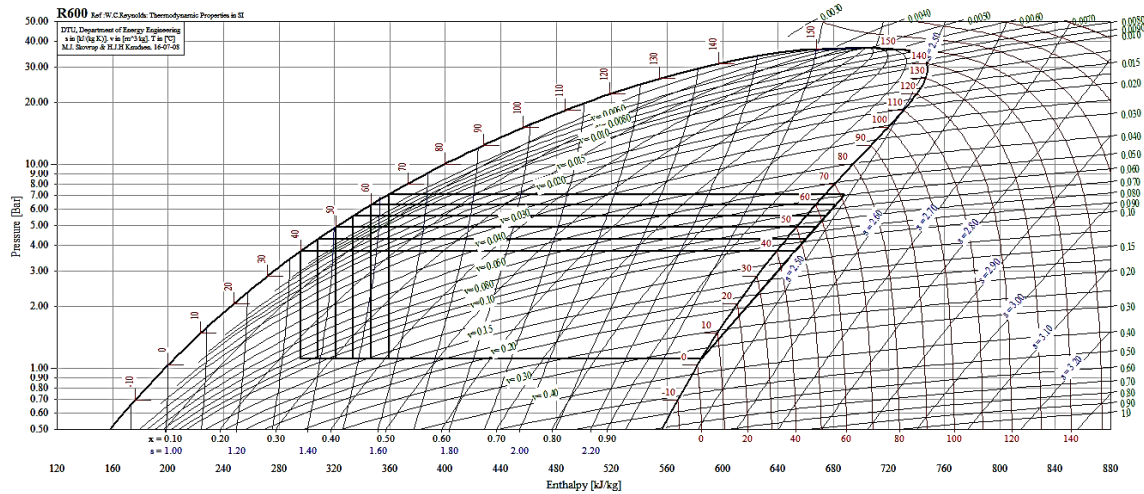


Figura C.10. Diagrama p-h r600 com fonte aerotérmica (Coolpack)

Tabela C.1. Valores de Entalpia, pressão e COP para a fonte geotérmica

		134a	290	407c	410a	600
Geo-> 10°Evaporador; 40°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	421.346	619.547	440.175	449.965	632.452
	<b>2/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	256.16	304.964	254.228	270.019	296.007
	<b>4/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>Tmáx(°C)</b>	49.5	50.0	56.6	62.8	44.6
	<b>Δhcompressor</b>	26.37	50.90	30.43	30.82	51.79
	<b>Δhcondensador</b>	173.10	329.85	195.08	189.19	351.98
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	6.56	6.48	6.41	6.14	6.80
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Geo-> 10°Evaporador; 45°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	424.054	624.826	443.347	453.234	637.844
	<b>2/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	263.712	319.273	263.443	280.704	308.443
	<b>4/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>Tmáx(°C)</b>	55.6	56.1	63.9	71.2	49.9
	<b>Δhcompressor</b>	30.24	58.44	34.96	35.49	59.49
	<b>Δhcondensador</b>	169.41	323.08	190.39	183.18	347.25
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	5.60	5.53	5.45	5.16	5.84

		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Geo-> 10°Evaporador; 50°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	426.661	629.924	446.417	456.42	643.059
	<b>2/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	271.418	333.936	273.066	292.162	321.021
	<b>4/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>Tmáx(°C)</b>	61.6	62.2	71.1	79.4	55.0
	<b>Δhcompressor</b>	33.96	65.72	39.35	40.04	66.94
	<b>Δhcondensador</b>	165.43	315.70	185.16	176.27	342.12
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	4.87	4.80	4.71	4.40	5.11
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Geo-> 10°Evaporador; 55°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	429.168	634.843	449.387	459.528	648.098
	<b>2/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	279.301	349.033	283.176	304.657	333.751
	<b>4/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>Tmáx(°C)</b>	67.5	68.2	78.2	87.5	60.0
	<b>Δhcompressor</b>	37.54	72.75	43.59	44.48	74.14
	<b>Δhcondensador</b>	161.13	307.63	179.29	168.21	336.59
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	4.29	4.23	4.11	3.78	4.54
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Geo-> 10°Evaporador; 60°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	431.576	639.587	452.259	462.566	652.963
	<b>2/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	287.385	364.684	293.877	318.642	346.598
	<b>4/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>Tmáx(°C)</b>	73.3	74.1	85.3	95.5	64.9
	<b>Δhcompressor</b>	40.98	79.53	47.69	48.82	81.09
	<b>Δhcondensador</b>	156.49	298.76	172.69	158.57	330.69
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	3.82	3.76	3.62	3.25	4.08
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Geo-> 10°Evaporador; 65°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	402.887	583.919	418.873	428.393	596.201
	<b>1/P[bar]</b>	4.145	6.326	6.327	10.817	1.48
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	433.888	644.156	455.039	465.542	657.657
	<b>2/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12

	<b>4/h[kJ/kg]</b>	295.707	381.07	305.327	335.184	359.646
	<b>4/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	79.1	80.0	92.3	103.4	69.7
	<b>Δhcompressor</b>	44.29	86.05	51.67	53.07	87.79
	<b>Δhcondensador</b>	151.47	288.90	165.21	146.28	324.35
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	3.42	3.36	3.20	2.76	3.69

		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 40°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	422.558	622.18	442.553	454.134	631.797
	<b>2/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	256.16	304.964	254.228	270.019	296.007
	<b>4/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	52.8	53.3	61.7	69.4	46.7
	<b>Δhcompressor</b>	34.57	66.66	40.03	40.93	67.19
	<b>Δhcondensador</b>	176.77	337.21	200.33	196.39	355.95
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	5.11	5.06	5.00	4.80	5.30
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 45°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	425.287	627.504	445.772	457.496	637.181
	<b>2/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	263.712	319.273	263.443	280.704	308.443
	<b>4/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	58.8	59.4	68.9	77.7	51.9
	<b>Δhcompressor</b>	38.47	74.26	44.63	45.73	74.89
	<b>Δhcondensador</b>	173.12	330.51	195.72	190.51	351.20
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	4.50	4.45	4.39	4.17	4.69
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 50°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	427.914	632.647	448.888	460.775	642.386
	<b>2/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	271.418	333.936	273.066	292.162	321.021
	<b>4/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	64.7	65.4	76.0	85.8	57.0
	<b>Δhcompressor</b>	42.22	81.61	49.08	50.41	82.32



	$\Delta h_{\text{condensador}}$	169.16	323.19	190.55	183.74	346.06
	$\rho$	0.7				
	<b>COP</b>	4.01	3.96	3.88	3.64	4.20
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 55°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	430.441	637.611	451.905	463.976	647.417
	<b>2/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	279.301	349.033	283.176	304.657	333.751
	<b>4/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	70.6	71.3	83.0	93.8	61.9
	<b><math>\Delta h_{\text{compressor}}</math></b>	45.83	88.70	53.39	54.99	89.51
	<b><math>\Delta h_{\text{condensador}}</math></b>	164.89	315.19	184.75	175.81	340.52
	$\rho$	0.7				
	<b>COP</b>	3.60	3.55	3.46	3.20	3.80
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 60°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	432.87	642.4	454.825	467.107	652.273
	<b>2/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	287.385	364.684	293.877	318.642	346.598
	<b>4/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	76.3	77.1	90.0	101.7	66.8
	<b><math>\Delta h_{\text{compressor}}</math></b>	49.30	95.54	57.56	59.46	96.45
	<b><math>\Delta h_{\text{condensador}}</math></b>	160.28	306.38	178.22	166.30	334.61
	$\rho$	0.7				
	<b>COP</b>	3.25	3.21	3.10	2.80	3.47
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 65°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	435.203	647.015	457.653	470.175	656.958
	<b>2/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	295.707	381.07	305.327	335.184	359.646
	<b>4/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	82.0	82.9	96.8	109.6	71.5
	<b><math>\Delta h_{\text{compressor}}</math></b>	52.64	102.13	61.60	63.84	103.14
	<b><math>\Delta h_{\text{condensador}}</math></b>	155.29	296.59	170.81	154.14	328.25
	$\rho$	0.7				
	<b>COP</b>	2.95	2.90	2.77	2.41	3.18

Tabela C.2. Valores de Entalpia, pressão e COP para a fonte aerotérmica

		134a	290	407c	410a	600
Aero-> 2°Evaporador; 40°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	422.558	622.18	442.553	454.134	631.797
	<b>2/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	256.16	304.964	254.228	270.019	296.007
	<b>4/P[bar]</b>	10.164	13.659	15.171	23.981	3.751
	<b>Tmáx(°C)</b>	52.8	53.3	61.7	69.4	46.7
	<b>Δhcompressor</b>	34.57	66.66	40.03	40.93	67.19
	<b>Δhcondensador</b>	176.77	337.21	200.33	196.39	355.95
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	5.11	5.06	5.00	4.80	5.30
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 45°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	425.287	627.504	445.772	457.496	637.181
	<b>2/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	263.712	319.273	263.443	280.704	308.443
	<b>4/P[bar]</b>	11.597	15.315	17.275	27.014	4.3
	<b>Tmáx(°C)</b>	58.8	59.4	68.9	77.7	51.9
	<b>Δhcompressor</b>	38.47	74.26	44.63	45.73	74.89
	<b>Δhcondensador</b>	173.12	330.51	195.72	190.51	351.20
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	4.50	4.45	4.39	4.17	4.69
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 50°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	427.914	632.647	448.888	460.775	642.386
	<b>2/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	271.418	333.936	273.066	292.162	321.021

	<b>4/P[bar]</b>	13.176	17.114	19.597	30.333	4.908
	<b>Tmáx(°C)</b>	64.7	65.4	76.0	85.8	57.0
	<b>Δhcompressor</b>	42.22	81.61	49.08	50.41	82.32
	<b>Δhcondensador</b>	169.16	323.19	190.55	183.74	346.06
	<b>η</b>	0.7				
	<b>COP</b>	4.01	3.96	3.88	3.64	4.20
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 55°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	430.441	637.611	451.905	463.976	647.417
	<b>2/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	279.301	349.033	283.176	304.657	333.751
	<b>4/P[bar]</b>	14.912	19.066	22.153	<b>33.957</b>	5.577
	<b>Tmáx(°C)</b>	70.6	71.3	83.0	93.8	61.9
	<b>Δhcompressor</b>	45.83	88.70	53.39	54.99	89.51
	<b>Δhcondensador</b>	164.89	315.19	184.75	175.81	340.52
		<b>η</b>	0.7			
	<b>COP</b>	3.60	3.55	3.46	3.20	3.80
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>
Aero-> 2°Evaporador; 60°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	432.87	642.4	454.825	467.107	652.273
	<b>2/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	287.385	364.684	293.877	318.642	346.598
	<b>4/P[bar]</b>	16.813	21.179	24.959	<b>37.908</b>	6.313
	<b>Tmáx(°C)</b>	76.3	77.1	90.0	101.7	66.8
	<b>Δhcompressor</b>	49.30	95.54	57.56	59.46	96.45
	<b>Δhcondensador</b>	160.28	306.38	178.22	166.30	334.61
		<b>η</b>	0.7			
	<b>COP</b>	3.25	3.21	3.10	2.80	3.47
		<b>134a</b>	<b>290</b>	<b>407c</b>	<b>410a</b>	<b>600</b>

Aero-> 2°Evaporador; 65°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	398.357	575.521	414.534	425.486	584.761
	<b>1/P[bar]</b>	3.146	5.005	4.845	8.501	1.112
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	435.203	647.015	457.653	470.175	656.958
	<b>2/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	295.707	381.07	305.327	335.184	359.646
	<b>4/P[bar]</b>	18.893	23.463	28.035	<b>42.209</b>	7.12
	<b>T<sub>máx</sub>(°C)</b>	82.0	82.9	96.8	109.6	71.5
	<b>Δhcompressor</b>	52.64	102.13	61.60	63.84	103.14
	<b>Δhcondensador</b>	155.29	296.59	170.81	154.14	328.25
	<b>η</b>	0.7				
<b>COP</b>	2.95	2.90	2.77	2.41	3.18	

# ANEXO D

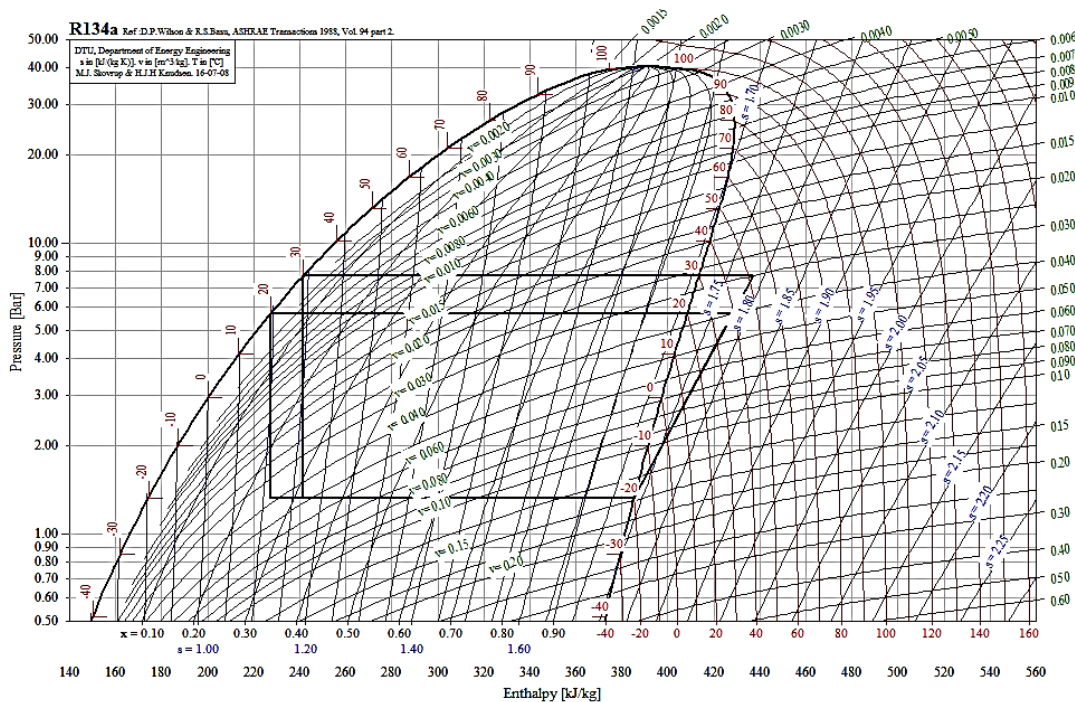


Figura D.1. Diagrama p-h r134a com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack)

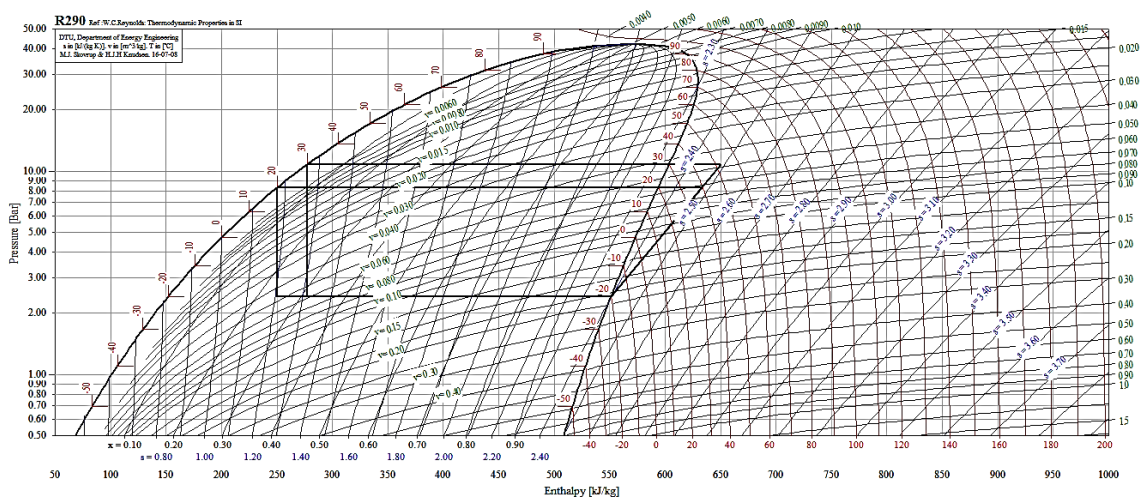


Figura D.2. Diagrama p-h r290 com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack)

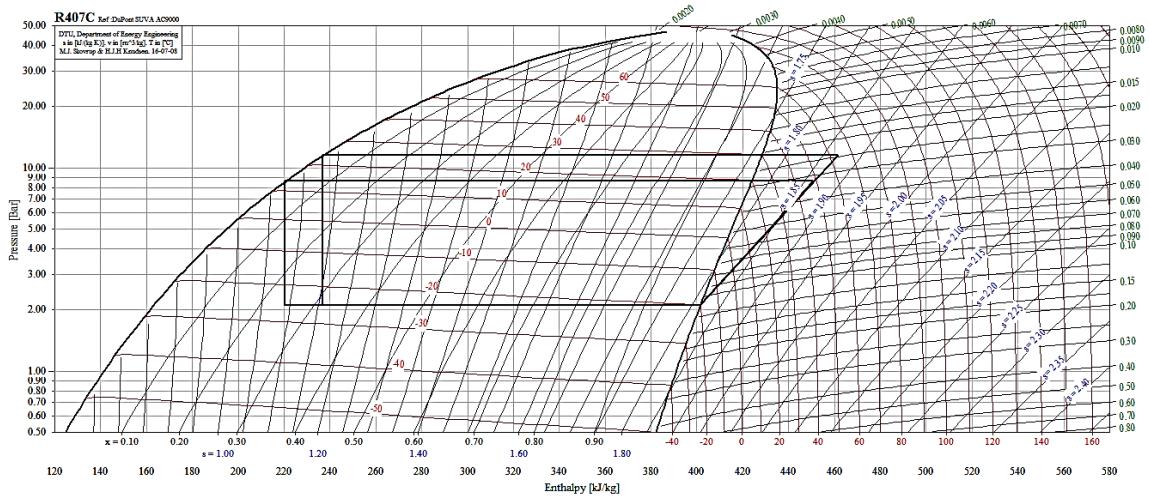


Figura D.3. Diagrama p-h r407c com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack)

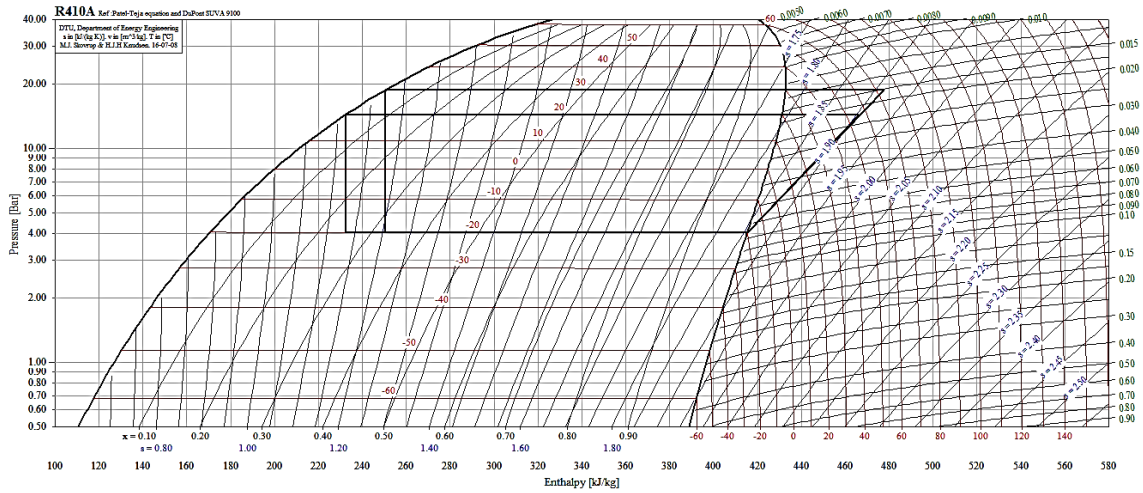


Figura D.4. Diagrama p-h r410a com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack)

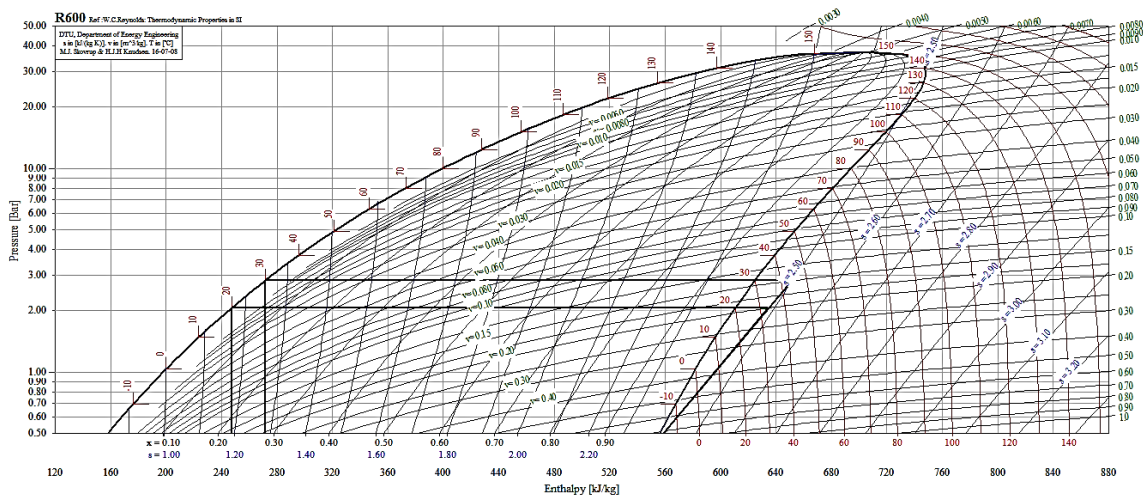


Figura D.5. Diagrama p-h r600 com fonte geotérmica(20°C) e aerotérmica(30°C) (Coolpack)

Tabela D.1. Valores de Entalpia, pressão e CF para a fonte geotérmica

		134a	290	407c	410a	600
Geo-> -20°Evaporador; 20°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	385.279	551.295	401.485	415.324	553.534
	<b>1/P[bar]</b>	1.33	2.424	2.113	4.041	0.454
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	415.161	608.494	436.078	451.11	610.04
	<b>2/P[bar]</b>	5.716	8.322	8.642	14.35	2.066
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	227.235	250.548	220.464	232.365	247.422
	<b>4/P[bar]</b>	5.716	8.322	8.642	14.35	2.066
	<b><math>\Delta h_{\text{compressor}}</math></b>	42.69	81.71	49.42	51.12	80.72
	<b><math>\Delta h_{\text{evaporador}}</math></b>	158.04	300.75	181.02	182.96	306.11
	<b><math>\rho</math></b>	0.7				
	<b>CF</b>	3.70	3.68	3.66	3.58	3.79

Tabela D.2. Valores de Entalpia, pressão e CF para a fonte aerotérmica

		134a	290	407c	410a	600
Aero-> -20°Evaporador; 30°Condensador	<b>1/h[kJ/kg]</b>	385.279	551.295	401.485	415.324	553.534
	<b>1/P[bar]</b>	1.33	2.424	2.113	4.041	0.454
	<b>2/h[kJ/kg]</b>	421.517	620.805	443.578	459.021	622.144
	<b>2/P[bar]</b>	7.701	10.749	11.557	18.698	2.814
	<b>4/h[kJ/kg]</b>	241.463	277.232	236.804	250.356	271.51
	<b>4/P[bar]</b>	7.701	10.749	11.557	18.698	2.814
	<b><math>\Delta h_{\text{compressor}}</math></b>	51.77	99.30	60.13	62.42	98.01
	<b><math>\Delta h_{\text{evaporador}}</math></b>	143.82	274.06	164.68	164.97	282.02
	<b><math>\rho</math></b>	0.7				
	<b>CF</b>	2.78	2.76	2.74	2.64	2.88