



Júlio César Gonçalves Dias

Sistema de climatização de edifícios
com uma bomba de calor geotérmica de
alto rendimento

16 Valores

Julho 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Tecnologias

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Sistema de climatização de edifícios com uma bomba de calor geotérmica de alto rendimento

Júlio César Gonçalves Dias

Júri:

Presidente: Prof. Jaime Baptista dos Santos

Orientador: Prof. Aníbal Traça de Carvalho Almeida

Vogal: Prof. Mário João Simões Ferreira dos Santos

Julho 2013

Agradecimentos

Quero aqui agradecer a todos os que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor Anibal Traça de Almeida pela sua disponibilidade e todo o seu contributo para que tudo se pudesse desenvolver da melhor maneira.

Agradeço ao Engenheiro André Quintino e ao Engenheiro João Fong que sempre me acompanharam e me ajudaram imenso em todas as áreas do desenvolvimento deste trabalho.

Por fim quero deixar o meu agradecimento à minha família e amigos pelo apoio que me deram.

Resumo

Hoje em dia as bombas de calor têm um papel importante na poupança de energia eléctrica para climatização de edifícios. Ao utilizar em conjunto com permutadores de calor geotérmicos, obtemos um melhor desempenho da bomba de calor e ainda surge a possibilidade de climatizar o edifício através do geocooling. O objectivo do projecto GroundMed é o estudo da aplicação destes sistemas no clima mediterrânico. Através de materiais de mudança de fase podemos ter um armazenamento de energia térmica que nos permite reduzir a factura energética através do desvio dos consumos eléctricos para períodos de vazio e contribuir para um melhor aproveitamento das energias renováveis.

Neste trabalho são apresentados os resultados do funcionamento do sistema instalado em Coimbra. Com as melhorias feitas fomos conseguindo obter um funcionamento cada vez melhor do sistema. Os cálculos sobre a poupança que pode existir com a implementação do armazenamento de energia térmica e do geocooling concluem que ambos permitem uma poupança significativa na factura energética.

Palavras-chave: Bomba de calor; permutador de calor geotérmico; GroundMed; materiais de mudança de fase; geocooling.

Abstract

Nowadays, heat pumps have an important role in saving electrical energy for heating and cooling buildings. When used together with geothermal heat exchangers, a better performance of the heat pump can be obtained and there is also the possibility of cooling the building using geocooling.

The aim of the project GroundMed is to study the application of these systems in the Mediterranean climate. Using phase change materials it's possible to have a thermal energy storage that allows us to reduce the energy bill by shifting the electricity consumption to off-peak periods and contribute to a better use of renewable energy.

This essay shows the results of the functioning of the system installed in Coimbra. With the improvements made, were managed to get a better functioning of the system. The calculations of the savings that may exist with the implementation of the thermal energy storage and geocooling conclude that both allow significant savings in the energy bill.

Keywords: Heat pump; borehole heat exchanger; GroundMed; Phase-change materials; geocooling.

Índice

Introdução.....	1
1. Sistemas de climatização com bomba de calor geotérmica e a sua importância	2
1.1. Importância da energia eléctrica na climatização de edifícios.....	2
1.2. Bombas de calor água-água.....	2
1.2.1. COP e EER.....	3
1.3. Permutadores de calor geotérmicos.....	4
1.4. Armazenamento de energia térmica num sistema com bomba de calor	6
1.4.1. Materiais de mudança de fase	7
1.4.2. Técnicas de controlo.....	7
1.4.3. Integração de renováveis	8
1.4.4. Desvio de carga para horas de vazio.	9
1.5. Geocooling	10
2. O caso de estudo de Coimbra.....	11
2.1. Introdução ao projecto GroundMed	11
2.2. Descrição do Edifício da ARHC e do sistema de climatização	12
2.3. Dados obtidos na instalação	13
2.3.1. Época de aquecimento.....	15
2.3.2. Época de arrefecimento.....	26
2.3.3. Macro para tratamento de dados em Microsoft Excel.....	32
2.4. Aplicação do armazenamento térmico	33
2.4.1. Escolha do material de mudança de fase.....	33
2.4.2. Escolha da técnica de controlo	35
2.4.3. Cálculos para o armazenamento térmico	36
2.5. Aplicação do geocooling	41
2.5.1. Escolha da técnica de controlo	41
2.5.2. Cálculos para o geocooling	42
Conclusão	46
Bibliografia.....	48
Anexo A – Descrição pormenorizada do edifício da ARHC e do sistema de climatização	49
Anexo B – Código da macro para tratamento dos dados diários	67

Índice de equações

Equação 1 - COP	3
Equação 2 - EER	3

Índice de figuras

Figura 1 - Esquema de funcionamento de uma bomba de calor (NRC, 2004)	2
Figura 2 - Permutadores de calor geotérmicos horizontais (Mendrinós, 2012).....	4
Figura 3 - Permutadores de calor geotérmicos verticais (Mendrinós, 2012)	4
Figura 4 - Permutadores de calor geotérmicos em U (Mendrinós, 2012).....	5
Figura 5 - Variação da temperatura do solo (NRC, 2005)	5
Figura 6 - Temperatura do solo em vários locais da Europa (Sanner, 2011).....	6
Figura 7 - Mudança de estado dos materiais (Davis, 2011).....	7
Figura 8 – Técnicas de controlo (ASHRAE, 2009)	8
Figura 9 – Exemplo de desvio de carga (Jacob, 2011).....	9
Figura 10 - Funcionamento anual com bomba de calor e geocooling (Pahud, 2011).....	10
Figura 11 - Instalações piloto do projecto GroundMed (Mendrinós, 2011)	11
Figura 12 - Esquema do sistema	12
Figura 13 - Esquema do sistema com geocooling.....	12
Figura 14 - Temperaturas da água resultantes da fuga nas válvulas	14
Figura 15 - Temperaturas da água 18 de Abril de 2012.....	15
Figura 16 - Potência da bomba de calor 18 de Abril de 2012.....	15
Figura 17 - Outros consumos 18 de Abril de 2012	16
Figura 18 - Potência térmica 18 de Abril de 2012	16
Figura 19 - Energia térmica da época de aquecimento de 2012.....	17
Figura 20 - COP da época de aquecimento de 2012	17
Figura 21 - Consumos eléctricos da época de aquecimento de 2012.....	17
Figura 22 - Temperaturas da água 16 de Janeiro de 2013.....	19
Figura 23 - Outros consumos 16 de Janeiro de 2013	19
Figura 24 - Potência da bomba de calor 16 de Janeiro de 2013.....	19
Figura 25 - Potência térmica 16 de Janeiro de 2013	20
Figura 26 - COP da época de aquecimento de 2013 (antes)	20
Figura 27 - Energia térmica da época de aquecimento de 2013 (antes).....	21
Figura 28 - Consumo da bomba de calor da época de aquecimento de 2013 (antes)	21
Figura 29 - Outros consumos da época de aquecimento de 2013 (antes)	21
Figura 30 - Temperaturas da água 29 de Março de 2013.....	22
Figura 31 - Potência da bomba de calor 29 de Março de 2013	22
Figura 32 - Outros consumos 29 de Março de 2013	23
Figura 33 - Potência térmica 29 de Março de 2013	23
Figura 34 - COP da época de aquecimento de 2013 sem 2ª bomba de circulação (depois)	24
Figura 35 - COP da época de aquecimento de 2013 com 2ª bomba de circulação (depois).....	24
Figura 36 - Energia térmica da época de aquecimento de 2013 (depois)	24
Figura 37 - Consumo da bomba de calor da época de aquecimento de 2013 (depois)	25
Figura 38 - Outros consumos da época de aquecimento de 2013 (depois).....	25
Figura 39 - Temperaturas da água 5 de Setembro de 2012.....	26
Figura 40 - Potência da bomba de calor 5 de Setembro de 2012	26
Figura 41 - Outros consumos 5 de Setembro de 2012	27
Figura 42 - Potência térmica 5 de Setembro de 2012	27
Figura 43 - EER da época de arrefecimento de 2012.....	28

Figura 44 - Energia térmica da época de arrefecimento de 2012.....	28
Figura 45 - Consumos eléctricos da época de arrefecimento de 2012.....	28
Figura 46 - Temperaturas da água 9 de Julho de 2013.....	29
Figura 47 - Potência da bomba de calor 9 de Julho de 2013.....	29
Figura 48 - Outros consumos 9 de Julho de 2013.....	30
Figura 49 - Potência térmica 9 de Julho de 2013.....	30
Figura 50 - EER da época de arrefecimento de 2013.....	31
Figura 51 - Energia térmica da época de arrefecimento de 2013.....	31
Figura 52 - Consumo da bomba de calor da época de arrefecimento de 2013.....	31
Figura 53 - Outros consumos da época de arrefecimento de 2013.....	32
Figura 54 - Menu com os gráficos diários criados pela macro.....	33
Figura 55 - Aspecto dos totais diários obtidos com a macro.....	33
Figura 56 - Ciclo da água no carregamento do armazenamento de energia térmica.....	35
Figura 57 - Ciclo da água na climatização a partir do armazenamento de energia térmica.....	36
Figura 58 - Temperatura exterior 7 de Abril de 2013.....	37
Figura 59 - Radiação solar 7 de Abril de 2013.....	37
Figura 60 - Potência térmica 7 de Abril de 2013.....	38
Figura 61 - Ciclo da água com a utilização do geocooling.....	41
Figura 62 - Temperatura exterior 1 de Julho de 2013.....	42
Figura 63 - Radiação solar 1 de Julho de 2013.....	43
Figura 64 - Potência térmica 1 de Julho de 2013.....	43

Índice de tabelas

Tabela 1 - Tarifário eléctrico.....	13
Tabela 2 - Consumos 18 de Abril de 2012.....	16
Tabela 3 - COP 18 de Abril de 2012.....	16
Tabela 4 - Consumos da época de aquecimento de 2012.....	18
Tabela 5 - COP da época de aquecimento de 2012.....	18
Tabela 6 - Consumos 16 de Janeiro de 2013.....	20
Tabela 7 - COP 16 de Janeiro de 2013.....	20
Tabela 8 - Consumos da época de aquecimento de 2013 (antes).....	22
Tabela 9 - COP da época de aquecimento de 2013 (antes).....	22
Tabela 10 - Consumos 29 de Março de 2013.....	23
Tabela 11 - COP 29 de Março de 2013.....	23
Tabela 12 - Consumos da época de aquecimento de 2013 (depois).....	25
Tabela 13 - COP da época de aquecimento de 2013 (depois).....	25
Tabela 14 - Consumos 5 de Setembro de 2012.....	27
Tabela 15 - EER 5 de Setembro de 2012.....	27
Tabela 16 - Consumos da época de arrefecimento de 2012.....	29
Tabela 17 - EER da época de arrefecimento de 2012.....	29
Tabela 18 - Consumos 9 de Julho de 2013.....	30
Tabela 19 - EER 9 de Julho de 2013.....	30
Tabela 20 - Consumos da época de arrefecimento de 2013.....	32
Tabela 21 - EER da época de arrefecimento de 2013.....	32
Tabela 22 - Lista dos materiais de mudança de fase.....	34
Tabela 23 - Consumos sem armazenamento de energia térmica.....	38
Tabela 24 - COP sem armazenamento de energia térmica.....	38
Tabela 25 - Consumos com armazenamento de energia térmica de 100 kWh.....	39
Tabela 26 - COP com armazenamento de energia térmica de 100 kWh.....	39
Tabela 27 - Consumos com armazenamento de energia térmica de 25 kWh.....	40
Tabela 28 - COP com armazenamento de energia térmica de 25 kWh.....	40
Tabela 29 - Poupanças resultantes da utilização do armazenamento de energia térmica.....	40
Tabela 30 - Consumos sem a utilização de geocooling.....	44
Tabela 31 - EER sem a utilização de geocooling.....	44
Tabela 32 - Consumos com a utilização de geocooling.....	45
Tabela 33 - EER com a utilização de geocooling.....	45
Tabela 34 - Poupanças resultantes da utilização de geocooling.....	45

Introdução

Esta dissertação tem por base o sistema de climatização do edifício da Administração da Região Hidrográfica do Centro (ARHC) em Coimbra que utiliza uma bomba de calor de alto rendimento acoplada a permutadores de calor geotérmicos. Este sistema de climatização foi instalado no âmbito da participação do Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra no Projecto GroundMed, um projecto sobre sistemas avançados de bombas de calor acopladas a permutadores de calor geotérmicos para aquecimento e arrefecimento no clima mediterrânico.

O objectivo deste trabalho centra-se no tratamento e análise dos dados recolhidos do funcionamento do sistema de climatização para as épocas de aquecimento e arrefecimento, na análise da viabilidade de adicionar ao sistema um armazenamento de energia térmica para a época de aquecimento e escolha dos seus componentes e métodos de utilização e na análise da viabilidade de adicionar ao sistema a possibilidade de utilizar o geocooling na época de arrefecimento, assim como a escolha do método de utilização.

O Capítulo 1 vai servir como que uma introdução para permitir uma melhor interpretação dos objectivos do trabalho. Portanto vamos falar muito resumidamente sobre bombas de calor, permutadores de calor geotérmicos e materiais de mudança de fase. Vamos também salientar a importância da utilização de bombas de calor para climatização assim como o impacto que a utilização do armazenamento de energia térmica e o geocooling podem ter na factura energética e no bom funcionamento da rede eléctrica.

No capítulo 2 vamos falar no caso de estudo de Coimbra começando por fazer uma breve descrição do que é o projecto GroundMed e fazer a descrição do sistema de climatização que serve de base para este trabalho. Vamos ver os dados obtidos ao longo dos períodos de funcionamento no modo de aquecimento e arrefecimento assim como a macro que foi criada para tratar os dados diários obtidos pelo sistema de aquisição de dados. Por último vamos falar do armazenamento de energia térmica, através de materiais de mudança de fase, e do geocooling. De entre uma lista de materiais de mudança de fase disponíveis no mercado escolhemos qual o que se enquadra melhor para o nosso caso de estudo. Vamos também propor um método de funcionamento para o armazenamento de energia térmica e para o geocooling.

1. Sistemas de climatização com bomba de calor geotérmica e a sua importância

1.1. Importância da energia eléctrica na climatização de edifícios.

Um dos grandes objectivos da União Europeia é reduzir o consumo de energia e os desperdícios e há um grande potencial para essas reduções aplicando medidas com uma boa relação custo-benefício. Cerca de 40% da energia é consumida em edifícios e por isso a União Europeia criou a EPBD, a Directiva relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios. O objectivo é reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂ através da utilização de tecnologias amigas do ambiente e do aumento da eficiência da sua utilização para assim estar de acordo com os objectivos do protocolo de Quioto. Com a evolução das energias renováveis e com a cada vez menor emissão de CO₂ por kW de energia eléctrica, esta directiva incentiva a climatização através de bombas de calor de alto rendimento em vez de tecnologias que utilizem combustíveis fósseis.

1.2. Bombas de calor água-água

Uma bomba de calor é uma máquina que transfere calor do seu evaporador para o seu condensador. Para isso usa um fluido de trabalho que é comprimido e expandido para alterar a sua temperatura e assim absorver ou libertar calor onde é pretendido. Na Figura 1 podemos observar o seu ciclo de funcionamento. As bombas de calor que usam água como fonte de calor podem ser do tipo água-água ou água-ar. Dependendo da instalação é escolhida uma ou outra. No entanto na Europa predomina o uso das bombas de calor água-água dentro das bombas de

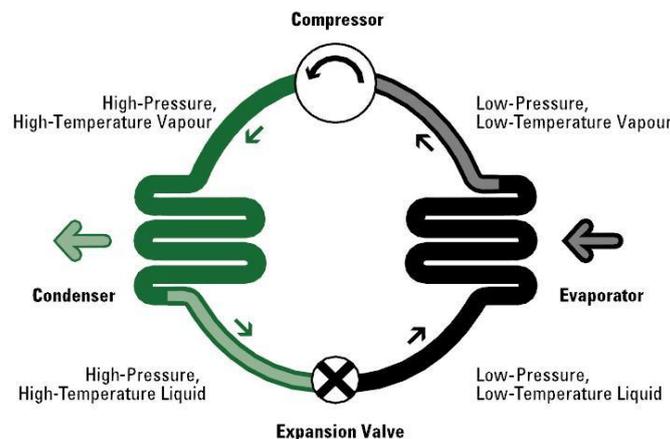


Figura 1 - Esquema de funcionamento de uma bomba de calor (NRC, 2004)

calor que usam água como fonte de calor. De salientar que a água tem propriedades de transferência de calor muito melhores que o ar. As bombas de calor são utilizadas para o aquecimento e arrefecimento de edifícios, bem como para o fornecimento de água quente para uso doméstico. Podem ser acopladas a permutadores de calor geotérmicos que fornecerem água com uma temperatura estável, que, quando comparada com o ar, é mais elevada no pico da carga de aquecimento e mais baixa no pico da carga de arrefecimento, fazendo com que a diferença de

temperatura entre o condensador e o evaporador da bomba de calor seja menor. Um sistema bem desenhado e concebido têm uma eficiência energética pelo menos 30% superior quando comparado com as melhores bombas de calor ar-ar.

Ao contrário do que acontecia há 10 anos atrás, hoje em dia temos disponíveis no mercado bombas água-água de alto rendimento. Os fluidos de trabalho das bombas mais usados são o R407C e o R134A, apesar da tendência em serem alterados para o R410A, cujas propriedades de transferência de calor são superiores e também tem um melhor desempenho nos sistemas reversíveis de aquecimento e arrefecimento. Habitualmente são usados compressores do tipo scroll com controlo on/off. Algumas bombas de calor utilizam mais do que um compressor e utiliza-os alternadamente ou os dois ao mesmo tempo quando a carga térmica assim o exige. Deste modo o consumo de energia eléctrica é menor e ao longo do tempo os dois compressores apresentam um desgaste semelhante.

Para obtermos um bom coeficiente de performance, entre outras coisas devemos ter um compressor de alto rendimento e as perdas de temperatura no condensador e no evaporador devem ter valores muito reduzidos. O projecto europeu Groundhit sobre tecnologia para bombas de calor acopladas a permutadores de calor geotérmicos que foi terminado em 2008 concluiu que diminuindo a diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e a água para menos de 1°C no condensador e menos de 2°C no evaporador, o coeficiente de performance aumenta 12 a 15% quando comparado com as melhores bombas de calor no mercado na altura em que foi realizado o projecto.

1.2.1. COP e EER

Para medir a eficiência das bombas de calor é utilizado o COP, coeficiente de performance, e o EER, relação de eficiência energética. Quando a bomba de calor está a operar no regime de aquecimento é utilizado o COP e quando está no regime de arrefecimento é utilizado o EER. O COP e o EER são a relação entre a energia térmica fornecida ou retirada do local a climatizar, respectivamente, e a energia eléctrica consumida.

$$COP = \frac{E_{TérmicaInterna}}{E_{EléctricaConsumida}}$$

Equação 1 - COP

$$EER = \frac{E_{TérmicaInterna}}{E_{EléctricaConsumida}}$$

Equação 2 - EER

1.3. Permutadores de calor geotérmicos

Os permutadores de calor geotérmicos são compostos por tubos enterrados no solo. Podem estar dispostos na horizontal, geralmente entre 1,2 a 2 metros de profundidade, ou na vertical em furos. O material típico para estas tubagens é Polietileno de alta densidade (HDPE) com um diâmetro exterior de 32 ou 40 mm. Este material dá aos permutadores um tempo de vida de cerca de 50 anos. Dependendo da gama de temperaturas para que o circuito foi desenhado, o fluido que circula nas tubagens pode ser água ou uma mistura de água com anticongelante. Este fluido circula entre o permutador e a bomba de calor. Há também permutadores de calor geotérmicos a partir de poços de água subterrâneos. Neste caso a água é bombeada a partir do subsolo, vai ser usada como fonte ou absorvente de calor e depois é drenada num outro ponto do subsolo, constituindo assim um sistema aberto.

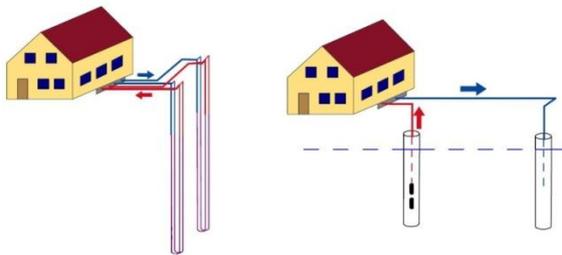


Figura 3 - Permutadores de calor geotérmicos verticais (Mendrinós, 2012)

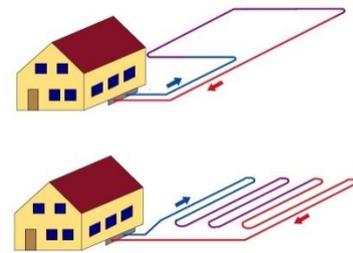


Figura 2 - Permutadores de calor geotérmicos horizontais (Mendrinós, 2012)

Apesar de os permutadores de calor geotérmicos horizontais terem um custo mais baixo, a maior parte dos sistemas instalados usam furos permutadores de calor pois têm um desempenho melhor para o sistema e os requisitos de espaço são muito menores quando comparados com os horizontais.

O sistema de furos permutadores de calor utiliza um ou dois tubos em U, como podemos observar na Figura 4, colocados dentro de um ou mais furos verticais de 50 a 100 metros de profundidade. O espaço que fica entre os tubos em U e as paredes do furo pode ser cheio com água subterrânea, se o nível freático for suficientemente elevado e se não houver o problema de interferência entre diferentes lençóis freáticos, ou pode ser preenchido com argamassa. A argamassa isola os diferentes lençóis freáticos, impedindo que haja circulação de água entre eles através do furo. A argamassa deve preencher bem o espaço entre os tubos e as paredes do furo de modo a que não haja espaços vazios que dificultem a transferência de calor. Há no mercado argamassas melhoradas para terem uma boa condutividade térmica de modo a melhorarem a transferência de calor nos furos. Há também fabricantes que já têm disponíveis outros tipos de material específico para permutadores de calor geotérmicos tais como tubos, válvulas, bombas de circulação, entre outros. O projecto, instalação e comissionamento de todos os tipos de permutadores de calor geotérmicos são descritos em detalhe na norma alemã VDI 4640, a qual

serviu de base para a norma europeia EN 15450 “Sistemas de aquecimento em edifícios – Projecto de sistemas de aquecimento com bomba de calor” (Mendrinós, 2012).

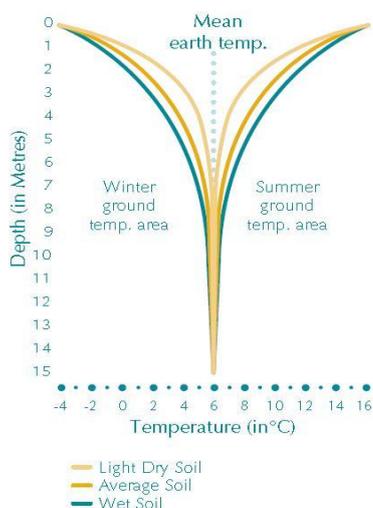


Figura 5 - Variação da temperatura do solo (NRC, 2005)



Figura 4 - Permutadores de calor geotérmicos em U (Mendrinós, 2012)

As temperaturas de funcionamento dos permutadores de calor geotérmicos variam consoante o local onde estão instaladas. Enquanto na Suécia a temperatura de funcionamento é de -3 a 0°C para uma temperatura do solo de cerca de 8,5°C, na Alemanha já ronda -3 a 2°C para uma temperatura do solo no estado natural de 9°C. Nestas condições um permutador geotérmico horizontal consegue fornecer 8 a 32 W/m² de energia térmica, enquanto um vertical consegue fornecer 20 a 70W/m, dependendo das características do subsolo e da quantidade de água que nele existe. Caso existam fortes correntes de água no subsolo a extracção de calor pode chegar aos 100W/m em permutadores de furos verticais para furos individuais. No caso de campos de permutadores de calor geotérmicos de furos verticais é necessário considerar a interferência entre eles pois nestes campos cria-se um efeito de armazenamento.

No sul da Europa, onde é comum ter temperaturas do solo de 15 a 18°C, a extracção de calor pode ser aumentada em 50% para as mesmas temperaturas de funcionamento dos casos acima referidos. No entanto para a mesma extracção de calor dos exemplos já referidos, no sul da Europa podemos ter temperaturas de funcionamento nos permutadores na ordem dos 3 a 8°C. Este aumento da temperatura de funcionamento vai permitir que o sistema tenha um desempenho melhor, reduzindo assim o consumo de energia eléctrica.

A temperatura do solo até aos 15 metros de profundidade varia consoante a temperatura do ar exterior. A 15 metros de profundidade já se pode considerar que a temperatura corresponde á temperatura média anual do ar exterior tal como é exemplificado na Figura 5. A partir dos 15 metros de profundidade a temperatura aumenta cerca de 3°C por cada 100 metros que descemos. Podemos ver na Figura 6 a temperatura média do solo para vários locais da Europa.

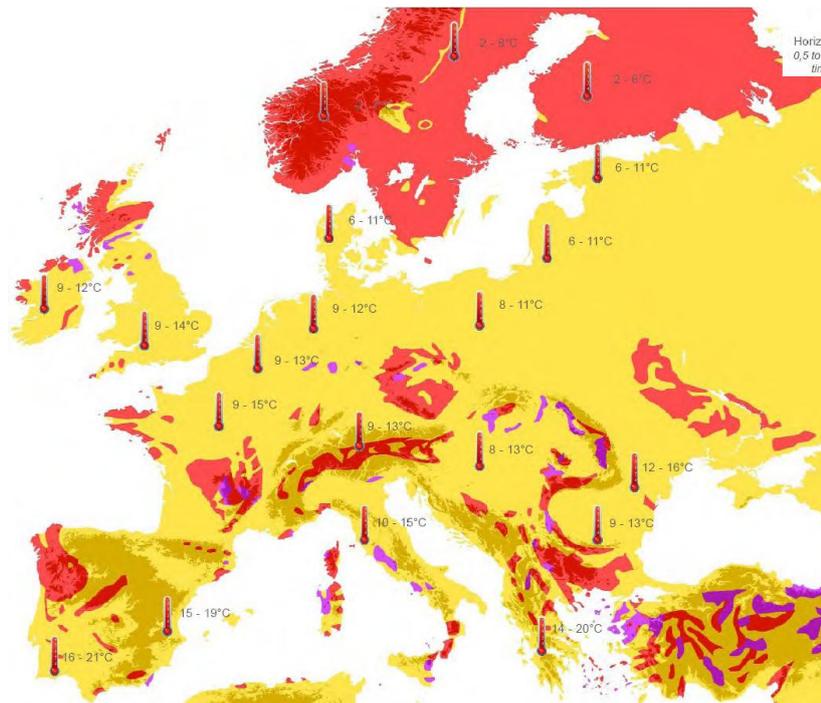


Figura 6 - Temperatura do solo em vários locais da Europa (Sanner, 2011)

O desempenho térmico de um permutador geotérmico pode ser medido através do teste de resposta térmica. Durante este teste é transferido calor para o fluido que entra no permutador e é medida a temperatura a que o fluido sai do permutador. A condutividade térmica e a resistência térmica do permutador podem ser calculadas a partir de simulações feitas por computador. Normalmente é feito o ensaio de resposta térmica assim que está concluído o primeiro furo para permitir calcular ao certo quantos furos são necessários para o sistema.

1.4. Armazenamento de energia térmica num sistema com bomba de calor

Nos sistemas de climatização o armazenamento de energia é utilizado quando queremos que o consumo de energia eléctrica da bomba de calor seja feito num momento diferente da utilização da energia térmica. Normalmente o objectivo é diminuir os custos com a energia consumida ou aproveitar alguma forma de energia que não está sempre disponível. O armazenamento consiste normalmente num depósito com material ao qual vamos adicionar ou retirar energia térmica.

Um exemplo é o armazenamento de frio em que é utilizada água sob a forma de gelo para aproveitar o seu elevado calor latente de fusão. Durante o armazenamento a bomba de calor está a fornecer água a uma temperatura abaixo da temperatura de formação do gelo de modo a retirar energia térmica do material. Quando é necessário descarregar o armazenamento, a água quente que vem da climatização transfere a sua energia para o gelo, diminuindo assim a sua temperatura e evitando o funcionamento da bomba de calor. Este método também pode ser usado ao contrário para armazenamento de calor.

De entre os materiais existentes para armazenamento de energia térmica, vamos apenas falar dos materiais de mudança de fase que são os que interessam no projecto em que estamos a trabalhar.

1.4.1. Materiais de mudança de fase

Para o armazenamento de energia térmica é possível utilizar os materiais de modo a que a sua temperatura de armazenamento seja constante. Para isso utiliza-se o calor latente do material que é a energia que o material precisa de absorver ou libertar para mudar de fase (ver Figura 7). Partindo deste princípio foram desenvolvidos materiais para terem temperaturas de fusão adequadas para as mais variadas aplicações e terem ao mesmo tempo um valor de calor latente elevado de modo a permitir armazenar grandes quantidades de energia em volumes pequenos. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade para o calor latente é J/Kg (Joules por Quilograma).

Hoje em dia já existe no mercado uma grande quantidade de materiais de mudança de fase (mais conhecidos pela sua sigla inglesa *PCM*) e que cobrem uma vasta gama de temperaturas de fusão. Há também depósitos e recipientes produzidos a pensar na utilização em sistemas de climatização.

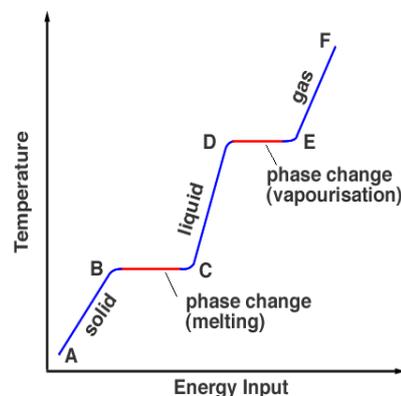


Figura 7 - Mudança de estado dos materiais (Davis, 2011)

1.4.2. Técnicas de controlo

Durante o armazenamento de energia térmica o mais comum é fazê-lo nos períodos em que a energia eléctrica é mais barata ou nos períodos em que a carga térmica é nula. Portanto vamos ter a bomba de calor a funcionar apenas para carregar o depósito de armazenamento. No entanto também é possível, através de válvulas de regulação de caudal, a bomba de calor estar a funcionar para carregar o depósito de armazenamento e fornecer energia térmica para o espaço condicionado em simultâneo.

Durante a descarga do depósito de armazenamento podemos ter o sistema a operar de várias formas. O que faz mais sentido é utilizar a energia térmica armazenada nos períodos em que a energia eléctrica é mais cara ou nos períodos de pico da carga térmica do espaço condicionado.

Muitas vezes estes períodos acontecem em simultâneo. Se for usado quando a energia eléctrica é mais cara vamos diminuir os gastos com a energia eléctrica e se for usado nos picos de carga térmica vai-nos permitir ter uma bomba de calor subdimensionada, diminuindo assim o custo de aquisição da bomba de calor pois não vamos ter necessidade de dimensionar a bomba de calor para o pico da carga térmica. A Figura 8 mostra vários tipos de controlo.

A forma mais simples de controlo é desligar a bomba de calor e usar apenas o armazenamento térmico para a climatização. Se for utilizado no período em que a energia eléctrica é mais cara normalmente este é o método mais vantajoso.

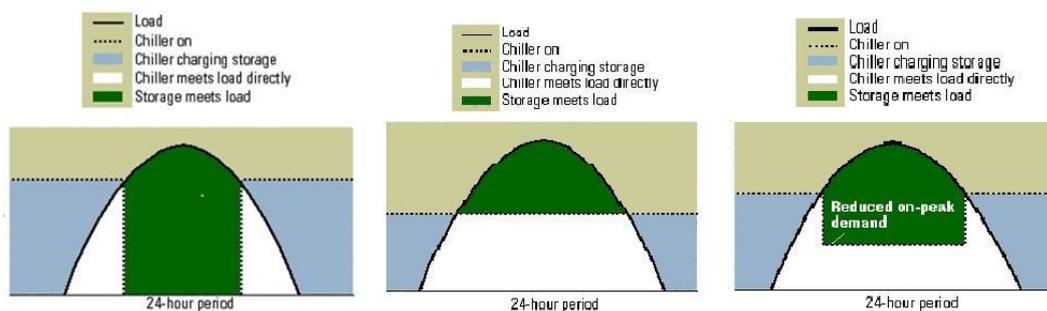


Figura 8 – Técnicas de controlo (ASHRAE, 2009)

Outra forma de controlo é ter a bomba de calor a debitar sempre a mesma potência térmica e o armazenamento térmico debitar a energia necessária para conseguir satisfazer a carga térmica do espaço condicionado. É normalmente o melhor método para quando utilizamos o armazenamento no período de pico da carga térmica e temos a bomba de calor subdimensionada.

Por último temos um método de controlo em que reduzimos a potência térmica fornecida pela bomba de calor e usamos o armazenamento térmico para satisfazer a restante parte da carga térmica. Este método é uma mistura dos dois outros métodos, o que nos permite ter a bomba de calor subdimensionada e reduzir o consumo de energia eléctrica durante o período de descarga do armazenamento térmico.

1.4.3. Integração de renováveis

Com o desenvolvimento das energias renováveis apercebemo-nos que nem sempre estão disponíveis quando precisamos. Portanto uma solução lógica é aproveitar toda a energia que elas nos dão e armazenar o excedente para consumir quando elas não estão disponíveis.

Dentro do âmbito do armazenamento de energia térmica aplicado á climatização podemos salientar duas situações. Uma delas é o armazenamento da energia solar sob a forma de energia térmica para consumir quando não há sol. Para isto podemos por exemplo ter painéis solares para aquecimento de água sanitária e armazenar o excedente para utilizar durante os períodos em que não há Sol. Deste modo vamos diminuir o consumo de energia associado ao aquecimento de

água. Outra situação é o desenvolvimento da energia eólica. Com a proliferação dos geradores eólicos observamos muitas vezes que temos produção excedente de energia eléctrica durante a noite, que é precisamente o momento do dia em que o consumo é menor, o que faz com que o preço da energia eléctrica seja mais baixo durante esses períodos de tempo. Ao aproveitarmos esses períodos de tempo para carregar o armazenamento de energia térmica que vai ser utilizada durante os períodos fora das horas de vazio vamos estar a reduzir a factura energética para a climatização e ao mesmo tempo vamos contribuir para a redução das emissões de CO₂.

Resumidamente podemos dizer que a utilização de armazenamento de energia térmica vai contribuir para um melhor aproveitamento das energias renováveis, diminuindo assim as emissões de CO₂ para a atmosfera, ao mesmo tempo que tem vantagens para o utilizador através da redução da factura energética.

1.4.4. Desvio de carga para horas de vazio.

Um dos problemas que existe na rede eléctrica é a existência de períodos em que a carga é muito elevada e de momentos em que a carga é muito baixa, as chamadas horas de pico e horas de vazio. Isto obriga a que o sistema esteja dimensionado para a carga de pico de modo a conseguir satisfazer sempre a carga. Como preço dos componentes da rede eléctrica aumenta com o aumento da sua capacidade isto leva a que sejam necessários investimentos elevados na rede eléctrica de modo a conseguir satisfazer a carga apenas algumas horas por dia. Ao utilizarmos o armazenamento de energia podemos carregar o armazenamento durante os períodos de vazio e

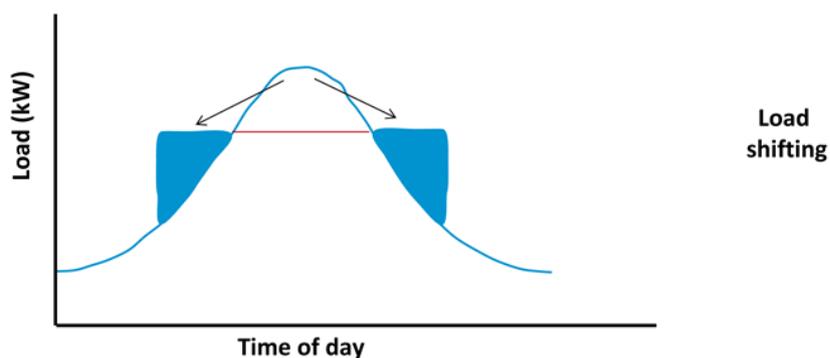


Figura 9 – Exemplo de desvio de carga (Jacob, 2011)

utilizar essa energia armazenada durante os períodos de pico. Deste modo desviamos os consumos das horas de pico para as horas de vazio, diminuindo assim o consumo das horas de ponta. Com os aumentos do consumo de energia eléctrica que se verificam, isto faz com que se consiga aumentar o consumo de energia eléctrica sem aumentar o consumo nas horas de pico e portanto sem a necessidade de fazer investimentos no reforço da rede eléctrica.

1.5. Geocooling

Uma bomba de calor acoplada a um permutador geotérmico tem a vantagem de ter água proveniente do permutador a uma temperatura praticamente constante e que sofre poucas variações ao longo do ano. Durante a época de arrefecimento a temperatura da água que a bomba de calor envia para o espaço condicionado é por norma inferior a 15°C. Nos países do norte da Europa, onde a temperatura do solo é muito abaixo dos 15°C, e se a carga térmica do edifício o permitir, não faz sentido ter a bomba de calor a trabalhar pois a água que vem do permutador já tem uma temperatura suficientemente baixa para ser enviada para o espaço condicionado. A este

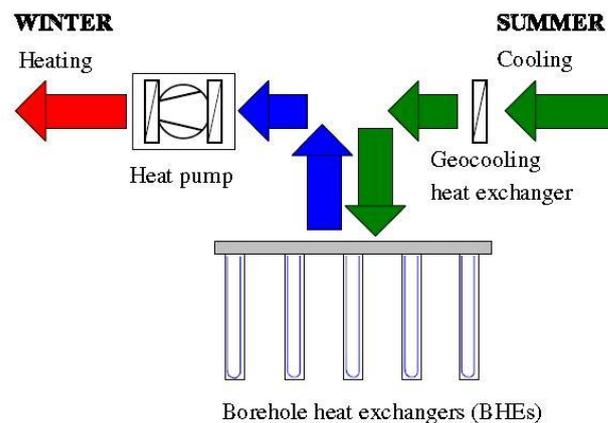


Figura 10 - Funcionamento anual com bomba de calor e geocooling (Pahud, 2011)

método de enviar a água directamente do permutador de calor geotérmico para o espaço condicionado dá-se o nome de geocooling.

Nos países do norte da Europa, onde durante o verão a carga térmica de arrefecimento é reduzida e a temperatura do solo têm valores de 7 a 10°C, já existem muitas instalações que usam o geocooling sem necessitarem de utilizar a bomba de calor durante todo o período de arrefecimento. Nos países do sul da Europa a realidade é diferente. Com temperaturas do solo a rondar os 15 a 18°C, para manter uma temperatura de conforto no espaço condicionado de 22 a 26°C vemos a potência térmica de arrefecimento disponível descer para níveis muito abaixo dos países do norte da Europa. Além da potência térmica de arrefecimento baixa temos também uma carga térmica muito mais elevada. Isto leva-nos a por de parte a ideia de arrefecer o espaço utilizando unicamente o geocooling. No entanto isso não significa que não o possamos utilizar se já tivermos uma instalação de bomba de calor com permutadores de calor geotérmicos. Podemos aproveitar o geocooling para momentos do dia em que a carga térmica é baixa ou para climatizar durante a noite espaços que vão ser utilizados de dia pois deste modo no início da sua utilização o espaço já está na sua temperatura de conforto sem ter sido necessário o consumo de energia eléctrica por parte da bomba de calor.

De uma forma resumida concluímos que sempre que possível devemos utilizar o geocooling pois permite-nos climatizar o espaço consumindo apenas energia eléctrica nas bombas de circulação e nos ventilo convectores, obtendo assim um COP do sistema bastante elevado.

2. O caso de estudo de Coimbra

2.1. Introdução ao projecto GroundMed

O GroundMed é um projecto sobre bombas de calor geotérmicas de alto rendimento para aquecimento e arrefecimento nos países do sul da Europa. O projecto prevê coeficientes de performance superiores 5 considerando não só a bomba de calor mas também os outros componentes do sistema tais como bombas de circulação e ventilo convectores. Para isso vão ser utilizadas bombas de calor de última geração os quais têm melhoramentos nos compressores, nos permutadores de calor e na automação. São utilizados permutadores de calor geotérmicos e sistemas de aquecimento e arrefecimento a funcionar com a mínima diferença de temperatura entre eles e que seguem a carga térmica do edifício. São importantes os aspectos de projecto, o armazenamento de energia térmica, os sistemas de controlo e componentes auxiliares com baixo consumo de energia, tais como bombas de circulação e ventilo convectores.

O consórcio GroundMed é composto por 24 institutos europeus incluindo fabricantes de bombas de calor geotérmicas, institutos de pesquisa, universidades técnicas, associações industriais europeias, consultores, empreiteiros e um centro de informações. Há no total 8 sistemas piloto de bomba de calor geotérmica espalhados pelo sul da Europa. Além do sistema instalado em Coimbra (Portugal), que serve de base para este trabalho, temos também em Barcelona (Espanha), Valência (Espanha), Marselha (França), Padova (Itália), Benedikt (Eslovénia), Oradea (Roménia) e em Atenas (Grécia).



Figura 11 - Instalações piloto do projecto GroundMed (Mendrinós, 2011)

2.2. Descrição do Edifício da ARHC e do sistema de climatização

A descrição pormenorizada do edifício e do sistema de climatização pode ser vista no anexo A.

Na Figura 12 podemos ver o esquema do sistema de climatização. Podemos dividi-lo em circuito externo e circuito interno. O circuito externo tem uma bomba de circulação que faz a água circular entre os permutadores de calor geotérmicos e a bomba de calor. O circuito interno tem uma bomba de circulação que faz circular a água pelos ventilo convectores e tem outra bomba de circulação que faz circular a água entre a bomba de calor e a garrafa de mistura que permite a circulação da água na bomba de calor quando os ventilo convectores estão desligados.

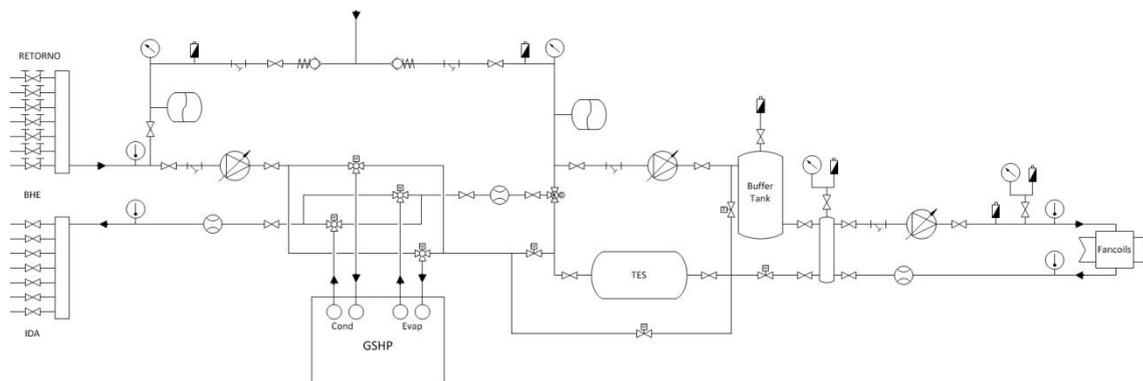


Figura 12 - Esquema do sistema

A Figura 13 mostra-nos como será o circuito do sistema quando estiver instalado o geocooling. É feito um *bypass* no sistema que permite a água circular directamente dos permutadores de calor geotérmicos para os ventilo convectores.

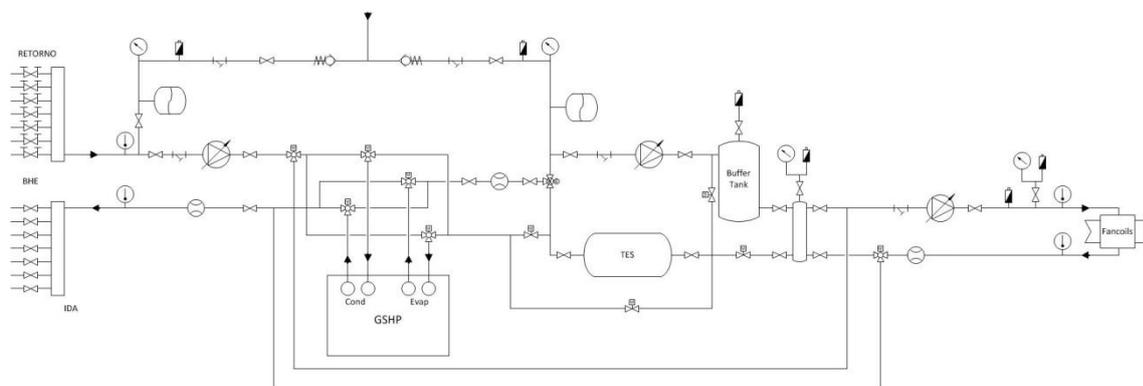


Figura 13 - Esquema do sistema com geocooling

Nesta curta descrição, salientamos também o tarifário eléctrico em vigor no edifício e que está representado por períodos na Tabela 1.

Tabela 1 - Tarifário eléctrico

Período	Hora	Preço do kWh (€/kWh)	Preço de potência de pico (€/kW)
Ponta	9h – 10:30h	0,2124	0,4025
	18h – 20:30h		
Cheias	8h – 9h	0,1173	-
	10:30h – 18h		
Vazio normal	22h – 2h	0,0808	-
	6h – 8h		
Super vazio	2h – 6h	0,0727	-

2.3. Dados obtidos na instalação

Ao longo da aquisição de dados que foi feita foram aparecendo alguns problemas, o que muitas das vezes impossibilitou o aproveitamento de alguns dias para obter informações fiáveis.

Chegou a acontecer várias vezes a mistura de dados de outras instalações no ficheiro de dados da instalação de Coimbra. O problema acabou por ser resolvido mas foi necessário fazer uma filtragem para eliminar todos os dados que não pertenciam á instalação de Coimbra de modo a podermos aproveitar esses dados.

Outro problema que tivemos foi a falha de dados. Houve problemas tanto na emissão como na recepção de dados, o que fazia com que falhassem vários blocos de 10 minutos de dados, que somando, muitas vezes faltava mais de uma hora de dados por dia. Para resolver esse problema foi criado um buffer. No entanto não houve forma de obter esses dados que se perderam e portanto apenas vamos considerar os dias em que houve menos de uma hora de dados em falta para não comprometer em demasia a fiabilidade dos cálculos diários.

Por último detectámos um problema nas válvulas. Quando a bomba externa estava desligada a temperatura da água do circuito externo começava a subir demasiado (ver Figura 14). Após analisarmos no local as temperaturas nas tubagens concluímos que as válvulas não vedavam bem, o que fazia com que a água do circuito externo estivesse a ser misturada com a água do circuito interno. Para remediar esta situação, e enquanto não eram instaladas novas válvulas, colocaram-se juntas cegas junto das válvulas a tapar o lado da válvula por onde a água não devia passar.

Devido a estes problemas vamos colocar de parte os dados dos dias em que falham mais de 60 minutos de dados, os dias em que os dados estão corrompidos, os dias em que houve transição entre o modo de arrefecimento e aquecimento e dias em que por outros motivos os dados não nos permitam fazer os cálculos de um modo fiável.

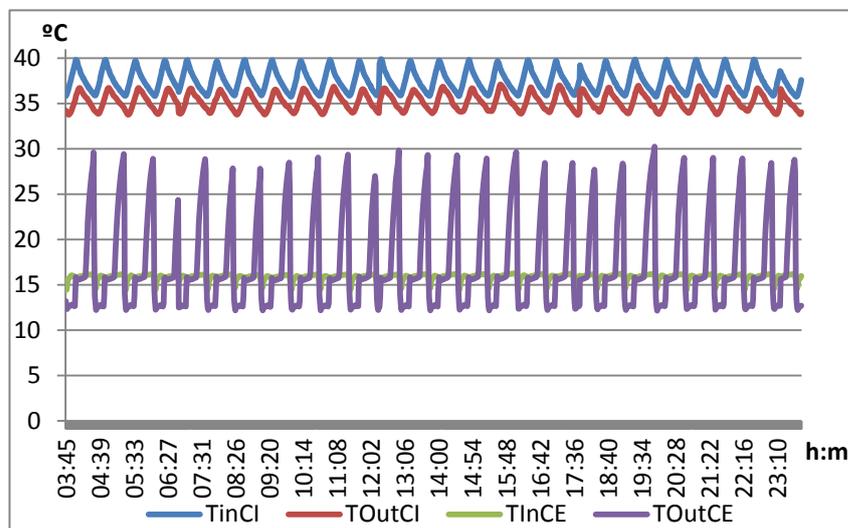


Figura 14 - Temperaturas da água resultantes da fuga nas válvulas

Além destes problemas tivemos outros problemas menos críticos. O sensor da temperatura exterior estava a obter temperaturas erradas, o que foi resolvido trocando o sensor. O mesmo aconteceu com o piranómetro que estava a obter valores errados de radiação solar. Estes dois sensores foram substituídos durante o mês de Abril de 2013. Por último houve um problema com o funcionamento dos ventilo convectores na única sala onde está instalado o sensor de temperatura interior. Este problema fazia com que os ventilo convectores por vezes não fossem capazes de satisfazer as necessidades térmicas da sala, o que nos impossibilita de confiar na temperatura lida por este sensor de temperatura para representar as temperaturas dos espaços climatizados. De salientar também que o consumo da segunda bomba de circulação interna só começou a estar disponível no dia 17 de Maio de 2013 e portanto só a partir desse dia é que vamos considerar o consumo desta bomba nos cálculos.

Para a análise do desempenho do sistema vamos utilizar diferentes COP e EER.

- O COP1 e EER1 utilizam apenas o consumo da bomba de calor para o valor de energia eléctrica consumida.
- O COP2 e EER2 consideram a bomba de calor e a bomba de circulação externa.
- O COP3 e EER3 consideram a bomba de calor, a bomba de circulação externa e as bombas de circulação interna.
- Por último o COP4 e o EER4 consideram a bomba de calor, a bomba de circulação externa, as bombas de circulação interna e os ventilo convectores.

2.3.1. Época de aquecimento

O sistema de aquisição de dados foi ligado pela primeira vez no dia 15 de Fevereiro de 2012. Vamos por isso começar por apresentar os valores para os COP, carga térmica do edifício e consumo da bomba de calor, bombas de circulação e ventilo convectores para um dia tipo desta época. Escolhemos para isso o dia 18 de Abril de 2012 pois é um dia que tem uma carga térmica relativamente elevada e já tem o sistema ligeiramente optimizado.

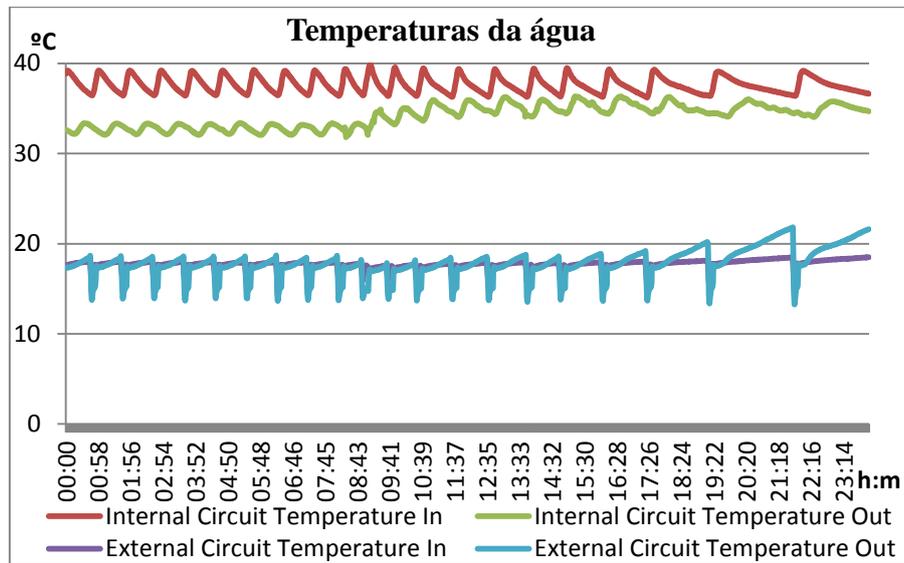


Figura 15 - Temperaturas da água 18 de Abril de 2012

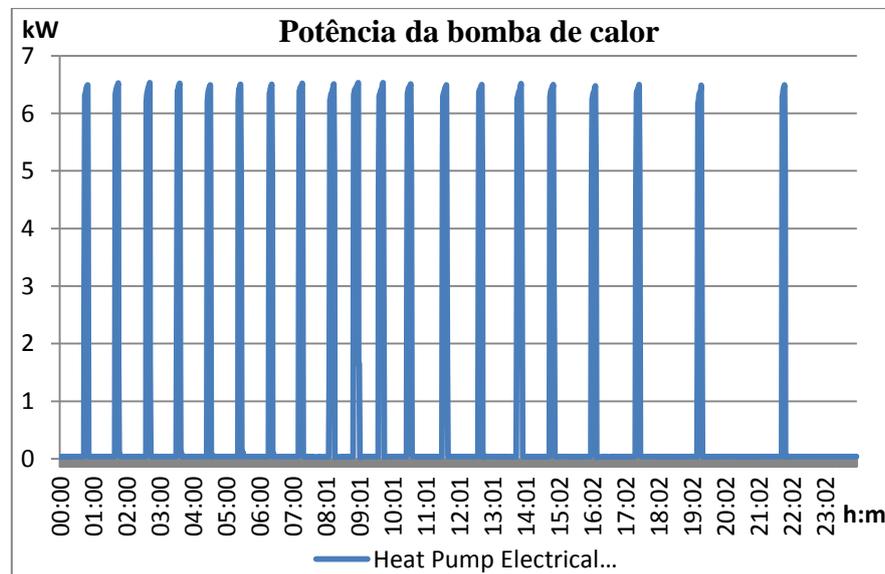


Figura 16 - Potência da bomba de calor 18 de Abril de 2012

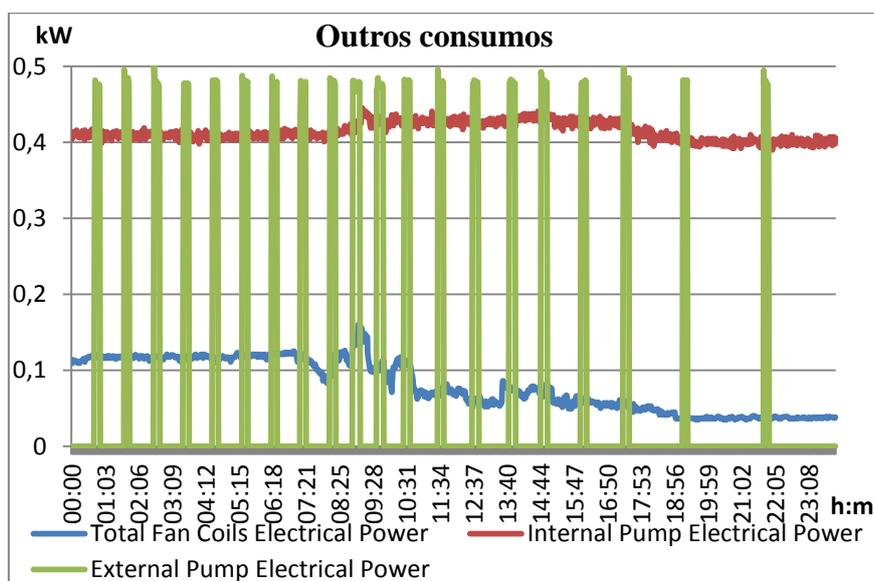


Figura 17 - Outros consumos 18 de Abril de 2012

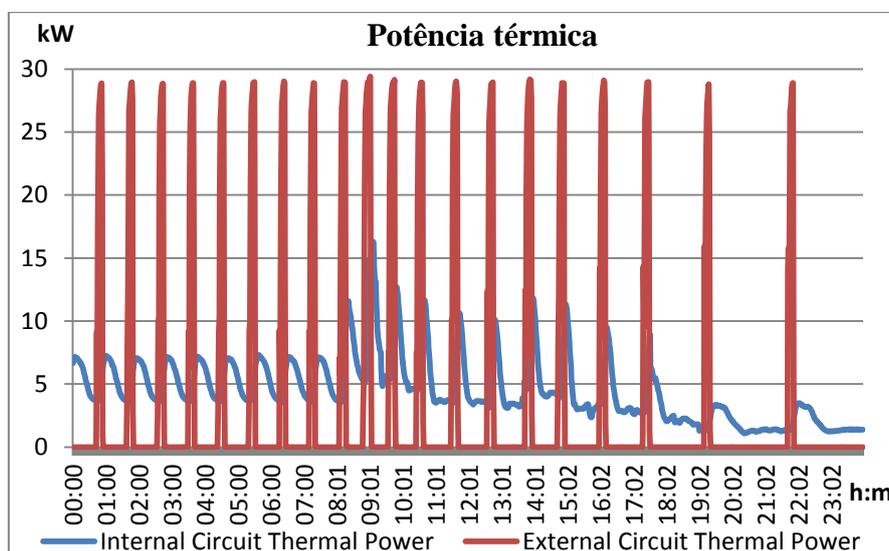


Figura 18 - Potência térmica 18 de Abril de 2012

Tabela 2 - Consumos 18 de Abril de 2012

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
109,59 kWh	16,96 kWh	1,9 kWh	9,93 kWh	1,93 kWh

Tabela 3 - COP 18 de Abril de 2012

COP1	COP2	COP3	COP4
6,46	5,85	3,82	3,58

Apesar de a carga térmica neste dia ser baixa, é das mais elevadas que se registaram nesta época e conseguiu-se um bom COP1. Como podemos ver pelo gráfico dos consumos as bombas de circulação estão a funcionar quase na sua potência máxima, o que revela que o sistema ainda está pouco optimizado.

Vamos agora observar os dados ao longo de toda esta época de aquecimento que compreende o período entre 15 de Fevereiro de 2012 e 15 de Maio de 2012.

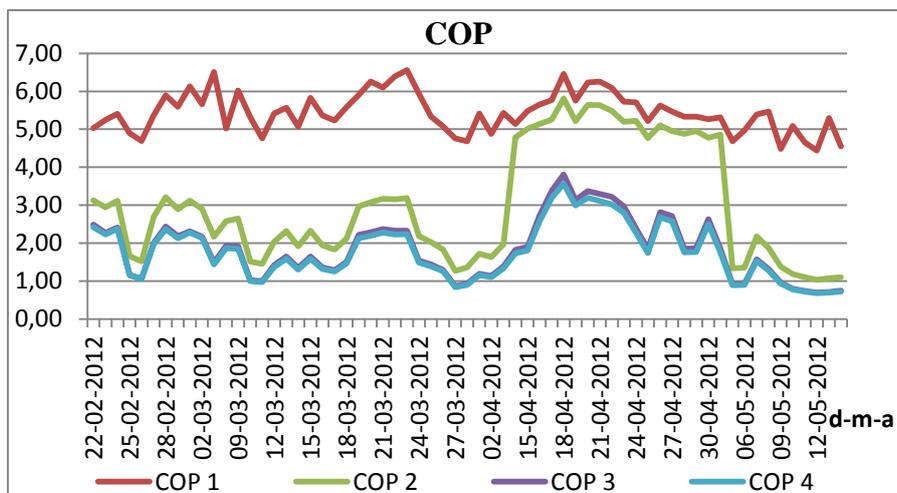


Figura 20 - COP da época de aquecimento de 2012

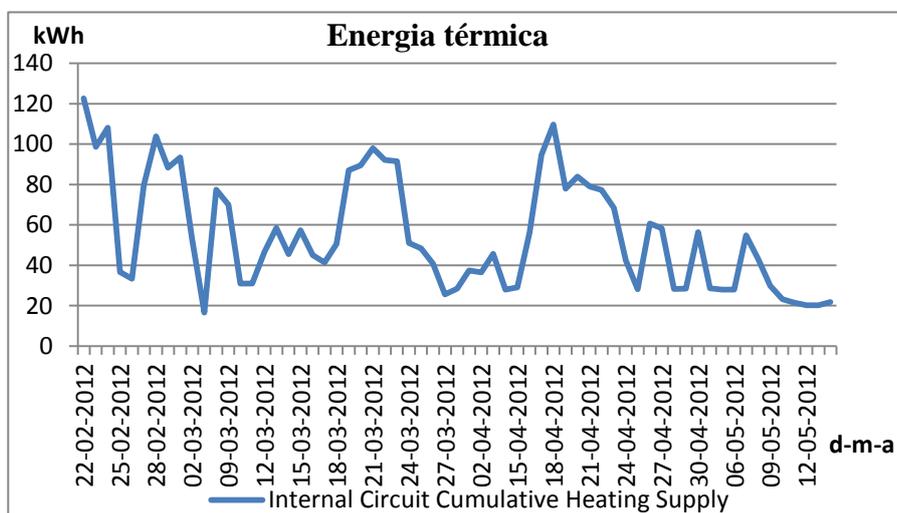


Figura 19 - Energia térmica da época de aquecimento de 2012

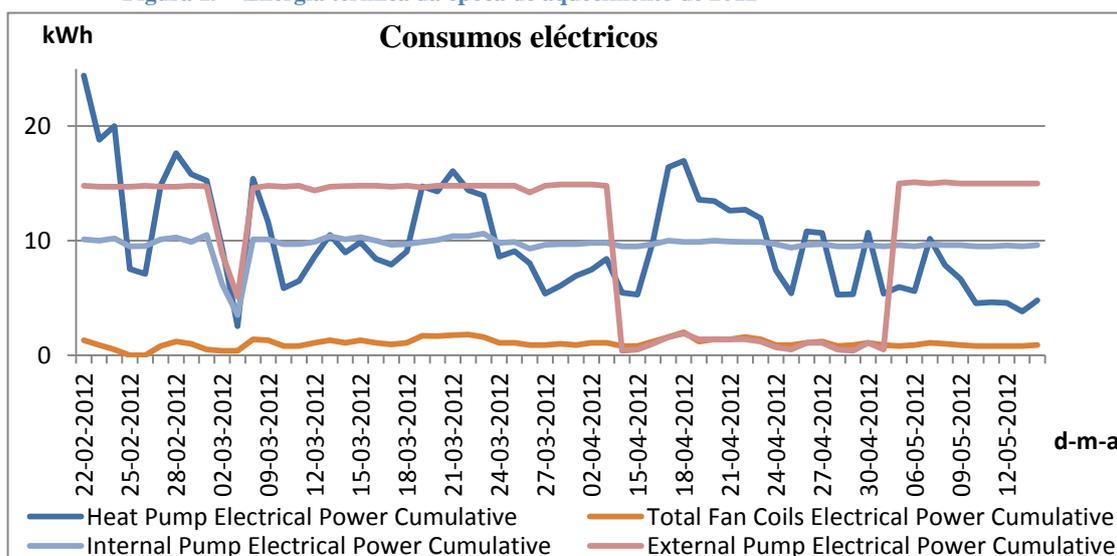


Figura 21 - Consumos eléctricos da época de aquecimento de 2012

Na seguinte tabela podemos ver os consumos totais assim como os coeficientes de performance total da época de aquecimento.

Tabela 4 - Consumos da época de aquecimento de 2012

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectoros
3485,88 kWh	627,27 kWh	668,73 kWh	608,87 kWh	65,85 kWh

Tabela 5 - COP da época de aquecimento de 2012

COP1	COP2	COP3	COP4
5,56	2,69	1,83	1,77

Como podemos ver pelos gráficos as bombas de circulação estão com um consumo muito elevado pois estiveram quase sempre ligadas na potência máxima. A bomba de circulação externa estava ligada 24 horas por dia mas no gráfico podemos observar um intervalo de tempo em que esta bomba teve um consumo menor. A causa disso foi a bomba ligar apenas quando a bomba de calor estava ligada pois não faz sentido ter a bomba externa ligada quando a bomba de calor está desligada. No gráfico do COP dá para observar a melhoria dos vários COP resultante desta alteração. Tendo em consideração que a carga térmica foi baixa devido à existência de muitos gabinetes que não utilizavam este sistema para a climatização, podemos considerar que temos valores de COP1 satisfatórios. Os valores dos restantes COP são baixos pois a carga térmica também foi baixa.

A época de aquecimento de 2013 teve início a 15 de Dezembro de 2012 e terminou a 27 de Junho de 2013. Devido ao problema que houve com as válvulas ter afectado significativamente o desempenho do sistema, nesta época vamos fazer uma separação e apresentar os dados de antes e depois do problema estar resolvido. Vamos começar então por apresentar os dados do dia 16 de Janeiro de 2013 que foi o dia com maior carga térmica. Neste dia o consumo instantâneo da bomba está a ser mal medido. Portanto consideramos que o consumo da bomba em funcionamento é de 6,65 kW, o que está de acordo com o consumo acumulado desse dia.

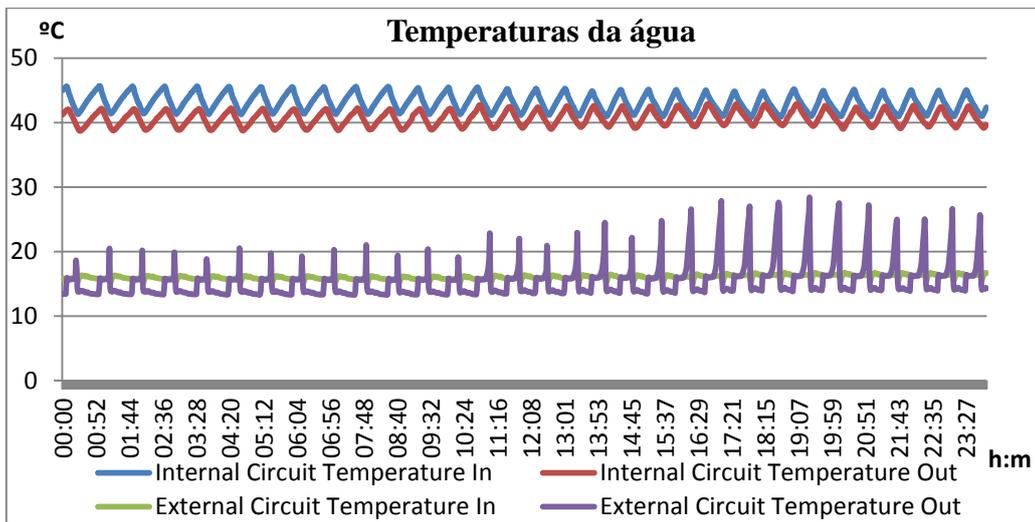


Figura 22 - Temperaturas da água 16 de Janeiro de 2013

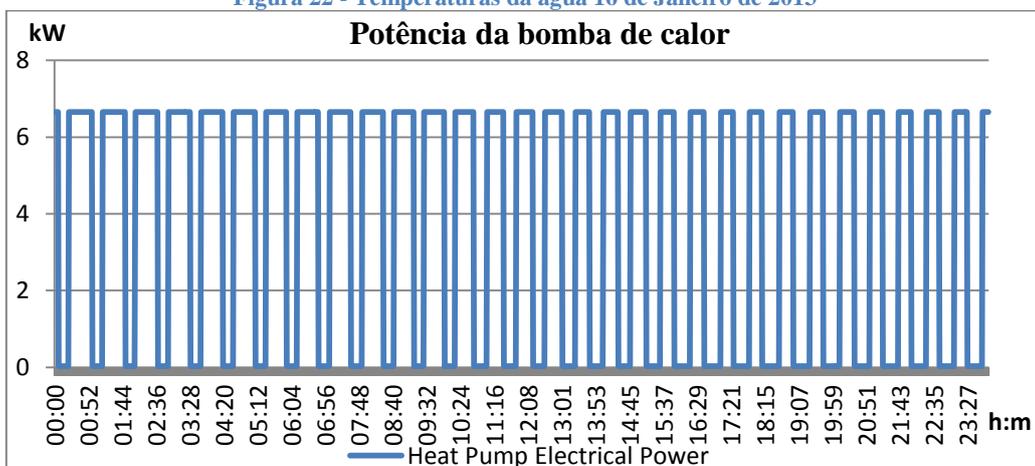


Figura 24 - Potência da bomba de calor 16 de Janeiro de 2013

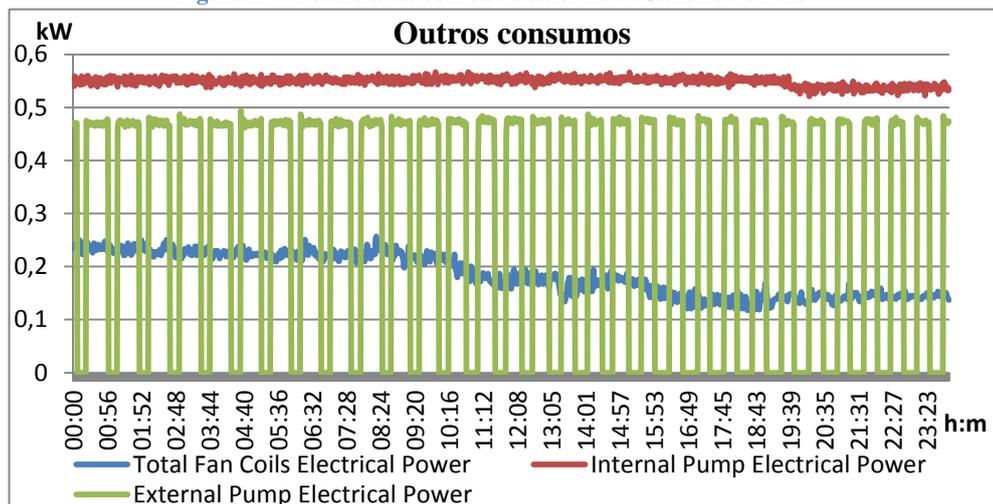


Figura 23 - Outros consumos 16 de Janeiro de 2013

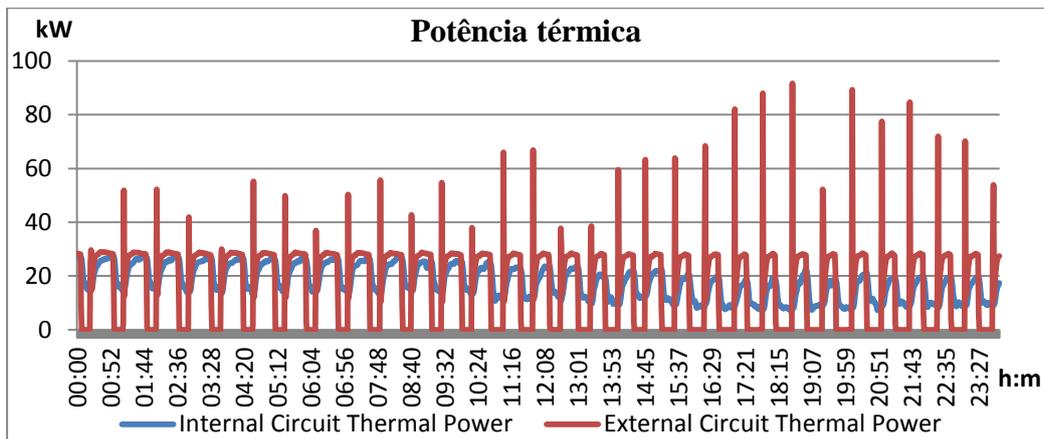


Figura 25 - Potência térmica 16 de Janeiro de 2013

Tabela 6 - Consumos 16 de Janeiro de 2013

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
419,27 kWh	91,03 kWh	6,61 kWh	13,16 kWh	4,43 kWh

Tabela 7 - COP 16 de Janeiro de 2013

COP1	COP2	COP3	COP4
4,61	4,29	3,78	3,64

No gráfico das temperaturas podemos ver que há um aumento da temperatura na água do circuito exterior quando a bomba de circulação externa está parada. Isto demonstra que as válvulas não estão a vedar bem e que há mistura de água entre os dois circuitos. Este problema faz com que o sistema tenha um desempenho pior, o que se reflecte num COP1 de 4,61, o que é considerado baixo. Este aumento na temperatura da água faz com que apareçam picos no gráfico da potência térmica quando a bomba de circulação externa entra em funcionamento pois a potência térmica é proporcional á diferença de temperatura entre a entrada e a saída.

Vamos agora apresentar os dados do período entre 15 de Dezembro de 2012 e 21 de Março de 2013, data em que foi resolvido o problema das válvulas.

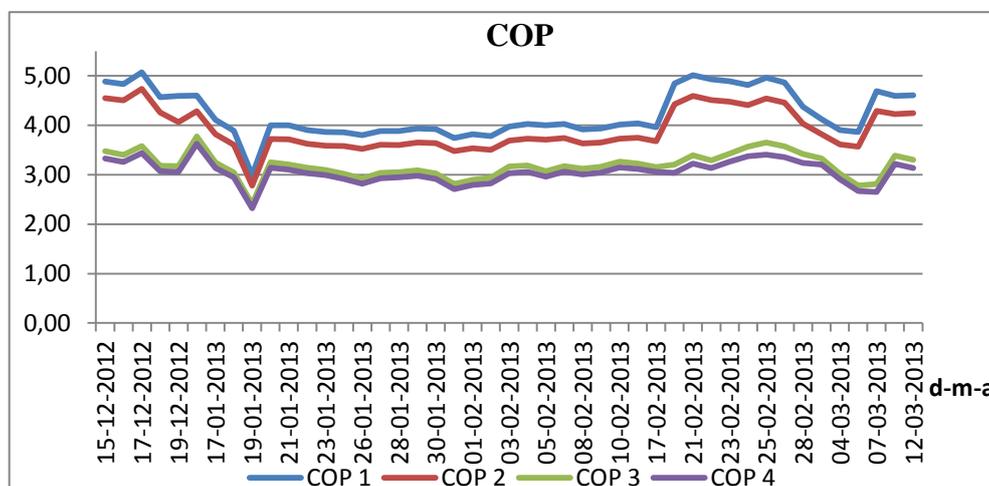


Figura 26 - COP da época de aquecimento de 2013 (antes)

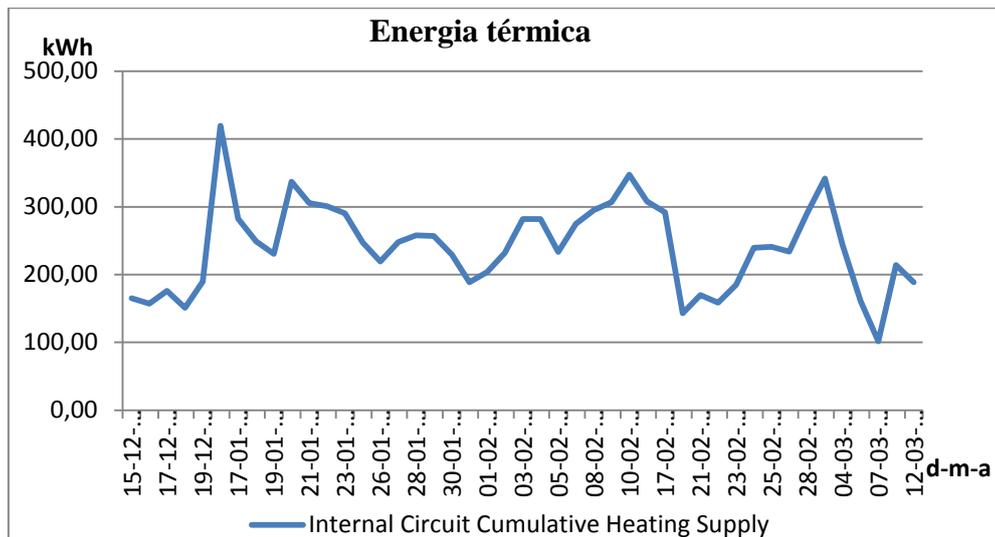


Figura 27 - Energia térmica da época de aquecimento de 2013 (antes)

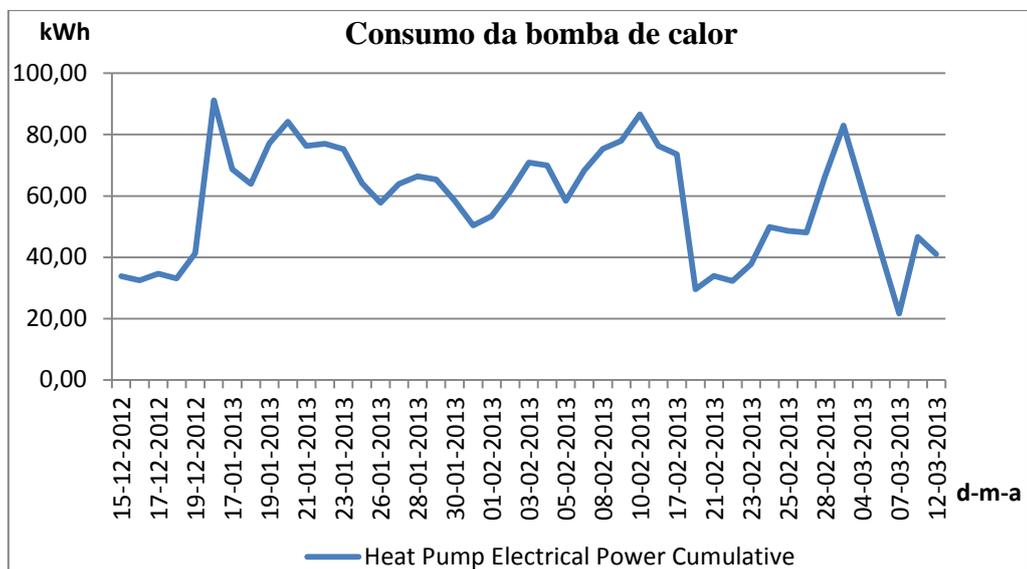


Figura 28 - Consumo da bomba de calor da época de aquecimento de 2013 (antes)

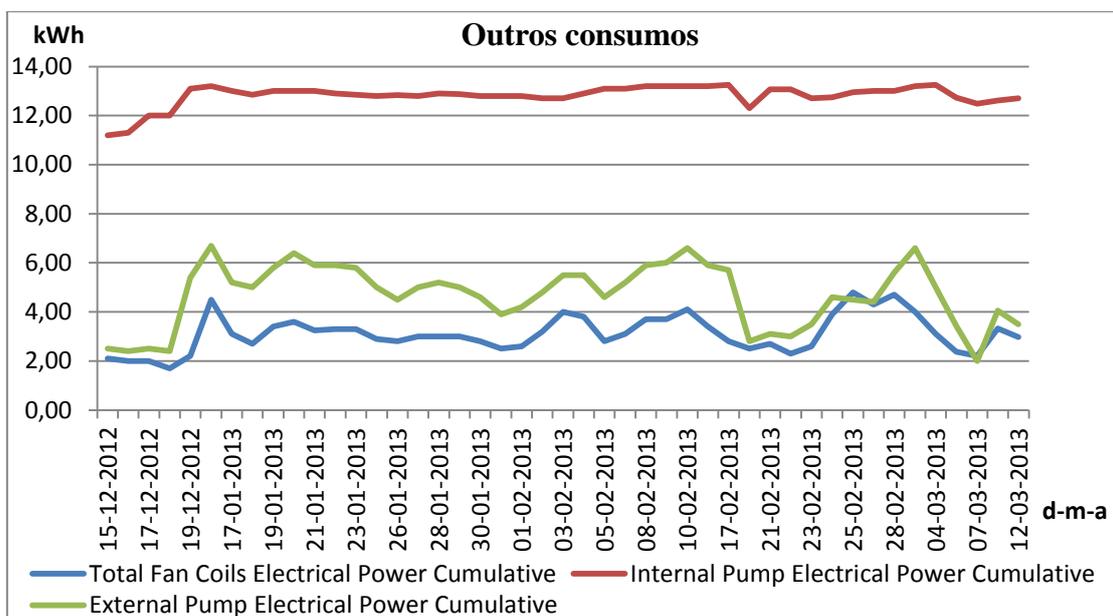


Figura 29 - Outros consumos da época de aquecimento de 2013 (antes)

Tabela 8 - Consumos da época de aquecimento de 2013 (antes)

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
10870,91 kWh	2630,28 kWh	211,08 kWh	576,38 kWh	140,14 kWh

Tabela 9 - COP da época de aquecimento de 2013 (antes)

COP1	COP2	COP3	COP4
4,13	3,83	3,18	3,06

Para representar um dia tipo no período após a resolução do problema das válvulas escolhemos o dia 29 de Março de 2013.

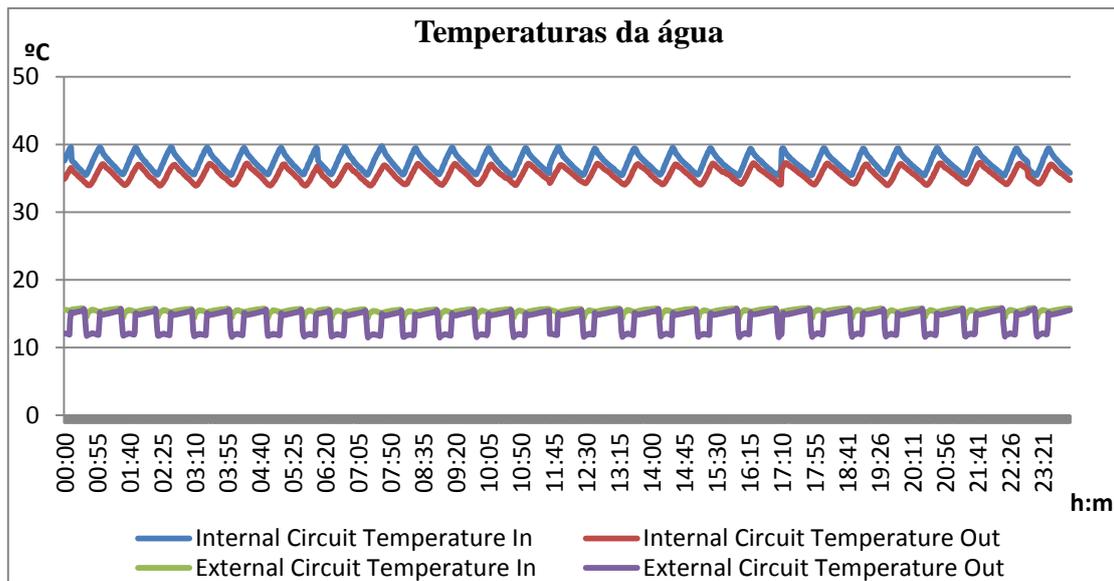


Figura 30 - Temperaturas da água 29 de Março de 2013

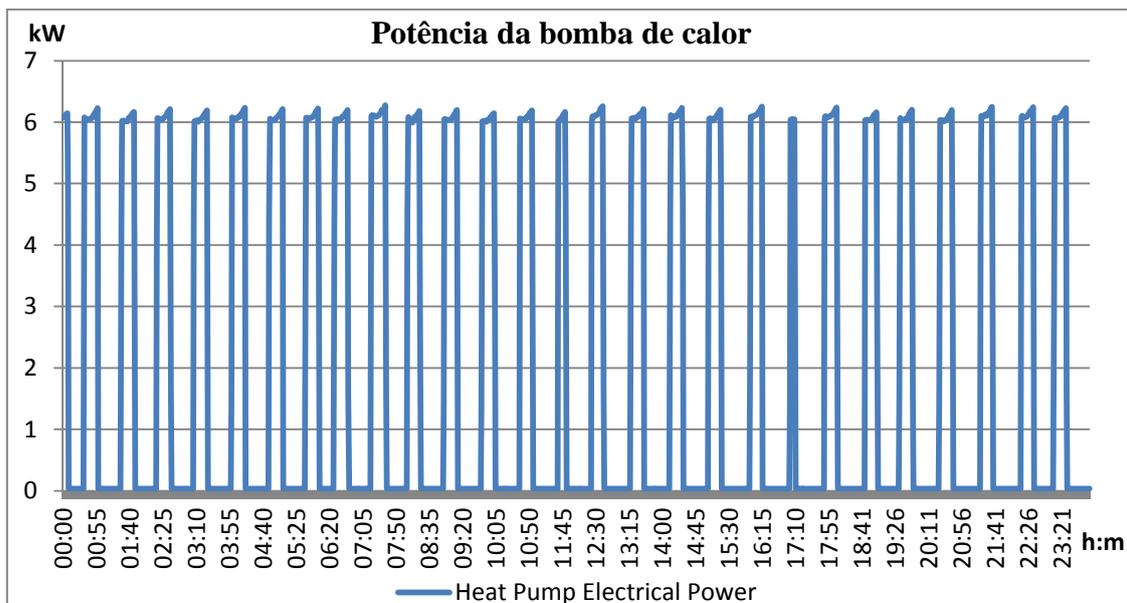


Figura 31 - Potência da bomba de calor 29 de Março de 2013

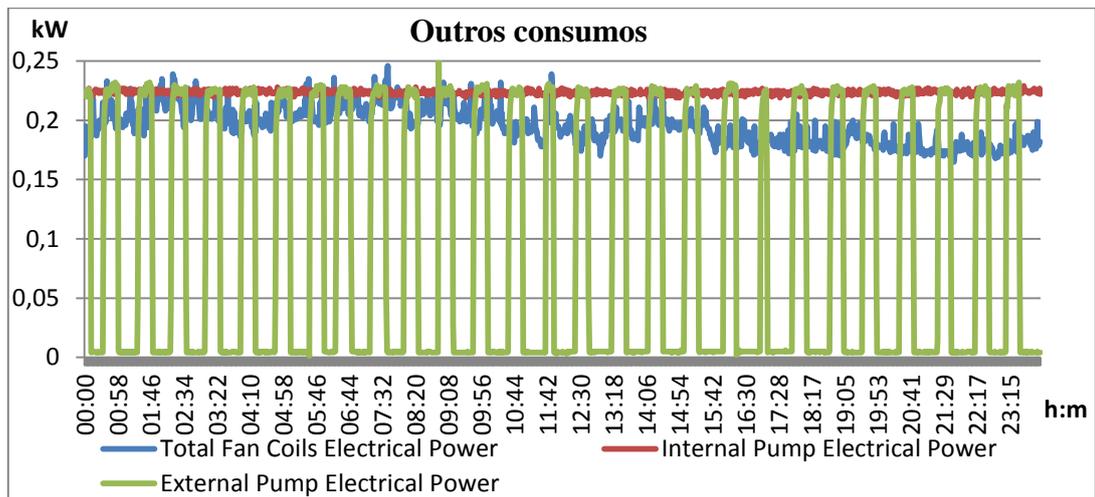


Figura 32 - Outros consumos 29 de Março de 2013

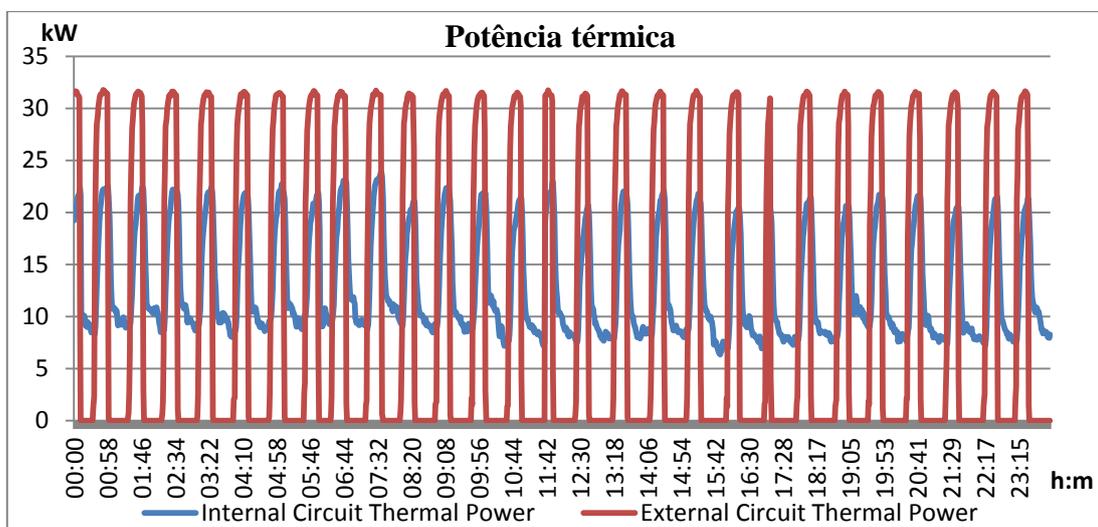


Figura 33 - Potência térmica 29 de Março de 2013

Tabela 10 - Consumos 29 de Março de 2013

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
298,35 kWh	48,31 kWh	2,07 kWh	5,17 kWh	4,51 kWh

Tabela 11 - COP 29 de Março de 2013

COP1	COP2	COP3	COP4
6,18	5,92	5,37	4,97

Se compararmos este dia com o dia tipo anterior vamos ver que desapareceram os picos no gráfico da potência térmica, desapareceram os aumentos de temperatura na água do circuito externo e houve um aumento significativo no COP1 de 4,61 para 6,18. Apesar de a diminuição da temperatura da água do circuito interno em cerca de 5°C ter contribuído para esse aumento, a resolução do problema da fuga nas válvulas também teve um impacto bastante significativo. De notar também que o caudal criado pelas bombas de circulação foi otimizado permitindo reduzir o seu consumo e assim melhorar os COP2 e COP3.

Vamos agora ver os dados do período de 22 de Março de 2013 a 2 de Junho de 2013 para ter uma noção das consequências das fugas nas válvulas. Como o consumo da segunda bomba de circulação interna só ficou disponível a partir de 17 de Maio de 2013 vamos apresentar um gráfico dos COP sem considerar este consumo e outro gráfico tendo em consideração o consumo desta bomba de circulação. Isto vai provocar diferenças no COP3 e COP4.

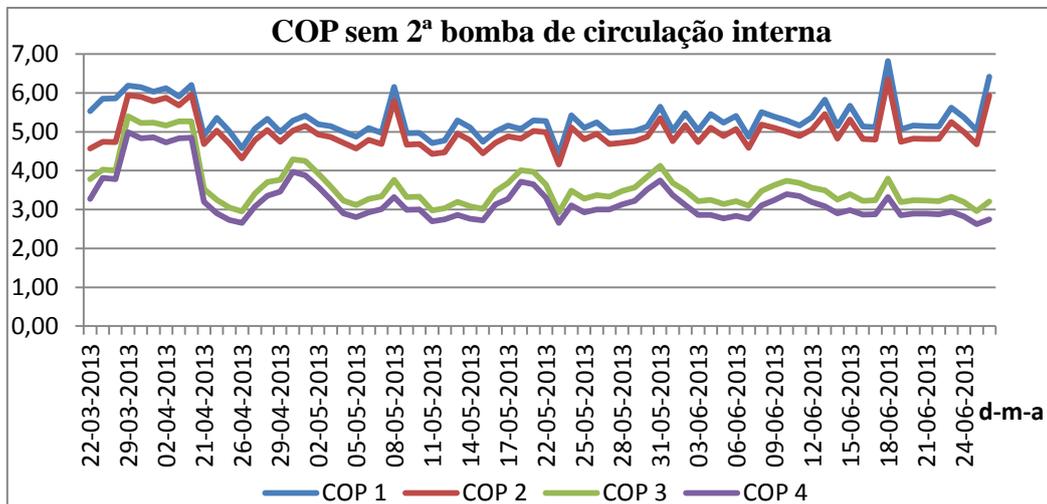


Figura 34 - COP da época de aquecimento de 2013 sem 2ª bomba de circulação (depois)

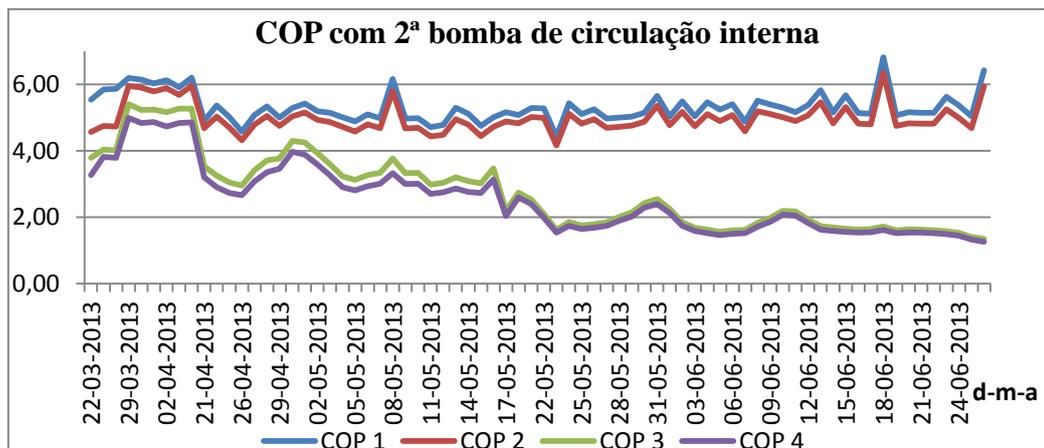


Figura 35 - COP da época de aquecimento de 2013 com 2ª bomba de circulação (depois)

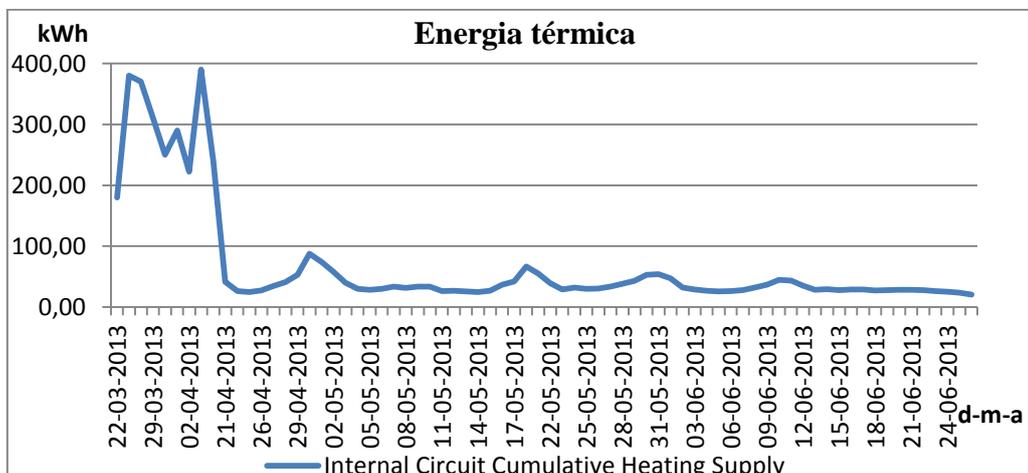


Figura 36 - Energia térmica da época de aquecimento de 2013 (depois)

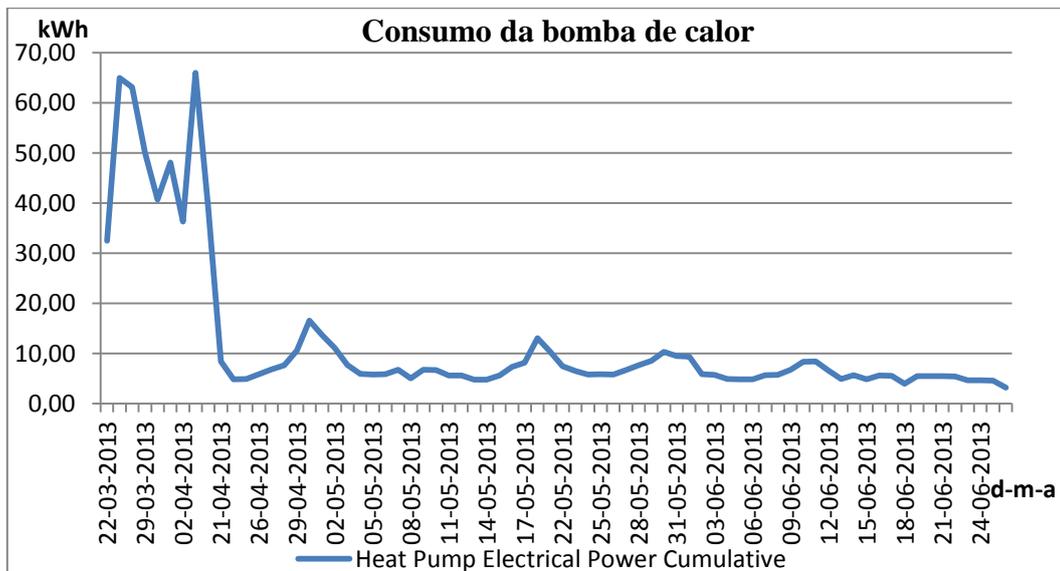


Figura 37 - Consumo da bomba de calor da época de aquecimento de 2013 (depois)

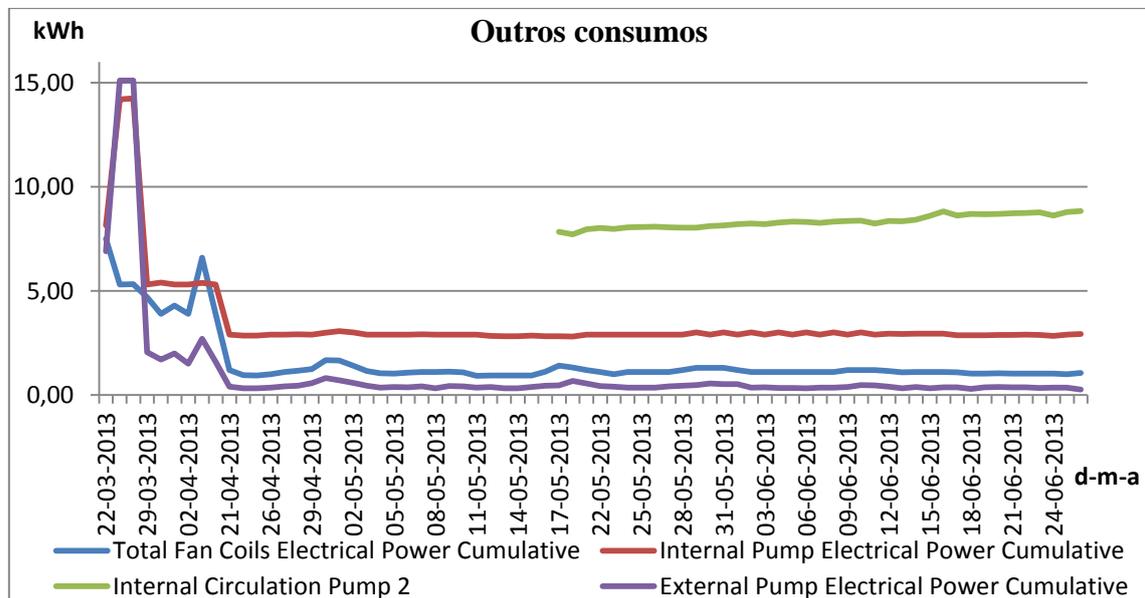


Figura 38 - Outros consumos da época de aquecimento de 2013 (depois)

Tabela 12 - Consumos da época de aquecimento de 2013 (depois)

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Bomba interna 2	Ventilo convectores
4854,75 kWh	868,65 kWh	74,56 kWh	251,83 kWh	324,94 kWh	116,23 kWh

Tabela 13 - COP da época de aquecimento de 2013 (depois)

COP1	COP2	COP3 sem 2ª Bomba de circulação	COP4 sem 2ª bomba de circulação
5,59	5,15	4,06	3,7
		COP3 com 2ª bomba de circulação	COP4 com 2ª bomba de circulação
		3,19	2,97

Apesar de a carga térmica ser muito baixa nesta ultima parte da época de aquecimento conseguimos mesmo assim valores de COP superiores. De salientar que no fim de Março e início de Abril em que a carga térmica foi elevada conseguimos valores de COP4 próximos de 5. Como o COP depende da carga térmica é normal que os valores do COP tenham vindo a diminuir á medida que se aproximava o verão pois as necessidades térmicas do edifício eram cada vez menores.

2.3.2. Época de arrefecimento

Durante a época de arrefecimento de 2012 o sistema esteve a maior parte do tempo em standby e quando estava em funcionamento tinha poucos ventilo convectores ligados, fazendo com que a energia térmica fornecida ao edifício fosse reduzida. No entanto vamos mostrar os dados do dia 5 de Setembro de 2012 para representar um dia tipo dessa época.

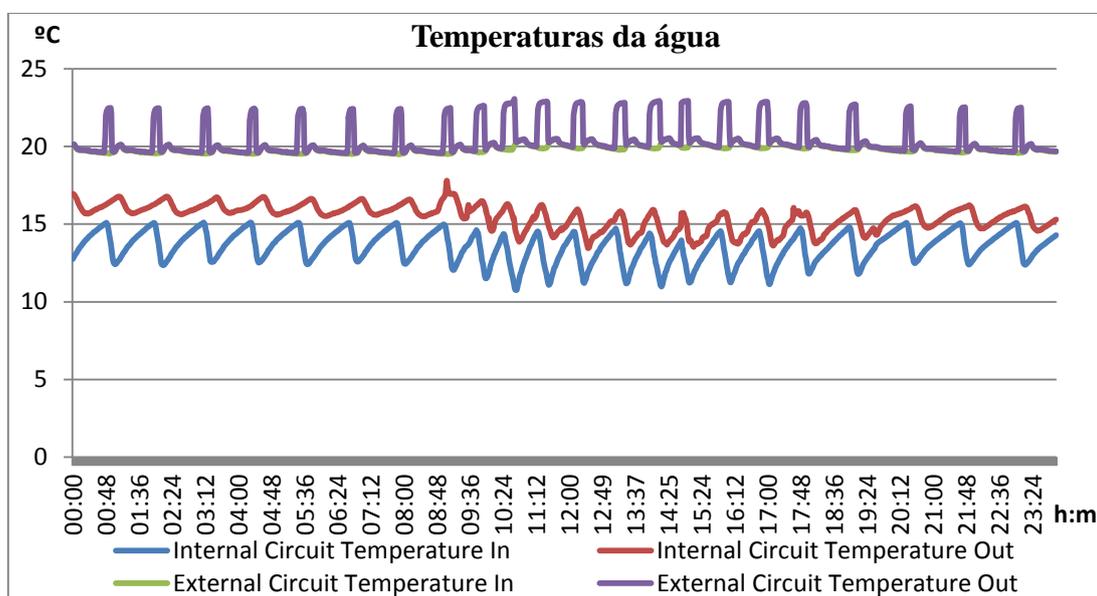


Figura 39 - Temperaturas da água 5 de Setembro de 2012

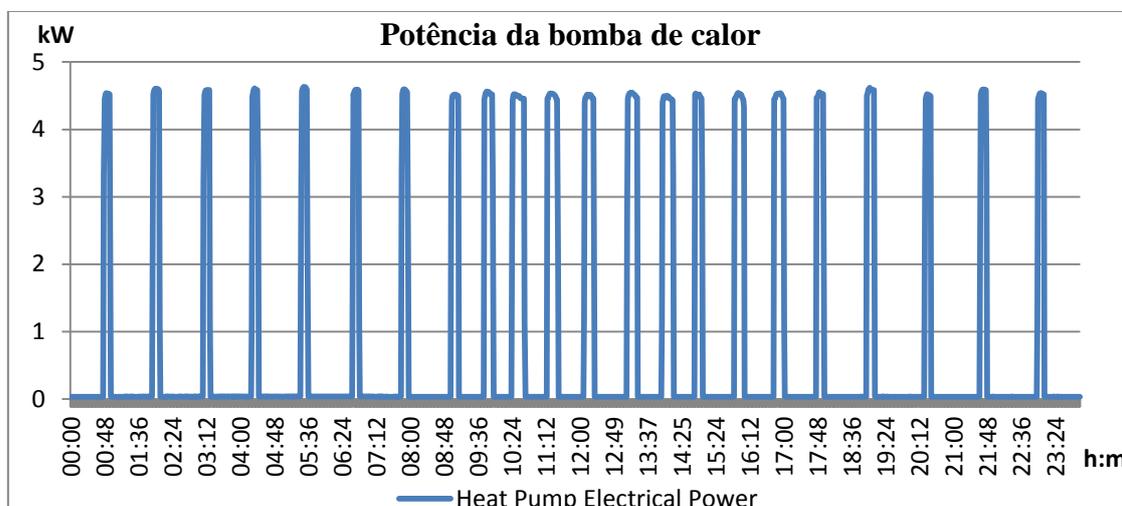


Figura 40 - Potência da bomba de calor 5 de Setembro de 2012

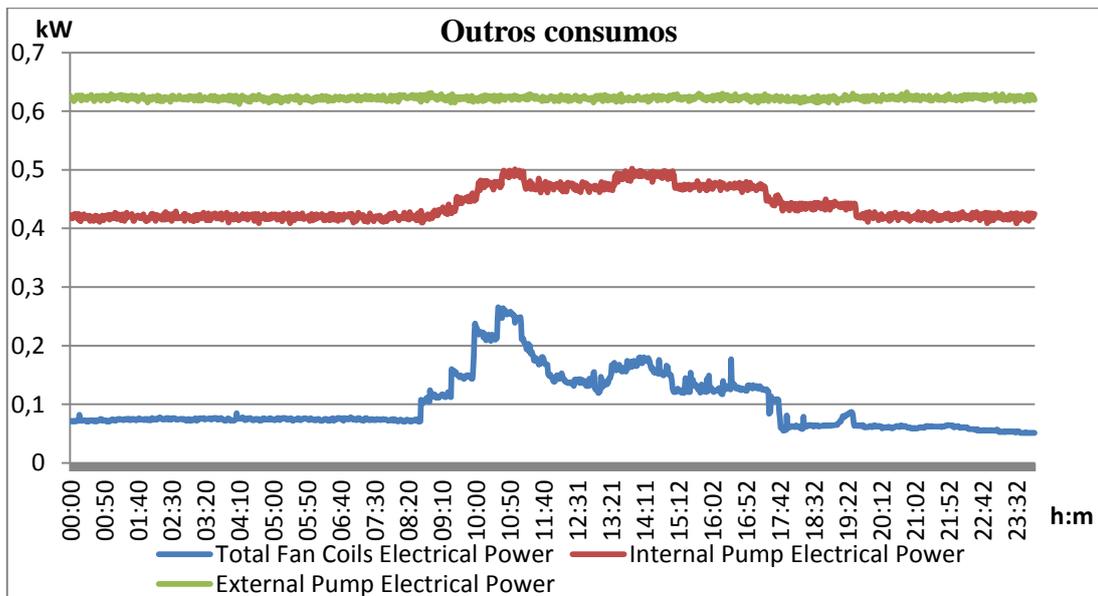


Figura 41 - Outros consumos 5 de Setembro de 2012

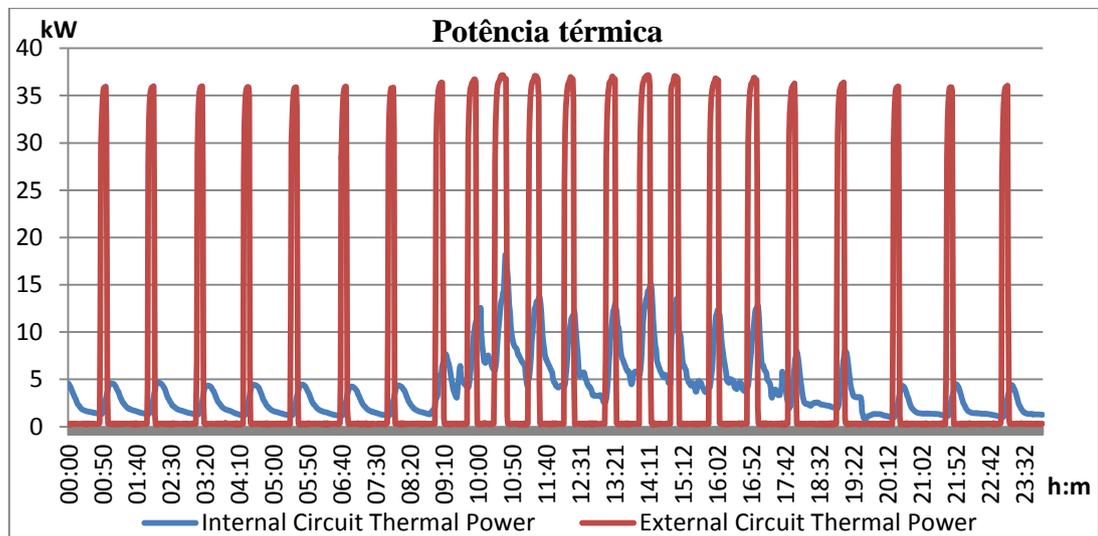


Figura 42 - Potência térmica 5 de Setembro de 2012

Tabela 14 - Consumos 5 de Setembro de 2012

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
97 kWh	19,72 kWh	14,81 kWh	10,47 kWh	2,38 kWh

Tabela 15 - EER 5 de Setembro de 2012

EER1	EER2	EER3	EER4
4,92	2,81	2,16	2,05

Como podemos observar pela análise dos gráficos, as bombas de circulação estão com uma potência muito elevada e a bomba de circulação externa está sempre ligada. Outro pormenor é o facto de a bomba de calor apresentar uma potência em funcionamento de cerca de 4,5 kW quando na época de aquecimento apresenta valores acima de 6 kW. Isto acontece por estar a trabalhar em diferentes pontos de funcionamento na época de aquecimento e arrefecimento.

Vamos agora apresentar os dados relativos à época de arrefecimento que teve início a 16 de Maio de 2012 e terminou a 14 de Dezembro de 2012. De salientar que, apesar de ser um período extenso, apenas se conseguiu aproveitar 10 dias de dados.

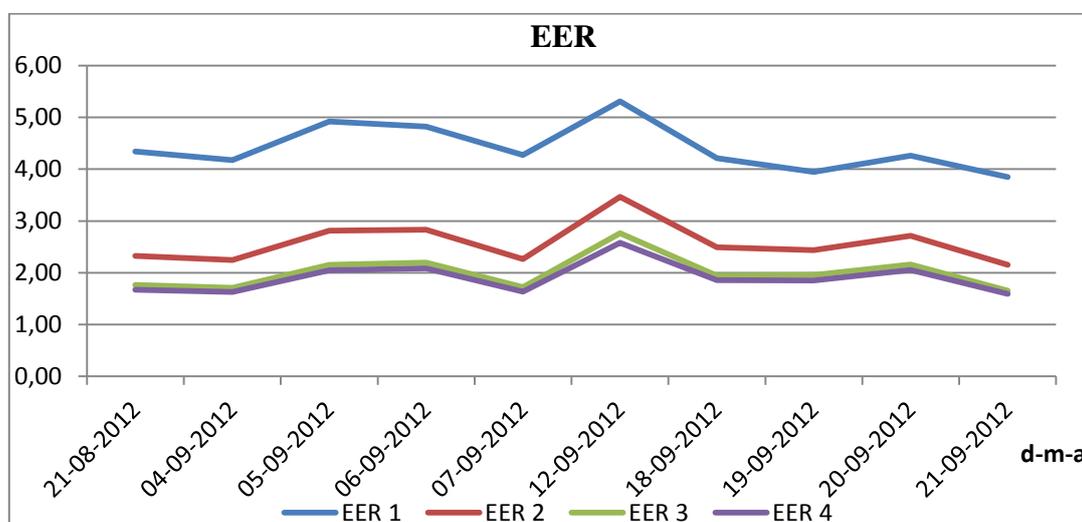


Figura 43 - EER da época de arrefecimento de 2012

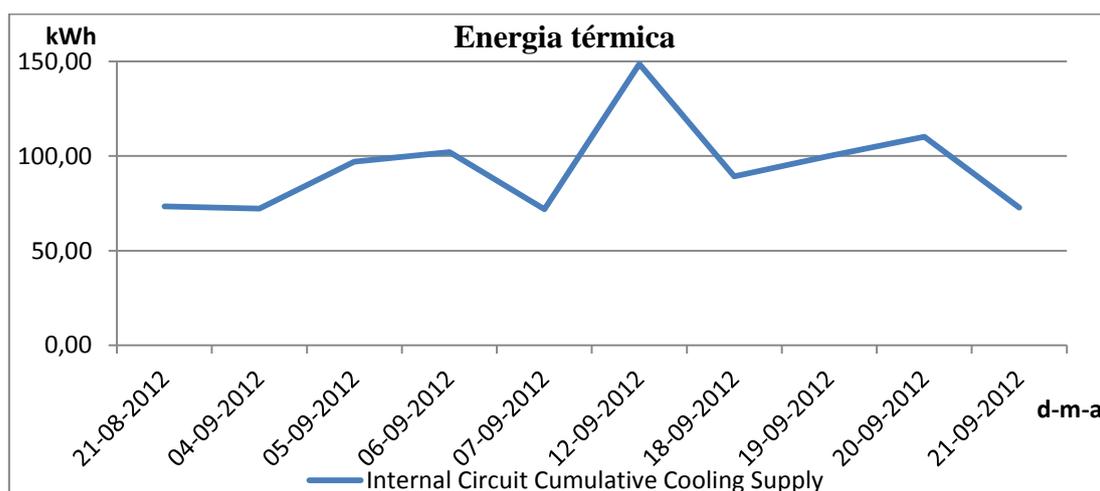


Figura 44 - Energia térmica da época de arrefecimento de 2012

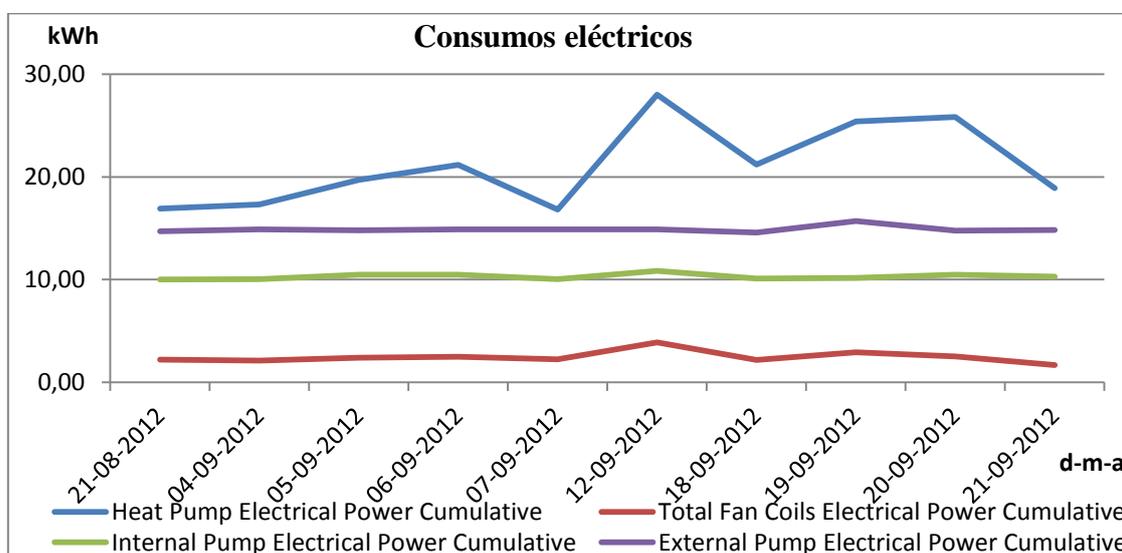


Figura 45 - Consumos eléctricos da época de arrefecimento de 2012

Tabela 16 - Consumos da época de arrefecimento de 2012

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores
937,29 kWh	211,25 kWh	148,97 kWh	102,91 kWh	24,66 kWh

Tabela 17 - EER da época de arrefecimento de 2012

EER1	EER2	EER3	EER4
4,44	2,6	2,02	1,92

Este foi um período em que o sistema não esteve otimizado. Apesar de a carga térmica ser reduzida o valor de EER1 é baixo. O mesmo acontece com os restantes valores de EER que são baixos também devido ao facto de as bombas de circulação estarem ligadas num nível de potência elevado e a bomba de circulação externa estar ligada 24 horas por dia.

A época de arrefecimento de 2013 teve início a 27 de Junho de 2013. Para representar um dia tipo desta época vamos apresentar os dados do dia 9 de Julho de 2013 pois é o dia com maior carga térmica até ao dia em que este trabalho foi escrito.

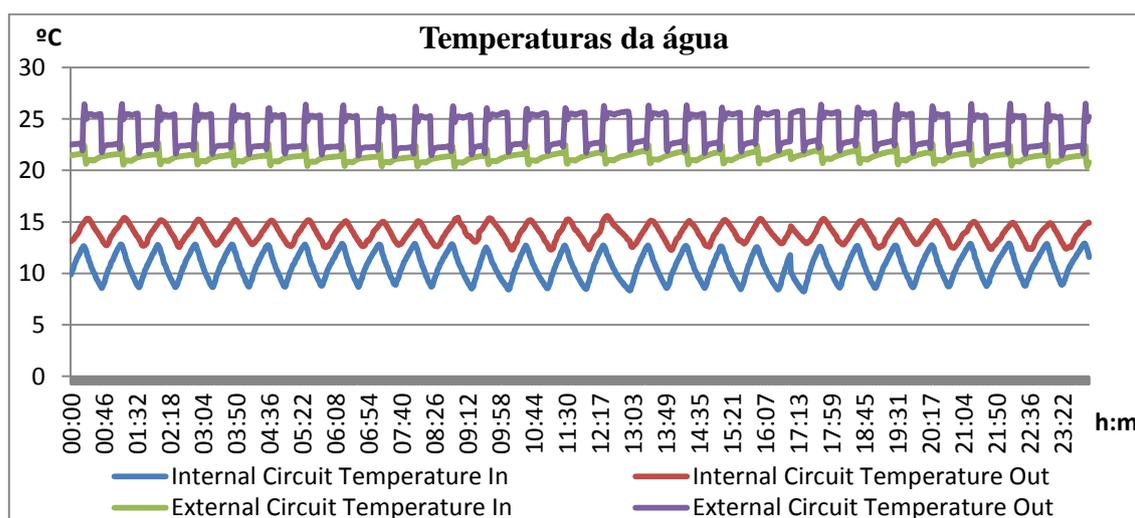


Figura 46 - Temperaturas da água 9 de Julho de 2013

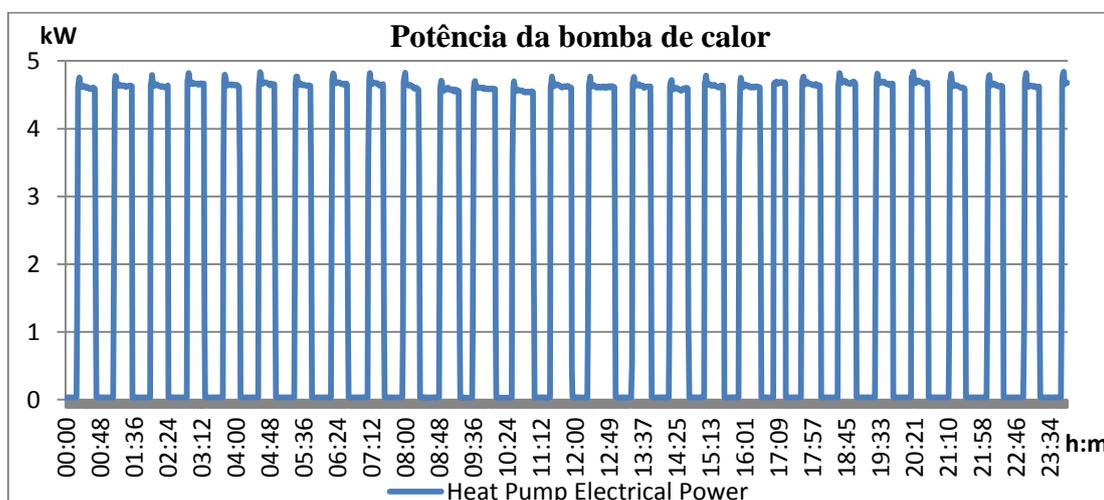


Figura 47 - Potência da bomba de calor 9 de Julho de 2013

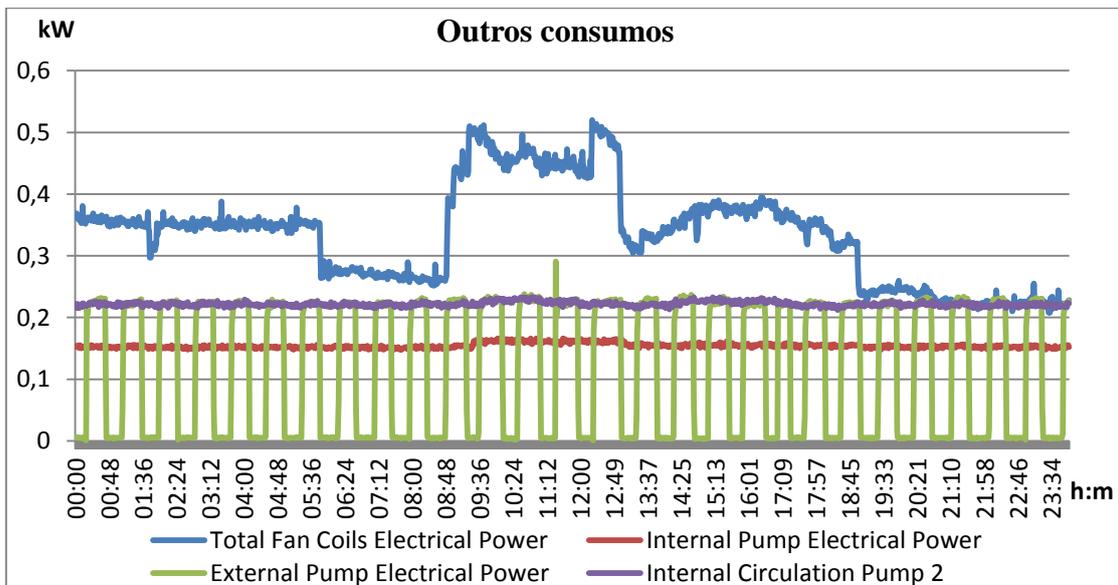


Figura 48 - Outros consumos 9 de Julho de 2013

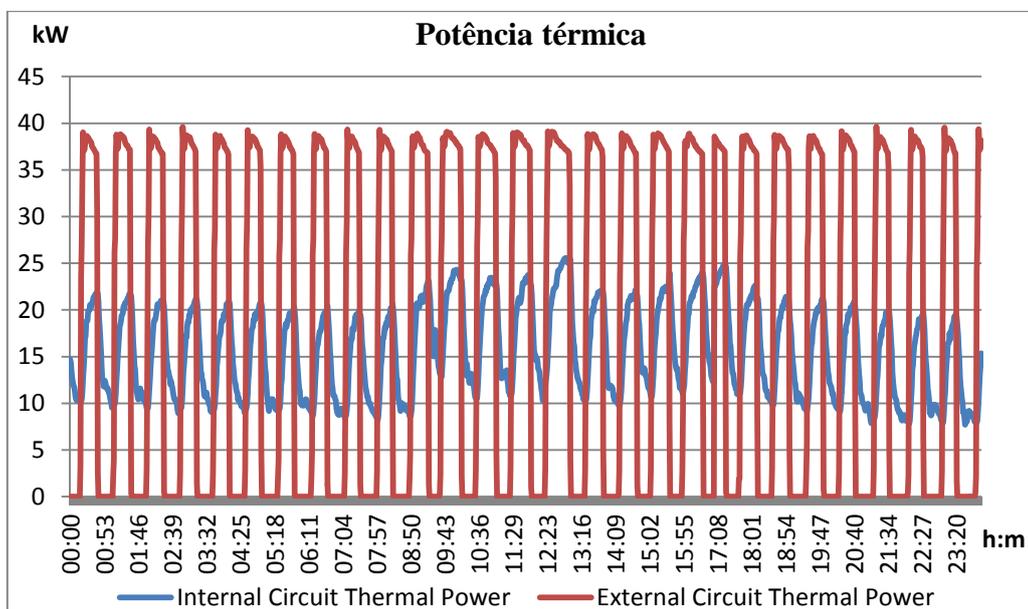


Figura 49 - Potência térmica 9 de Julho de 2013

Tabela 18 - Consumos 9 de Julho de 2013

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Bomba interna 2	Ventilo convectores
368 kWh	54,56 kWh	2,84 kWh	3,64 kWh	5,25 kWh	7,91 kWh

Tabela 19 - EER 9 de Julho de 2013

EER1	EER2	EER3	EER4
6,75	6,41	5,55	4,96

Como podemos ver pelos gráficos, foi reduzido o ponto de funcionamento das bombas de circulação, o que permite ter um consumo muito menor com uma diminuição pouco significativa no caudal que a bomba debita. Isto em conjunto com a elevada carga térmica permitiu obter um EER4 elevado.

Vamos mostrar agora os dados para a esta época de arrefecimento de 2013. Os dados são desde o dia 27 de Junho de 2013 até ao dia 10 de Julho de 2013, dados que se conseguiram obter até á data em que foi escrito este trabalho.

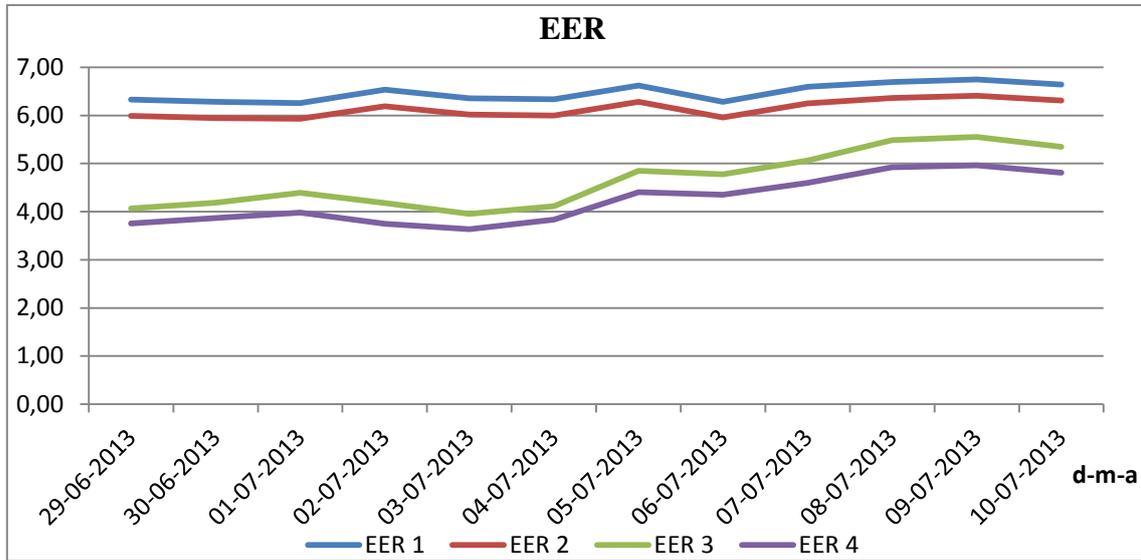


Figura 50 - EER da época de arrefecimento de 2013

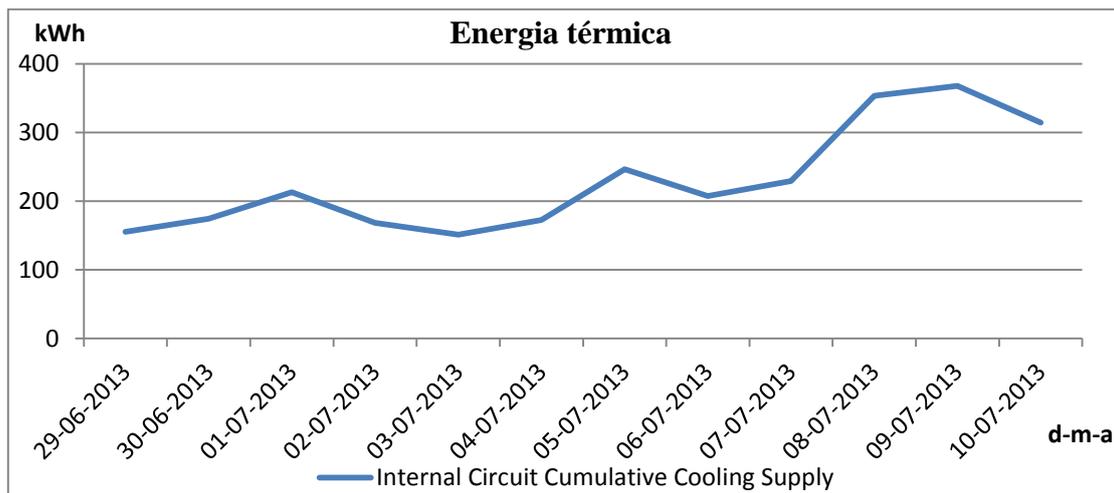


Figura 51 - Energia térmica da época de arrefecimento de 2013

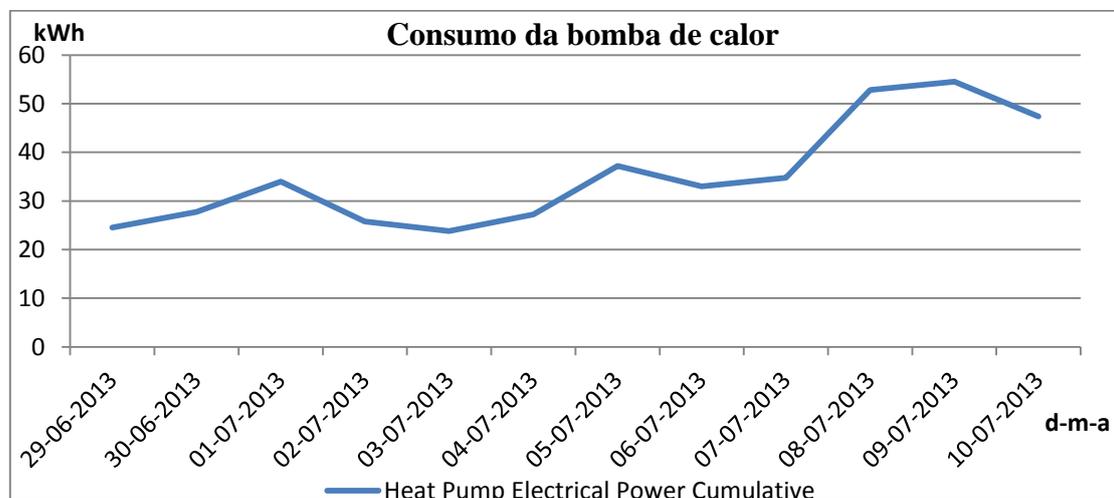


Figura 52 - Consumo da bomba de calor da época de arrefecimento de 2013

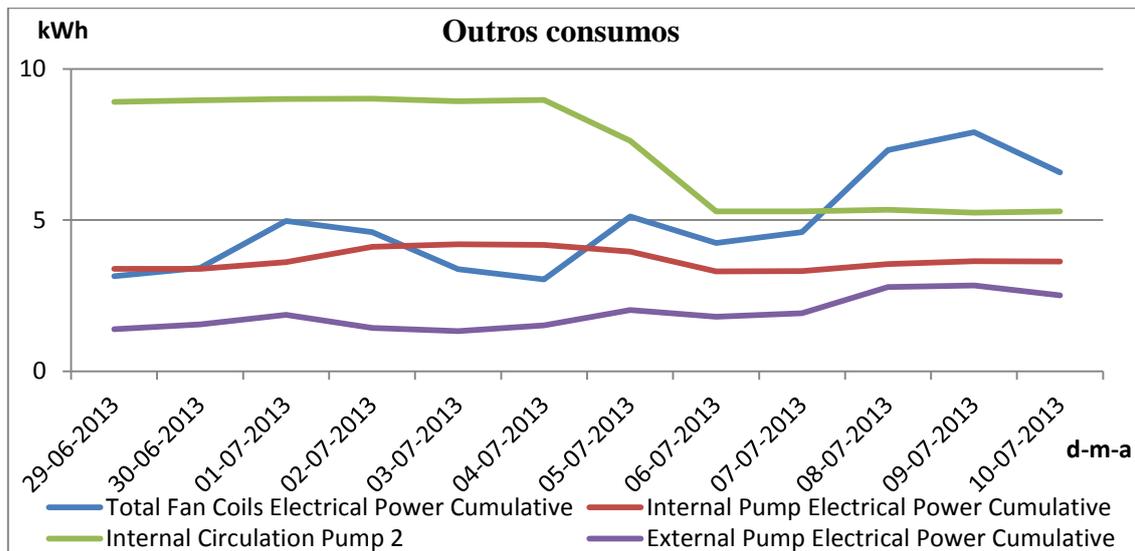


Figura 53 - Outros consumos da época de arrefecimento de 2013

Tabela 20 - Consumos da época de arrefecimento de 2013

Energia Térmica	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Bomba interna 2	Ventilo convectores
2754,3 kWh	422,83 kWh	23 kWh	44,28 kWh	87,87 kWh	58,34 kWh

Tabela 21 - EER da época de arrefecimento de 2013

EER1	EER2	EER3	EER4
6,51	6,18	4,77	4,33

No conjunto destes dias conseguimos valores de EER muito superiores a todos os outros períodos que analisámos, mesmo tendo em consideração o consumo da segunda bomba de circulação interna. Para isso contribuíram os ajustes feitos nas bombas de circulação e a elevada carga térmica do edifício nesse dia.

2.3.3. Macro para tratamento de dados em Microsoft Excel

Os dados diários do funcionamento do sistema estão disponíveis num ficheiro com a extensão .csv. Após a conversão para a extensão .xlsx podemos começar o tratamento de dados com ajuda do Microsoft Excel. Os dados são apresentados numa tabela em que para cada variável há um valor por minuto.

De modo a ser mais fácil o tratamento dos dados foi criada uma macro. Essa macro vai calcular os valores de COP ou EER e mostrar os valores totais diários e os gráficos das variáveis mais importantes para que a pessoa que está a analisar tenha uma boa percepção do estado de funcionamento do sistema. Os gráficos mostram as temperaturas da água dos circuitos externo e interno, a potência da bomba de calor, as potências das bombas de circulação e dos ventilo convectores e por último temos outro gráfico a mostrar as potências térmicas para o edifício e para os permutadores de calor geotérmicos. São também calculados os valores do consumo total

BM	BN	BO	BP	BQ	B
Total ThermalPower2Build					
227,2368					
Total ThermalPower2BHE					
177,642					
Total CompPower					
36,73335					
Total ExtPumpPower					
1,6212					
Total IntPumpPower					
5,0573					
Total IntPump2Power					
0					
Total FancoilsPower					
3,713383					
COP 1 COP 2 COP 3 COP 4					
6,186117 5,924637 5,234441 4,821977					

Figura 55 - Aspecto dos totais diários obtidos com a macro

diário da bomba de calor, das bombas de circulação e dos ventilo convectores, os valores totais da energia térmica para o edifício e para os permutadores de calor geotérmicos e são calculados os valores do COP ou EER. Todos os valores de temperatura estão representados em graus Celsius (°C), de energia em kWh e de potência em kW.

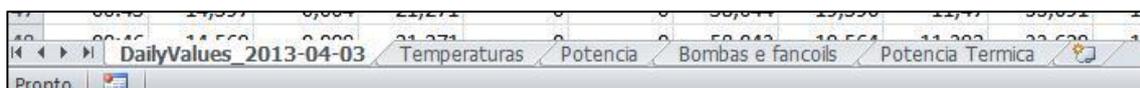


Figura 54 - Menu com os gráficos diários criados pela macro

Para utilizar a macro deve-se ter aberto o ficheiro com extensão .xlsm que contém a macro e o ficheiro DailyValues.xlsx que contém os dados do dia em questão e carregar na combinação de teclas “Ctrl + g”.

No anexo B podemos ver o código da macro.

2.4. Aplicação do armazenamento térmico

2.4.1. Escolha do material de mudança de fase

Para a temperatura da água que vai para os ventilo convectores estar entre 37 a 40°C o ideal era ter o armazenamento a uma temperatura compreendida entre 42 e 45 °C pois devemos ter em consideração que há uma diferença de temperatura entre o material de armazenamento e a água que sai do tanque de armazenamento. A temperatura do material de mudança de fase não deve ser demasiado elevada pois isso implica que durante o carregamento do armazenamento térmico a bomba tenha de fornecer água a uma temperatura muito elevada, o que vai provocar uma

diminuição no COP. Vamos ver na tabela seguinte os materiais de mudança de fase disponíveis no mercado com uma temperatura de funcionamento entre 38 e 48°C.

Tabela 22 - Lista dos materiais de mudança de fase

Nome	Tipo	Temperatura (°C)	Calor Latente (kJ/Kg)	Calor específico (kJ/Kg.°C)	Fabricante
MPCM 43D	Parafina	43	190 – 200	Sem informação	Microtek
Latest 40s	Sais inorgânicos	40	220	2	PCM energy P. Ltd
Latest 45	Sais inorgânicos	45	220	2	PCM energy P. Ltd
Latest 48	Sais inorgânicos	48	220	2	PCM energy P. Ltd
S44	Sais inorgânicos	44	100	1.61	PCM products
S46	Sais inorgânicos	46	210	2.41	PCM products
A39	Orgânico	39	105	2.22	PCM products
A40	Orgânico	40	230	2.43	PCM products
A42	Orgânico	42	105	2.22	PCM products
A43	Orgânico	43	165	2.37	PCM products
A44	Orgânico	44	242	2.15	PCM products
A46	Orgânico	46	155	2.22	PCM products
A48	Orgânico	48	234	2.85	PCM products
X40	Sólido-Sólido	40	125	1.67	PCM products
RT 42	Parafina	42	174	Sem informação	RubiTherm
RT 44 HC	Parafina	44	255	Sem informação	RubiTherm
PX 42	Parafina	41	114	Sem informação	RubiTherm
OM46P	Orgânico	46	245	Sem informação	SavEnrg
HS37N	Sais inorgânicos	37-39	60	Sem informação	Pluss
C48	Sulfato de sódio, água e aditivos	48	180	3.6	Climator
Parafol 22-95	Parafina	41.6	220	Sem informação	Sasol

Após uma análise da tabela 22 podemos salientar o A44 da PCM Products e o RT 44 HC da Rubitherm pois são os materiais da lista com maior valor de calor latente e cuja temperatura está no intervalo desejado. Portanto a ter de escolher um destes materiais, a minha escolha era o RT 44 HC da Rubitherm pois tem um valor de calor latente superior. Para ter um armazenamento de energia térmica de 100 kWh como está definido para o projecto necessitamos de 1411,76 kg deste material de mudança de fase.

2.4.2. Escolha da técnica de controlo

No nosso caso o objectivo principal da utilização do armazenamento de energia térmica é a diminuição da factura energética. Portanto, e olhando para o tarifário de energia eléctrica, rapidamente concluímos que devemos utilizar a energia térmica armazenada no período entre as 9h e as 10:30h pois é o período em que a energia é mais cara e devemos utilizar o período entre as 2h e as 6h para carregar o armazenamento pois é o período do dia em que a energia eléctrica é mais barata. Como durante o período de pico, das 9h às 10:30h a energia eléctrica é mais cara e também se paga pela potência utilizada, devemos reduzir os consumos eléctricos neste período. Assim, durante este período vamos deixar a bomba de calor desligada e usar exclusivamente o armazenamento de energia térmica para climatizar o edifício.

Nas figuras seguintes podemos ver o circuito que a água faz durante o carregamento do armazenamento de energia térmica e durante a utilização desse armazenamento para climatizar o edifício.

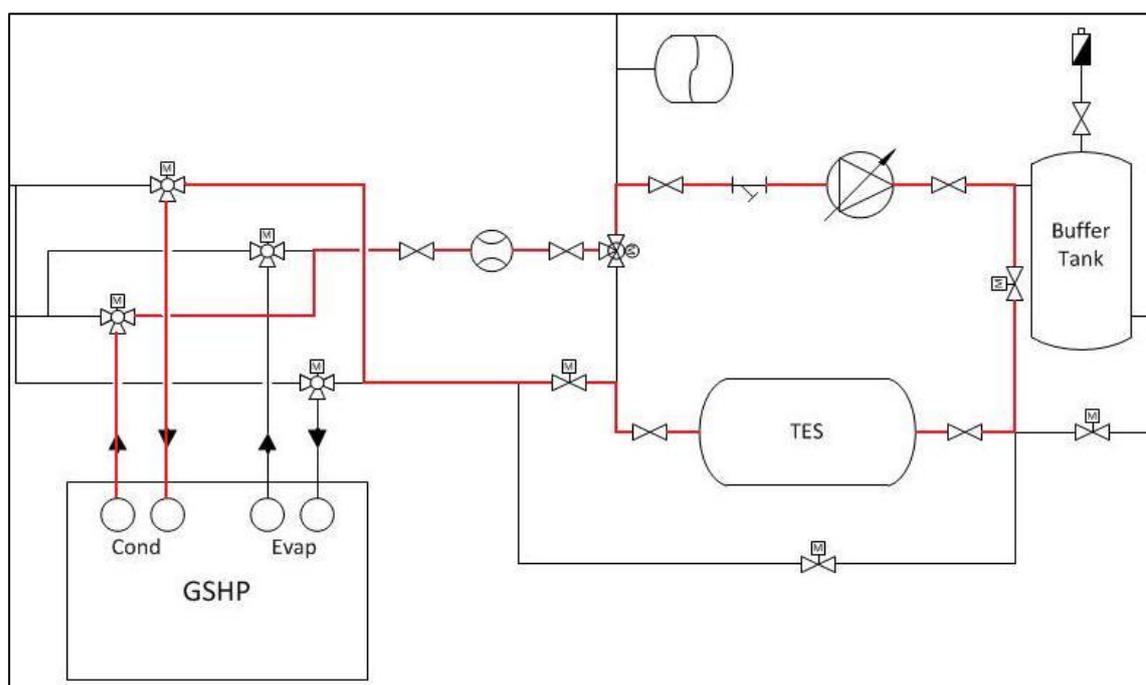


Figura 56 - Ciclo da água no carregamento do armazenamento de energia térmica

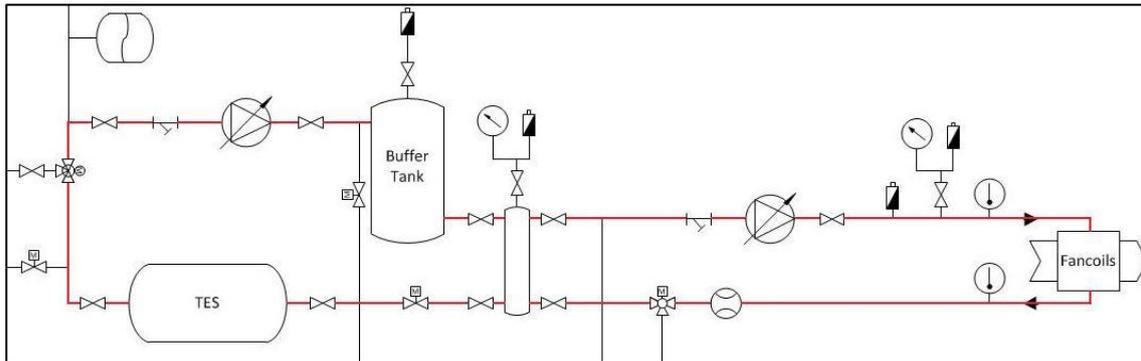


Figura 57 - Ciclo da água na climatização a partir do armazenamento de energia térmica

Vamos considerar o seguinte método de controlo para a climatização do edifício utilizando o armazenamento de energia térmica.

- Das 4h às 6h utiliza-se a bomba de calor exclusivamente para carregar o armazenamento de energia térmica.
- Das 6h às 8h o sistema arranca para climatizar o edifício de modo a estar na temperatura de conforto quando as pessoas chegam às 8h.
- Das 8h às 9h o sistema está em funcionamento normal.
- Às 9h começa a utilizar-se exclusivamente o armazenamento para climatizar o edifício até se acabar a energia térmica armazenada.
- Quando acabar a energia térmica armazenada liga-se a bomba de calor e o sistema fica em funcionamento normal até às 18h, hora em que as pessoas abandonam o edifício.

2.4.3. Cálculos para o armazenamento térmico

Vamos agora calcular os consumos para o sistema no seu funcionamento normal e para o sistema a funcionar em conjunto com o armazenamento de energia térmica utilizando a técnica de controlo indicada no tópico anterior. Para fazermos os cálculos vamos ter em conta algumas considerações.

- Para o controlo do sistema sem armazenamento consideramos que o sistema arranca às 6h para que às 8h o edifício esteja na temperatura de conforto tal como no controlo com armazenamento e que após isso está em funcionamento normal até às 18h, hora em que é desligado.
- Das 6h às 8h consideramos uma energia térmica total de 45 kWh para o edifício atingir a temperatura de conforto e consideramos que a bomba de calor têm um COP de 6,1.
- Durante o carregamento de 100 kWh do armazenamento de energia térmica consideramos que a bomba de calor tem um COP de 5,5 pois a nesse período a temperatura a que a água sai da bomba de calor é mais elevada, cerca de 48°C para

carregar o material de mudança de fase que tem uma temperatura de funcionamento de 44°C.

- Nestes dois períodos consideramos que a bomba de circulação externa consome 5% do consumo da bomba de calor, que a bomba de circulação interna consome 222W e que os ventilo convectores consomem em média 272W. Consideramos estes valores pois são os valores médios para estas variáveis neste dia.

Para fazer esta comparação vamos considerar o dia com maior carga térmica após a resolução do problema das válvulas e fazer os cálculos para esse dia. O dia escolhido foi o dia 7 de Abril de 2013. Os seguintes gráficos mostram os valores da temperatura exterior, da radiação solar no exterior e da potência térmica pedida pelo edifício.

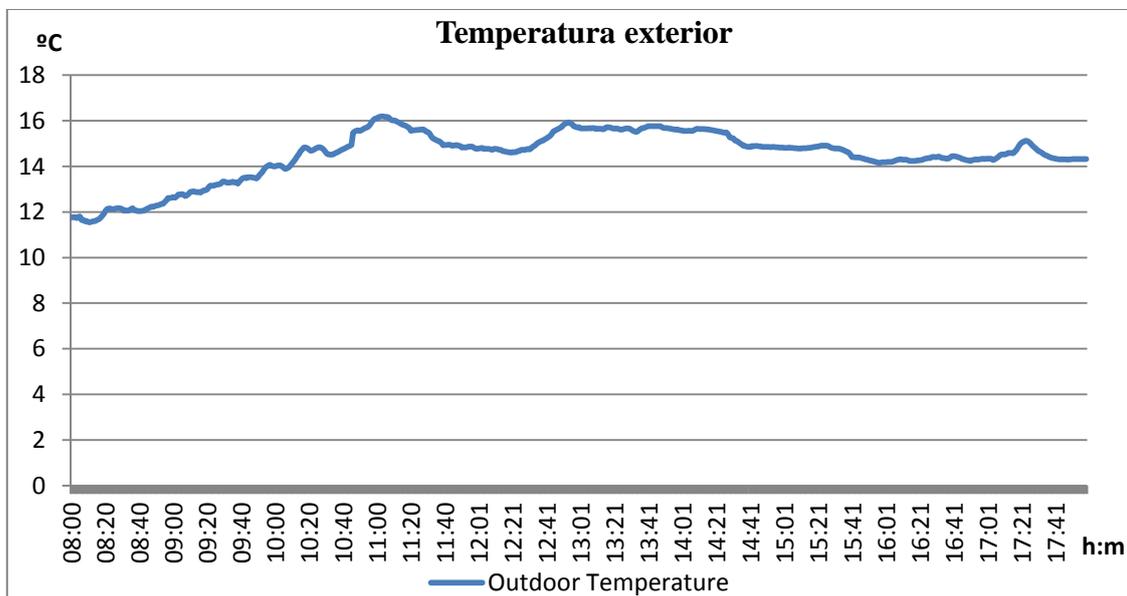


Figura 58 - Temperatura exterior 7 de Abril de 2013

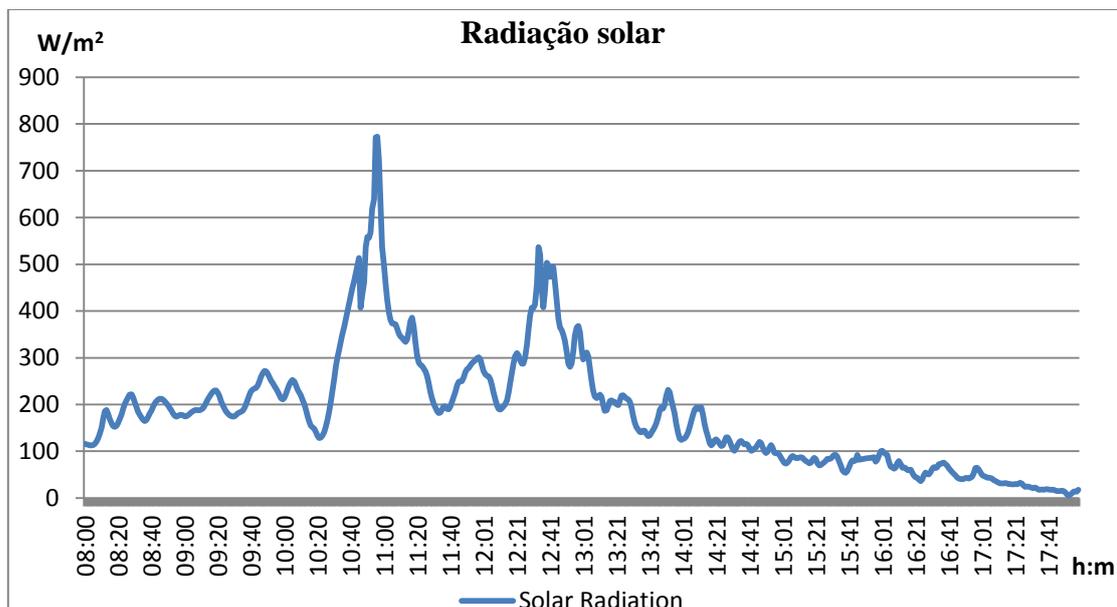


Figura 59 - Radiação solar 7 de Abril de 2013

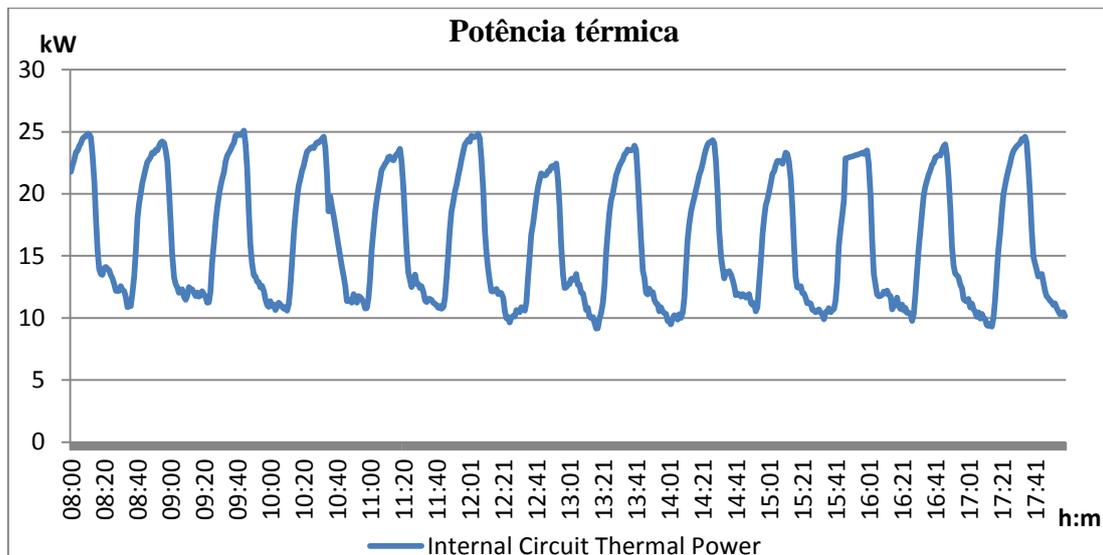


Figura 60 - Potência térmica 7 de Abril de 2013

Primeiro vamos ver os resultados para o funcionamento sem armazenamento de energia térmica.

Tabela 23 - Consumos sem armazenamento de energia térmica

Hora	Energia térmica (kWh)	Preço da electricidade (€/kWh)	Bomba de calor kWh	Bomba externa kWh	Bomba interna kWh	Ventilo convectores kWh	Total kWh	Custo do kW pico
6h – 8h	45	0,0808	7,38	0,37	0,44	0,54 kWh	8,73	
			0,6 €	0,03 €	0,04 €	0,04 €	0,71 €	
8h – 9h	18,81	0,1173	3,31	0,14	0,22	0,29 kWh	3,96	
			0,39 €	0,02 €	0,03 €	0,03 €	0,47 €	
9h – 10:30h	24,66	0,2124	4,18	0,17	0,33	0,43 kWh	5,12	
			0,89 €	0,04 €	0,07 €	0,09 €	1,09 €	2,78 €
10:30h – 18h	119,08	0,1173	18,76	0,79	1,66	1,99 kWh	23,21	
			2,2 €	0,09 €	0,2 €	0,23 €	2,72 €	

Energia total	41,03 kWh
Custo total sem kW pico	4,98 €
Custo total com kW pico	7,76 €

Tabela 24 - COP sem armazenamento de energia térmica

COP1	COP2	COP3	COP4
6,17	5,91	5,5	5,06

A tabela seguinte mostra os resultados para o funcionamento com armazenamento de energia térmica de 100 kWh. A descarga dos 100 kWh de energia térmica tem início às 9h e termina às 15:09h.

Tabela 25 - Consumos com armazenamento de energia térmica de 100 kWh

Hora	Energia térmica (kWh)	Preço da electricidade (€/kWh)	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores	Total	Custo do kW pico
4h – 6h	100	0,0727	18,18 kWh	0,91 kWh	0,44 kWh	0	19,53 kWh	
			1,32 €	0,07 €	0,03 €	0	1,42 €	
6h – 8h	45	0,0808	7,38 kWh	0,37 kWh	0,44 kWh	0,54 kWh	8,73 kWh	
			0,6 €	0,03 €	0,04 €	0,04 €	0,71 €	
8h – 9h	18,81	0,1173	3,31 kWh	0,14 kWh	0,22 kWh	0,29 kWh	3,96 kWh	
			0,39 €	0,02 €	0,03 €	0,03 €	0,47 €	
9h – 10:30h	24,66	0,2124	0	0	0,33 kWh	0,43 kWh	0,77 kWh	
			0	0	0,07 €	0,09 €	0,16 €	0,21 €
10:30h – 18h	119,08	0,1173	6,45 kWh	0,27 kWh	1,66 kWh	1,99 kWh	10,38 kWh	
			0,76 €	0,03 €	0,2 €	0,23 €	1,22 €	

Energia total	43,38 kWh
Custo total sem kW pico	3,97 €
Custo total com kW pico	4,19 €

Tabela 26 - COP com armazenamento de energia térmica de 100 kWh

COP1	COP2	COP3	COP4
5,88	5,62	5,18	4,79

Analisando os valores do custo total rapidamente concluímos que há uma grande poupança. No entanto resolvi calcular a poupança para um armazenamento de energia térmica que dê apenas para satisfazer o período de pico. Na seguinte tabela podemos ver os cálculos para um armazenamento de energia térmica de 25 kWh, que corresponde às necessidades térmicas do edifício no período de pico.

Tabela 27 - Consumos com armazenamento de energia térmica de 25 kWh

Hora	Energia térmica (kWh)	Preço da electricidade (€/kWh)	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores	Total	Custo do kW pico
5:30h – 6h	25	0,0727	4,55 kWh	0,23 kWh	0,11 kWh	0	4,88 kWh	
			0,33 €	0,02 €	0,01 €	0	0,36 €	
6h – 8h	45	0,0808	7,38 kWh	0,37 kWh	0,44 kWh	0,54 kWh	8,73 kWh	
			0,6 €	0,03 €	0,04 €	0,04 €	0,71 €	
8h – 9h	18,81	0,1173	3,31 kWh	0,14 kWh	0,22 kWh	0,29 kWh	3,96 kWh	
			0,39 €	0,02 €	0,03 €	0,03 €	0,47 €	
9h – 10:30 h	24,66	0,2124	0	0	0,33 kWh	0,43 kWh	0,77 kWh	
			0	0	0,07 €	0,09 €	0,16 €	0,21 €
10:30 h – 18h	119,08	0,1173	18,76 kWh	0,79 kWh	1,66 kWh	1,99 kWh	23,21 kWh	
			2,2 €	0,09 €	0,2 €	0,23 €	2,72 €	

Energia total	41,55 kWh
Custo total sem kW pico	4,41 €
Custo total com kW pico	4,63 €

Tabela 28 - COP com armazenamento de energia térmica de 25 kWh

COP1	COP2	COP3	COP4
6,11	5,85	5,43	5

Na tabela seguinte vamos ver a poupança monetária resultante de ter um armazenamento de energia térmica de 100 kWh e de 25 kWh.

Tabela 29 - Poupanças resultantes da utilização do armazenamento de energia térmica

	Poupança com 100 kWh		Poupança com 25 kWh	
	€	%	€	%
Sem kW pico	1,01	20,28	0,57	11,45
Com kW pico	3,58	46,07	3,14	40,4

Como podemos observar nesta última tabela a utilização de armazenamento de energia térmica traz uma grande poupança percentual. A poupança com 100 kWh de armazenamento é de 46,07% enquanto que a poupança com 25 kWh de armazenamento é de 40,4%, ou seja, com 25 kWh poupamos 75% na aquisição de material de mudança de fase e diminuimos a poupança diária em apenas 5,67%. No que diz respeito ao COP temos valores mais elevados com um

armazenamento de 25 kWh do que com um armazenamento de 100 kWh. Isto leva-nos a concluir que, no nosso caso, o ideal é ter um armazenamento de energia térmica dimensionado apenas para o período de pico, ou seja, com a energia térmica suficiente para satisfazer o período entre as 9h e as 10:30h. A partir desse valor de energia térmica adicionar mais capacidade não traz vantagens significativas.

2.5. Aplicação do geocooling

2.5.1. Escolha da técnica de controlo

A temperatura da água fornecida aos ventilo convectores quando utilizamos o geocooling é em norma superior quando comparada com a temperatura da água fornecida pela bomba de calor. Deste modo concluímos que a potência térmica que conseguimos extrair do edifício com o geocooling é inferior á potência térmica extraída com bomba de calor. Na figura seguinte podemos ver o circuito que a água faz quando utilizamos o geocooling.

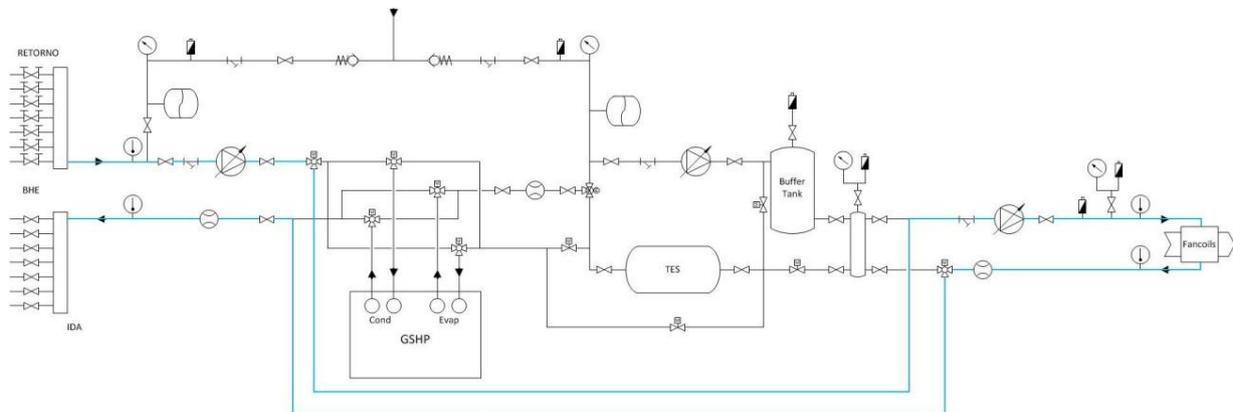


Figura 61 - Ciclo da água com a utilização do geocooling

Para definir uma técnica de controlo devemos primeiro saber qual a potência térmica que o geocooling é capaz de retirar do edifício. O primeiro momento do dia em que faz sentido usar o geocooling mesmo com uma baixa potência térmica é durante a madrugada para que quando as pessoas chegam ao edifício de manhã o edifício esteja na sua temperatura de conforto. Outro momento em que é claramente vantajoso utilizar o geocooling é o período de ponta, em que a electricidade é mais cara, pois íamos ter um consumo eléctrico menor, o que ia ter um grande impacto na factura energética. No entanto o geocooling pode não conseguir dar resposta às exigências térmicas do edifício durante esse período. Além destes períodos, fazia sentido utilizar o geocooling em todos os outros momentos em que este conseguisse satisfazer as necessidades térmicas do edifício.

Antes de ser definida a técnica de controlo para o geocooling é necessário fazer um teste para saber qual a potência térmica que o geocooling é capaz de extrair do edifício para várias temperaturas da água que vem dos permutadores de calor geotérmicos. É importante fazer este

teste para várias temperaturas pois a temperatura da água vai sofrendo ligeiras alterações ao longo da época de arrefecimento. Vamos chamar $P(T)$ á potência térmica do geocooling para a temperatura da água nesse momento.

Assim, a técnica de controlo que consideramos é a seguinte.

- Entre as 4h e as 6h, período em que a electricidade é mais barata, o sistema é ligado e utiliza o geocooling para deixar o edifício na sua temperatura de conforto.
- Entre as 6h e as 8h se for necessário o sistema volta a climatizar o edifício utilizando o geocooling.
- Das 9h às 10:30h o sistema utiliza o geocooling mas caso a temperatura das salas atinja 1°C acima da temperatura de conforto definida, o sistema passa a climatizar utilizando a bomba de calor.
- Nos restantes períodos não referidos o sistema utiliza a bomba de calor para climatizar o edifício. Se durante 30 minutos seguidos a potência térmica retirada ao edifício for inferior a $P(T)$ o sistema muda para o geocooling. Assim que a temperatura no edifício subir 1°C em relação á temperatura de conforto definida, o sistema volta a usar a bomba de calor.
- Às 18h é desligado o sistema.

2.5.2. Cálculos para o geocooling

Para podermos comparar a utilização do geocooling com o funcionamento normal apenas com bomba de calor vamos considerar o dia 1 de Julho de 2013. Nos gráficos seguintes podemos ver a temperatura exterior, a radiação solar e carga térmica do edifício nesse dia.

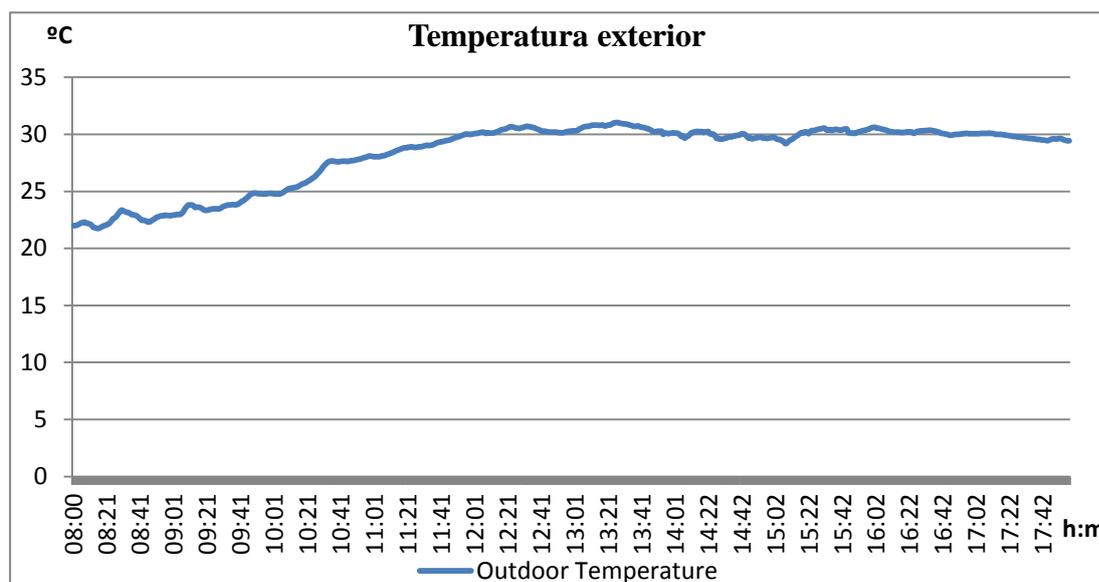


Figura 62 - Temperatura exterior 1 de Julho de 2013

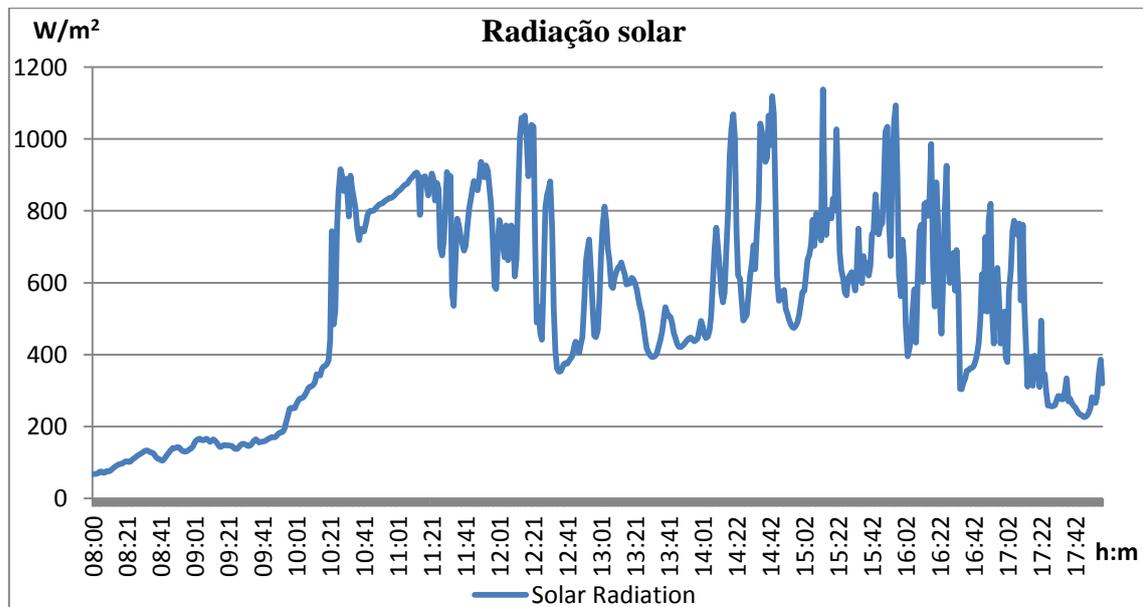


Figura 63 - Radiação solar 1 de Julho de 2013

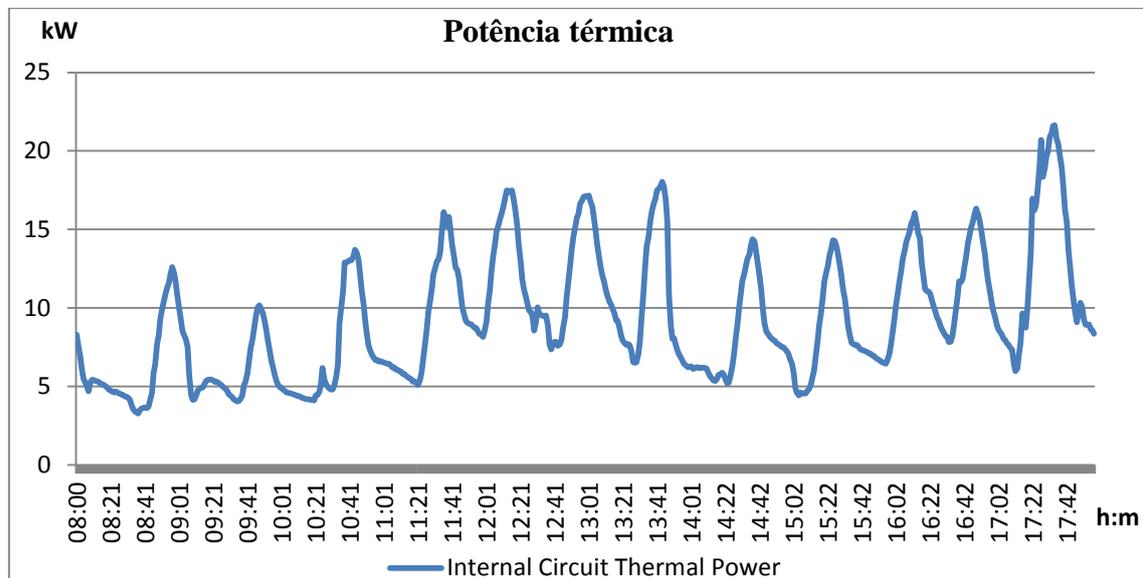


Figura 64 - Potência térmica 1 de Julho de 2013

Na tabela seguinte podemos observar os resultados para o funcionamento apenas com bomba de calor. Consideramos que durante a madrugada a carga térmica do edifício para que fique na temperatura de conforto são 8 kWh e que nesse período o EER da bomba de calor é 6.

Tabela 30 - Consumos sem a utilização de geocooling

Hora	Energia térmica (kWh)	Preço da electricidade (€/kWh)	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores	Total	Custo do kW pico
5:30h – 6h	8	0,0727	1,33 kWh	0,05 kWh	0,26 kWh	0,15 kWh	1,79 kWh	
			0,1 €	0,00 €	0,02 €	0,01 €	0,13 €	
8h – 9h	5,89	0,1173	0,99 kWh	0,06 kWh	0,51 kWh	0,13 kWh	1,68 kWh	
			0,12 €	0,01 €	0,06 €	0,01 €	0,2 €	
9h – 10:30h	8,55	0,2124	0,93 kWh	0,06 kWh	0,76 kWh	0,22 kWh	1,98 kWh	
			0,2 €	0,01 €	0,16 €	0,05 €	0,42 €	2,24 €
10:30h – 18h	77,78	0,1173	12,17 kWh	0,66 kWh	3,92 kWh	1,73 kWh	18,48 kWh	
			1,43 €	0,08 €	0,46 €	0,2 €	2,17 €	

Energia total	23,93 kWh
Custo total sem kW pico	2,92 €
Custo total com kW pico	5,15 €

Tabela 31 - EER sem a utilização de geocooling

EER1	EER2	EER3	EER4
6,5	6,16	4,62	4,19

Na tabela seguinte podemos observar os resultados do funcionamento do sistema a utilizar o geocooling, considerando que têm uma potência térmica de 6 kW. No período entre as 8h e as 9h consideramos também a utilização do geocooling porque a carga térmica assim o permite.

Tabela 32 - Consumos com a utilização de geocooling

Hora	Energia térmica (kWh)	Preço da electricidade (€/kWh)	Bomba de calor	Bomba externa	Bomba interna	Ventilo convectores	Total	Custo do kW pico
4:40h – 6h	8	0,0727	0	0,29 kWh	0,19 kWh	0,4 kWh	0,88 kWh	
			0	0,02 €	0,01 €	0,03 €	0,06 €	
8h – 9h	5,89	0,1173	0	0,22 kWh	0,14 kWh	0,13 kWh	0,49 kWh	
			0	0,03 €	0,02 €	0,01 €	0,6 €	
9h – 10:30h	8,55	0,2124	0	0,33 kWh	0,2 kWh	0,22 kWh	0,76 kWh	
			0	0,07 €	0,04 €	0,05 €	0,16 €	0,24 €
10:30h – 18h	77,78	0,1173	12,17 kWh	0,66 kWh	3,92 kWh	1,73 kWh	18,48 kWh	
			1,43 €	0,08 €	0,46 €	0,2 €	2,17 €	

Energia total	20,6 kWh
Custo total sem kW pico	2,45 €
Custo total com kW pico	2,68 €

Tabela 33 - EER com a utilização de geocooling

EER1	EER2	EER3	EER4
8,24	7,33	5,53	4,87

Na tabela seguinte vemos a poupança resultante da utilização do geocooling para este caso que estudámos.

Tabela 34 - Poupanças resultantes da utilização de geocooling

	Poupança com geocooling	
	€	%
Sem kW pico	0,47	16
Com kW pico	2,48	47,89

Como podemos observar nesta última tabela a utilização geocooling traz uma grande poupança percentual. De salientar que consideramos que o geocooling conseguia retirar do edifício 6 kW de energia térmica e que para fazer os cálculos considerámos um dia com uma carga térmica média. Muito provavelmente num dia com uma carga térmica elevada o geocooling não conseguia satisfazer a carga térmica das 9h às 10:30h, período em que a electricidade é mais cara, o que faria com que a poupança não fosse tão significativa. No entanto, e como o investimento para permitir a um sistema de climatização destes fazer geocooling é reduzido, na

minha opinião é de aproveitar a hipótese de utilizar o geocooling se as temperaturas da água nos permutadores de calor geotérmicos assim o permitirem.

Neste caso o EER4 subiu de 4,19 para 4,87 com a utilização do geocooling. No entanto, em locais onde as temperaturas do solo são baixas, podemos ter um valor de EER4 muito superior.

Conclusão

As bombas de calor têm um papel importante na redução do consumo energético. Quando acopladas a permutadores de calor geotérmicos conseguem desempenhos muito melhores pois trabalham com temperaturas estáveis e mais próximas das temperaturas que se pretendem obter. Com o aumento do consumo eléctrico e o perfil de carga da rede eléctrica tão variável ao longo do dia surgem incentivos e penalizações por parte das empresas vendedoras de energia com o objectivo de aliviar as discrepâncias nesse perfil de carga. Através do armazenamento de energia térmica podemos desviar o consumo eléctrico para períodos em que a energia eléctrica é mais barata, contribuindo para um melhor funcionamento da rede eléctrica, para uma melhor integração de energias renováveis e principalmente para reduzir a factura energética, que é o mais importante do ponto de vista do consumidor.

A utilização de bombas de calor de alto rendimento permite criar um sistema de climatização muito versátil e de baixo consumo. É versátil pois permite acoplar vários componentes. Desde armazenamento de energia térmica, geocooling, aquecimento de águas sanitárias, existem muitas opções para tirar mais partido do sistema de climatização e diminuir a factura energética. Na instalação que serviu de base para este trabalho foram usados componentes de alto rendimento, o que permitiu que o rendimento global do sistema fosse bastante elevado.

Observamos através dos dados de funcionamento da instalação que serve de base para este trabalho que durante o primeiro ano de funcionamento ainda estava muito pouco optimizada. No segundo ano de funcionamento foi dada mais atenção ao sistema tentando optimizar o seu funcionamento. Houve vários problemas, referidos neste trabalho, que tiveram de ser resolvidos e que impediram tanto o bom funcionamento do sistema como a obtenção de dados relativos a esse funcionamento. Na época de aquecimento de 2013 as optimizações feitas no sistema não tinham o retorno esperado muito devido ao problema da fuga de água nas válvulas. Após este problema estar resolvido foi possível ter o sistema a funcionar como era esperado e ter retorno das optimizações que eram feitas. Devido á existência no edifício de um sistema de ar condicionado convencional, os utilizadores utilizavam-no em vez de utilizar o sistema de bomba

de calor geotérmica. Isto levou a que muitas vezes a carga térmica pedida ao sistema fosse muito abaixo da carga térmica real pedida pelos espaços climatizados com o sistema de bomba de calor geotérmica.

Os cálculos feitos para o funcionamento do sistema com auxílio de um armazenamento de energia térmica revelaram que a utilização deste armazenamento leva a uma poupança elevada na factura energética para o tarifário eléctrico em vigor para este edifício. Podemos retirar desses cálculos a conclusão de que o armazenamento de energia térmica deve ser dimensionado para o período de utilização em que a energia eléctrica é mais cara pois se tivermos um armazenamento de energia superior as poupanças na factura energética vão ser pouco significativas.

Os cálculos para a utilização do geocooling revelaram que a sua utilização também traz grandes reduções na factura energética. Como os custos de dar ao sistema a capacidade de utilizar o geocooling são relativamente reduzidos, concluímos que, sempre que as características do local o permitirem, deve ser aproveitado.

Após todo este tempo em contacto com o sistema e com a sua análise deixo uma proposta para continuação na sua optimização. Seria interessante fazer um estudo de optimização do sistema através da variação do ponto de funcionamento das várias bombas de circulação e da bomba de calor a fim de encontrar os pontos de funcionamento para os quais o sistema tinha um desempenho melhor. Durante o tempo em que trabalhei com o sistema não foi possível fazer este estudo devido aos vários problemas que ocorreram no sistema mas deixo aqui a proposta.

Bibliografia

- [1] ASHRAE, Inc. Thermal Storage. Chapter 50. 2008.
- [2] Natural Resources Canada. Heating and cooling with a heat pump. Dezembro 2004.
<http://www.nrcan.gc.ca/home>.
- [3] RETScreen International. Ground-source heat pump project analysis.
www.etscreen.net/ang/textbook_gshp.html.
- [4] D. Pahud. Geocooling: sondes géothermiques pour ler rafraîchissement de bâtiments.
- [5] D. Pahud; M. Belliardi; P. Caputo. Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied low energy office buildings. 27 de Março de 2012.
- [6] Dimitrios Mendrinou. GroundMed Project. <http://www.groundmed.eu/>. Consultado entre Fevereiro e Julho de 2013.
- [7] Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra. GroundMed DMS Server. <http://groundmed.isr.uc.pt/GroundMED/Home.html>, Consultado entre Fevereiro e Julho de 2013.
- [8] Concerted Action Energy Performance of Buildings Directive. <http://www.epbd-ca.eu/>. Consultado entre Maio e Julho de 2013.
- [9] Intelligent Energy Europe. IDEAL-EPBD. <http://ideal-epbd.eu/>. Consultado entre Maio e Julho de 2013.
- [10] CESAM. IEA-Energy Conservation through Energy Storage. <http://energy-storage.org/legal-notice.html>. Consultado entre Fevereiro e Maio de 2013.
- [11] Climator Sweden AB. <http://www.climator.com/en/home/>.
- [12] Microtek Laboratories. <http://www.microteklabs.com/>.
- [13] PCM Energy P. Ltd. <http://pcmenergy.com/>.
- [14] PCM Products Ltd. <http://www.pcmproducts.net/>.
- [15] Pluss Polymers. <http://www.thermalenergystorage.in/>.
- [16] Rubitherm. <http://www.rubitherm.de/english/>.
- [17] SavEnrg. <http://www.savenrg.com/>.

Anexo A – Descrição pormenorizada do edifício da ARHC e do sistema de climatização

Localização, tipo e uso do edifício

O sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) está localizado no edifício público da Administração Regional Hidrográfica do Centro em Coimbra.

Localização geográfica: Cidade (País)	Coimbra (Portugal)
Latitude	40°12'55.97"
Longitude	8°26'18.38"W
Altitude	24 m
Utilização	Serviços públicos
Tipo	Escritórios

Dados da construção do edifício



Os espaços a ser climatizados com a GSHP estão localizados no 3º andar do edifício e têm uma área total de aproximadamente 586 m².

A seguinte tabela contém a caracterização dos espaços do 3º andar.

Zonas do Edifício	Tecto (m2)	Piso (m2)	Altura (m)
3.02	20,72	19,12	2,85
3.09	36,25	31,53	2,85
3.10	47,59	41,99	2,85
3.11	18,97	17,5	2,85
3.12	38,10	35,14	2,85
3.13	17,58	16,22	2,85
3.14	20,05	18,49	2,85
3.15	17,23	15,43	2,85
3.16	20,32	18,74	2,85
3.17	38,15	35,19	2,85
3.18	25,52	23,54	2,85
3.19	18,11	16,71	2,85
3.20	44,66	39,38	2,85
3.26	21,64	20,08	2,85
3.27	47,33	41,41	2,85
3.28	30,56	25,56	2,85
3.29	20,51	18,83	2,85
3.30	14,84	13,63	2,85
3.31	21,29	19,55	2,85
3.36	29,67	27,37	2,85

Janelas



Nas tabelas seguintes são apresentadas a área e as características térmicas das janelas para cada orientação dos espaços climatizados.

Zonas do Edifício	YN(m2)	YS (m2)	XE(m2)	XW(m2)
3.02	3,045			
3.09	5,285			
3.10		6,090	3,480	
3.11		3,045		
3.12		5,285		
3.13		1,610		
3.14		3,045		
3.15		2,240		
3.16		3,045		
3.17		5,285		
3.18		3,850		
3.19		1,610		
3.20		3,850		6,090
3.26				3,045
3.27				6,895
3.28	3,457		3,850	
3.29			3,850	
3.30			2,240	
3.31			3,850	
3.36	3,850			

Características Térmicas		
U(janela)	3,75	W/m ² ·K
g(janela)	0,42	_____
U(caixilho)		W/m ² ·K
A (m²)	Persianas Externas	Persianas Internas
1,75	Não	Não

Paredes

Paredes Exteriores

Nas tabelas seguintes observamos a área das paredes exteriores em função da sua orientação e as características das paredes.

Zonas	YN (m2)	YS (m2)	XE (m2)	XW (m2)
3.02	10,95			
3.09	19,24		14,05	
3.10		20,02	19,28	
3.11		10,13		
3.12		19,98		
3.13		9,41		
3.14		10,7		
3.15		8,96		
3.16		10,8		
3.17		19,84		
3.18		13,45		
3.19		9,87		
3.20		14,99		21,87
3.26				10,51
3.27	15			23,61
3.28	18,68		12,45	
3.29			11,5	
3.30			8,82	
3.31			11,82	
3.36	15,75			

Paredes Exteriores do 3º andar					
Material	Espessura (m)	Condutividade (kJ/hmK)	Densidade (kg/m3)	Calor Especifico (kJ/kgK)	Resistência (hm2K/kJ)
Reboco de gesso	0,015	2,88	1600	1	0
Reboco de cimento	0,05	3,6	1800	1	0
Pedra Calcária	0,5	6,12	2200	1	0
Reboco de cimento	0,05	3,6	1800	1	0

Paredes Interiores

Paredes Interiores					
Material	Espessura (m)	Condutividade (kJ/hmK)	Densidade (kg/m ³)	Calor Especifico (kJ/kgK)	Resistência (hm ² K/kJ)
Placa de gesso laminado	0,013	1,08	900	1	0
Lã de Rocha	0,1	0,144	12	1,03	0
Placa de gesso laminado	0,013	1,08	900	1	0

Tecto e pavimento

Tipo de pavimento					
Material	Espessura (m)	Condutividade (kJ/hmK)	Densidade (kg/m ³)	Calor Especifico (kJ/kgK)	Resistência (hm ² K/kJ)
Betão	0,2	3,32	1200	1	∅

Tipo de tecto					
Material	Espessura (m)	Condutividade (kJ/hmK)	Densidade (kg/m ³)	Calor Especifico (kJ/kgK)	Resistência (hm ² K/kJ)
Betão	0,2	3,32	1200	1	∅

Uso, ocupação e cargas térmicas

Ganhos internos, ventilação, infiltração e acoplamento de ar

Ganhos Internos

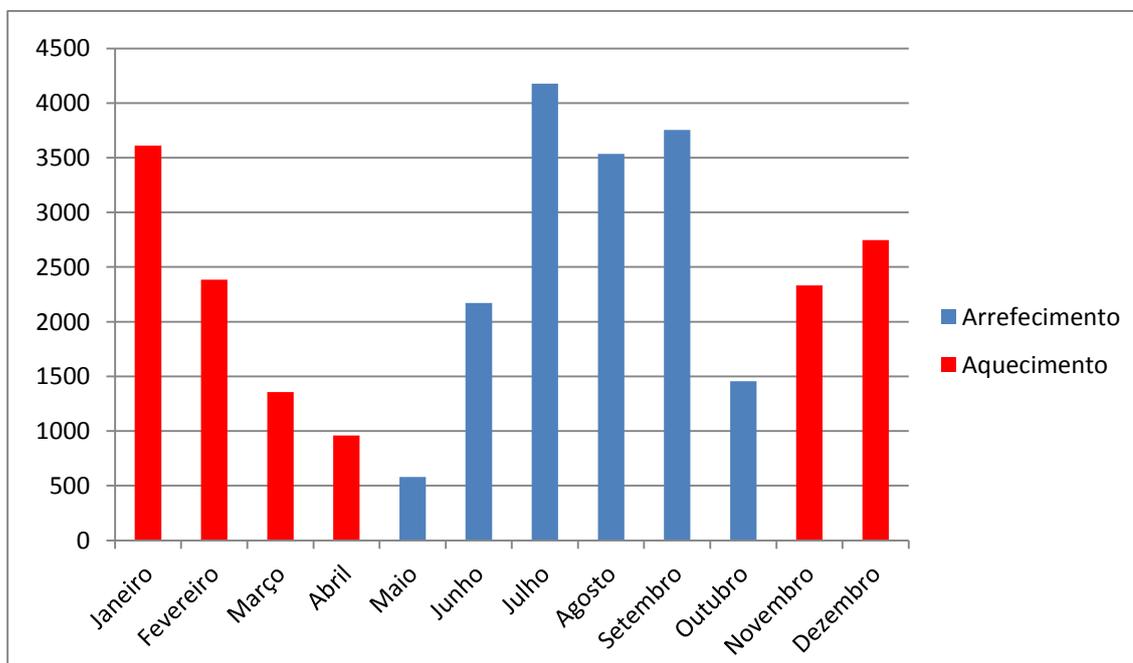
Zonas	Número de pessoas	Numero de computadores	Área (m2)	Pessoas (W)	Computadores (W)	Iluminação artificial (W)
3.02	2	2	19,12	450	360	158,696
3.09	3	3	31,53	750	540	261,699
3.10	5	5	41,99	150	900	348,517
3.11	1	1	17,5	600	180	145,25
3.12	4	4	35,14	150	720	291,662
3.13	1	1	16,22	150	180	134,626
3.14	1	1	18,49	150	180	153,467
3.15	1	1	15,43	150	180	128,069
3.16	1	1	18,74	600	180	155,542
3.17	4	4	35,19	150	720	292,077
3.18	1	1	23,54	150	180	195,382
3.19	1	1	16,71	600	180	138,693
3.20	4	4	39,38	300	720	326,854
3.26	2	2	20,08	750	360	166,664
3.27	5	5	41,41	600	900	343,703
3.28	4	4	25,56	300	720	212,148
3.29	2	2	18,83	150	360	156,289
3.30	1	1	13,63	150	180	113,129
3.31	2	2	19,55	300	360	162,265
3.36	2	2	27,37	300	360	227,171

Ventilação (renovações por hora)
Ar exterior
0,9
Infiltração (renovações por hora)
Ar exterior
0.1 nos escritórios
0.6 nos espaços comuns
Acoplamento de ar entre zonas (renovações por
0 (entre escritórios contíguos)
0.25 (entre o corredor e os escritórios)

Cargas térmicas (cargas pico e cargas mensais)

	Carga pico (kW)	Dia do pico
Verão (kW)	48	12 Ago
Inverno (kW)	34	7 Jan

	Total de cargas [kW·h]		Pico das cargas [kW]	
	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento
Janeiro	3611,26	0,00	33,58	0,00
Fevereiro	2383,57	0,00	22,30	0,00
Março	1355,99	0,00	29,89	0,00
Abril	958,18	0,00	14,94	0,00
Maio	0,00	580,69	0,00	11,79
Junho	0,00	2172,51	0,00	33,90
Julho	0,00	4178,22	0,00	44,10
Agosto	0,00	3535,73	0,00	48,02
Setembro	0,00	3753,07	0,00	32,08
Outubro	0,00	1455,9	0,00	23,55
Novembro	2330,98	0,00	28,40	0,00
Dezembro	2747,79	0,00	32,00	0,00



Descrição do Clima no local

Temperatura

Latitude	40°12'55.97"
Longitude	8°26'18.38"
Altitude	24m
Temperatura média anual do ar (°C)	15,1
Humidade relativa média anual do ar (%)	77

INSTITUTO GEOFÍSICO DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Valores Climatológicos e Actinométricos Normais (1971/2000)

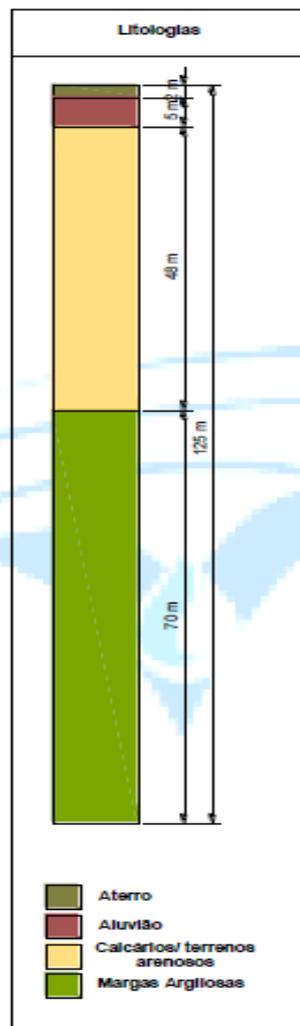
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Pressão (mb) Média	1004.9	1003.6	1002.2	998.9	999.3	1001.4	1001.0	1001.3	1001.6	1001.5	1003.1	1003.9	1001.9
Temperatura (°C) Média	9.5	10.7	12.3	13.4	15.6	18.8	20.8	20.7	19.3	16.2	12.7	10.7	15.1
méd. das máx.	14.1	15.7	18.3	19.2	21.6	25.5	28.4	28.7	26.7	22.0	17.4	14.7	21.0
méd. das mín.	5.9	7.0	7.7	8.9	11.0	13.8	15.5	15.4	14.4	12.0	9.0	7.4	10.7
Humidade Relativa (%)	80	78	74	75	77	75	73	73	74	78	80	81	77
Evap. Piche 09:00-09:00 (mm)	62.0	65.1	94.0	91.5	97.1	108.4	129.4	125.6	106.4	86.8	64.8	65.0	1092.4
Nebulosidade (0-10)	5	6	5	6	6	5	4	4	5	6	6	6	5
Insoleção Média (h)	4.9	5.1	6.4	6.6	7.3	8.6	9.6	9.4	7.4	5.7	4.8	4.1	6.7
%	49	47	53	50	51	58	65	69	59	51	48	43	54
Radiação Global (méd.) (cal.cm2)	175	240	362	436	492	560	579	527	405	283	193	149	367
Precipitação 09:00-09:00 (mm)	121.0	115.0	72.0	91.0	85.0	44.0	15.0	15.0	55.0	108.0	116.0	139.0	975.0
00:00-24:00 (mm)	119.6	114.2	71.9	88.6	80.6	42.6	14.4	16.5	50.8	104.0	113.3	139.8	956.3
Nº de dias	15	13	13	15	13	9	5	5	9	14	14	15	138
Vento Vel. média (Km/h)	9.8	9.7	9.4	9.2	8.8	8.3	8.2	8.0	7.6	8.5	9.0	10.7	8.9
Dirac.predominante	SE	SE	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW/SE	S	SE	
Duração (h)	138.7	107.0	126.7	138.3	177.5	178.7	257.2	233.5	157.9	101.4/107.0	98.2	133.3	

Solo e geologia

Geologia geral

	Parâmetros do solo	
Tipo de localização (rural, reforço de construção, campo ou pavimentada)	campo	
Perfil geral do solo	Aluvião de granito/xisto com 20% de quartzo, saturado com água	
Condutividade estimada	2	W/m*K
Calor volumétrico estimado	2484	kJ/K*m3
Caudal de águas subterrâneas (qualitativo: nenhum, alto, baixo)	baixo (sem corrente)	
Nível freático	5	m

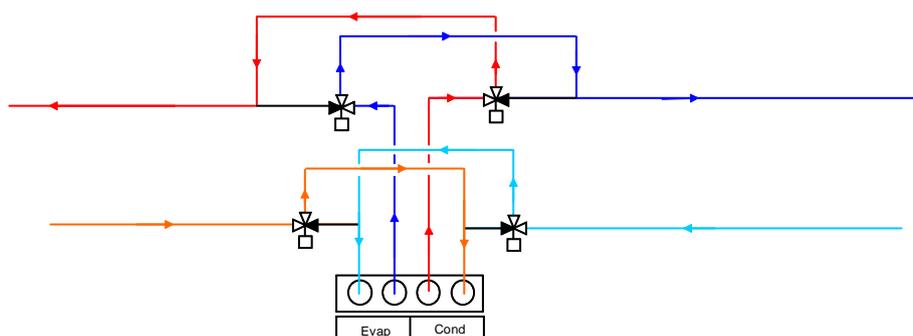
Perfil geológico



Descrição do sistema

Descrição da bomba de calor

A bomba de calor foi fornecida pela CIAT. É uma bomba de calor reversível água-água com performance otimizada. A reversibilidade é feita no circuito da água de modo a que esta circule sempre em contra corrente nos permutadores de calor. Isto é feito com válvulas motorizadas de 3 vias como é mostrado na figura.



O refrigerante utilizado é o R410A. Os permutadores de calor foram escolhidos especialmente para obter uma elevada performance. Foi decidido o uso de dois compressores on/off em conjunto devido ao seu rendimento superior, especialmente em situações de carga parcial, e pela sua robustez.

O desempenho do protótipo da bomba de calor foi testado no centro de pesquisa da CIAT em Culoz. Nas tabelas seguintes podemos ver os resultados obtidos.

Condições	Modo de arrefecimento						
	Evaporador		Condensador		Capacidade de arrefecimento	EER	Eurovent Class A
	Entrada	Saída	Entrada	Saída			
EUROVENT	12°C	7°C	30°C	35°C	56 kW	5.05	>= 5.05
Edifício piloto em Coimbra	15°C	10°C	25°C	30°C	63.5 kW	6.19	n.a.

Condições	Modo de aquecimento						
	Evaporador		Condensador		Capacidade de aquecimento	COP	Eurovent Class A
	Entrada	Saída	Entrada	Saída			
EUROVENT	10°C	5°C	40°C	45°C	61 kW	4.58	>= 4.45
Edifício piloto em Coimbra	15°C	10°C	35°C	40°C	70.4 kW	5.65	n.a.



Temperaturas da água consideradas para o projecto

Temperaturas da água (Arrefecimento) Entrada/Saída	[°C]	15/10
Temperaturas da água (Aquecimento) Entrada/Saída	[°C]	35 / 40

Capacidade da bomba de calor para os modos de arrefecimento e aquecimento

Capacidade de aquecimento – 70.4 kW

Capacidade de arrefecimento – 63.5 kW

Descrição do circuito interno

Descrição do sistema hidráulico

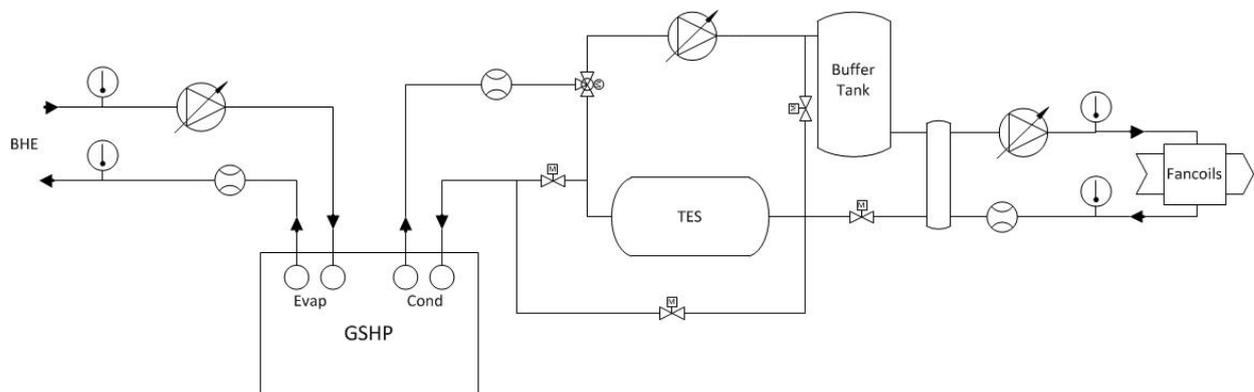
O circuito interno é composto por dois circuitos: um circuito primário aquecido ou arrefecido pela bomba de calor e um circuito secundário que abastece os ventilo convectores. A separação dos dois circuitos é feita por uma garrafa de mistura que permite separar o fornecimento da procura. Há também um tanque de buffer que permite aumentar a inércia térmica do circuito primário e assim diminuir a quantidade de ciclos on/off da bomba de calor.

O tanque de armazenamento térmico (a ser instalado mais tarde) faz parte do circuito primário.

O circuito interno é composto basicamente pelos seguintes componentes:

- Bombas de circulação
- Equipamentos de monitorização: sensores de fluxo, temperatura e pressão
- Tanque de armazenamento térmico: um tanque de 3000 litros
- Um tanque de buffer
- Válvulas, filtros, etc.

Esquema simplificado da instalação



Tanque interno: volume e posição

O tanque está localizado no circuito primário na para os ventilo convectores e tem um volume de 1000 litros.

Localização dos sensores de controlo de temperatura para a bomba de calor

Na entrada do condensador para o modo de aquecimento e na entrada do evaporador para o modo de arrefecimento.

Distribuição das tubagens de água do sistema

O esquema da distribuição das tubagens para o circuito interno está no anexo *****

Bombas de circulação escolhidas

Para o circuito primário foi escolhida uma bomba de ímanes permanentes de alto rendimento fornecida pela Grundfos, modelo Magna 32-120 F, com controlo variável de velocidade.

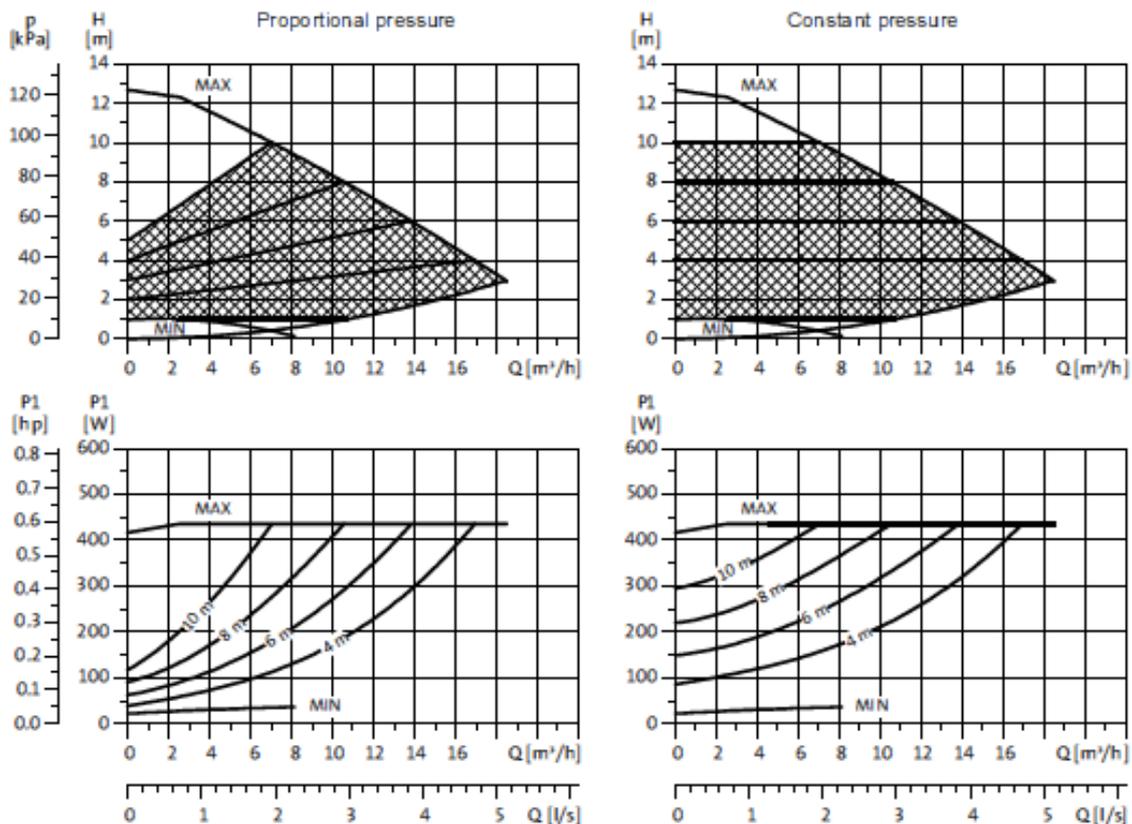
Fluxo – 11 m³/h

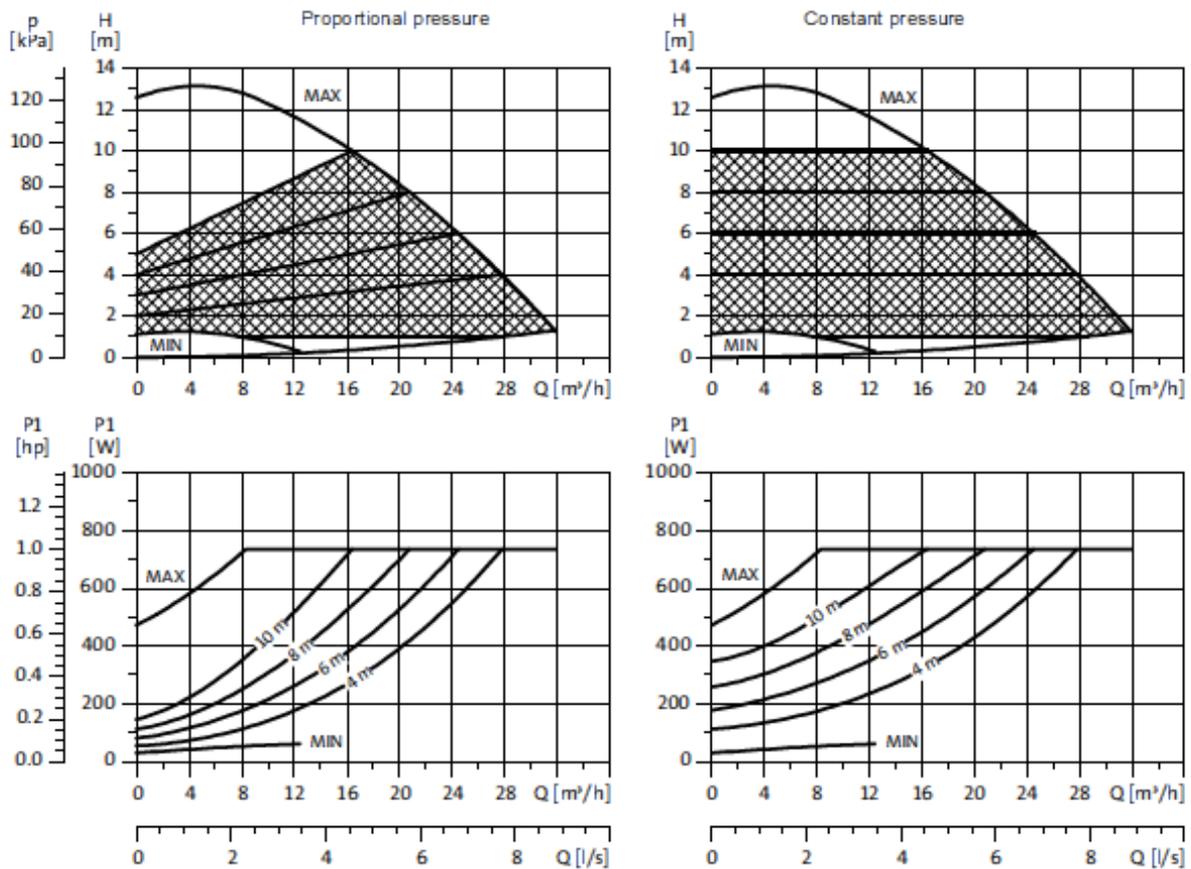
Elevação – 6 mH₂O

Para o circuito secundário foi escolhida uma bomba de ímanes permanentes de alto rendimento fornecida pela Grundfos, modelo Magna 50-120 F, com controlo variável de velocidade.

Fluxo – 11 m³/h

Elevação – 9 mH₂O



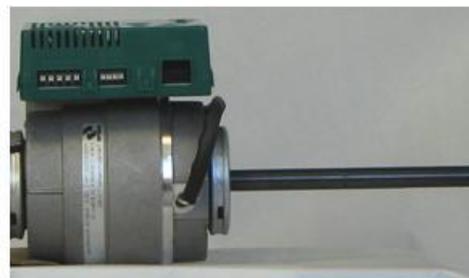


Descrição técnica dos ventilo convectores

Fabricante e modelo escolhido

Os ventilo convectores foram fornecidos pela CIAT. São ventilo convectores COADIS 2, modelos 235/22 e 235/33. No total foram instaladas 33 unidades – 23 unidades do modelo 235/22 e 10 unidades do modelo 235/33.

Os ventilo convectores estão equipados com motores ímanes permanentes e ventiladores de alto desempenho.



Nas tabelas seguintes podemos ver os valores do fluxo de ar, a capacidade de aquecimento e arrefecimento e a potência que conseguem disponibilizar.

COADIS 2 235/22

TEMPERATURES	COOLING COIL	HEATING COIL
Fluid	Water	Water
Fluid inlet temperature	10 °C	40 °C
Fluid outlet temperature	15 °C	
Recycled air inlet temperature	26 °C	22 °C
Recycled air inlet humidity	50 %(RH)	50 %(RH)

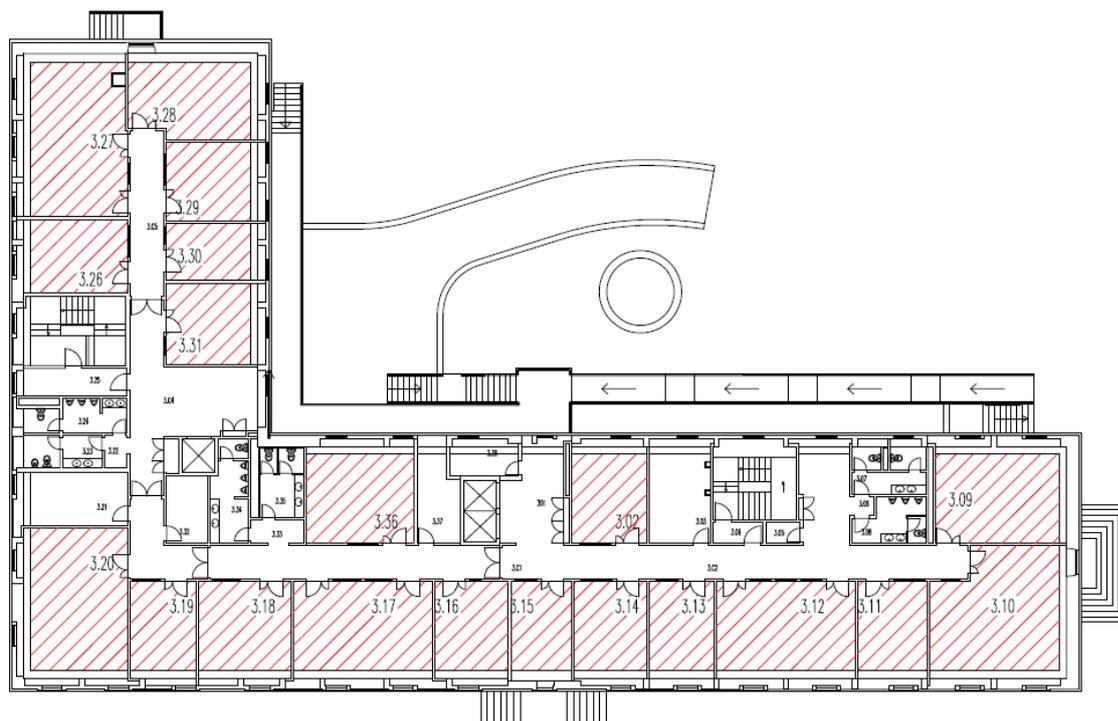
SERIE	R#	Qa m3/h	COOLING COIL					HEATING COIL				Lp ISO or NR
			Pt W	Ps W	Ts °C	Qe m3/h	dP kPa	P W	Ts °C	Qe m3/h	dP kPa	
235	R2	620	1.780	1.780	17,7	0,266	6,93	1.840	31,3	0,269	6,43	41
	R4	450	1.550	1.470	16,4	0,266	6,96	1.570	32,8	0,269	6,41	34
22	R6	295	1.270	1.140	14,7	0,266	6,99	1.220	34,9	0,269	6,39	21

COADIS 2 235/33

TEMPERATURES	COOLING COIL	HEATING COIL
Fluid	Water	Water
Fluid inlet temperature	10 °C	40 °C
Fluid outlet temperature	15 °C	
Recycled air inlet temperature	26 °C	22 °C
Recycled air inlet humidity	50 %(RH)	50 %(RH)

SERIE	R#	Qa m3/h	COOLING COIL					HEATING COIL				Lp ISO or NR
			Pt W	Ps W	Ts °C	Qe m3/h	dP kPa	P W	Ts °C	Qe m3/h	dP kPa	
235	R2	725	2.560	2.390	16,3	0,402	15,8	2.620	33,2	0,406	14,3	38
	R3	600	2.340	2.140	15,6	0,402	15,8	2.360	34,1	0,406	14,3	35
33	R6	305	1.660	1.340	13,0	0,402	15,9	1.480	37,1	0,406	14,2	16

Localização no edifício



Nas zonas 3.09, 3.12, 3.17, 3.26, 3.28, 3.29, 3.31 e 3.36 – 2 unidades do modelo 235/22.

Nas zonas 3.10, 3.20 e 3.27 – 2 unidades do modelo 235/33.

Nas zonas 3.02, 3.11, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.19 – 1 unidade do modelo 235/22.

Nas zonas 3.05, 3.18, 3.21 e 3.30 – 1 unidade do modelo 235/33.

Sistema de controlo

Cada ventilo convector é regulado individualmente por um termostato. A temperatura de conforto é escolhida pelo utilizador através de um controlador na parede e a velocidade dos ventiladores é controlada automaticamente através de um sinal de 0-10V.



Descrição do circuito externo

Descrição do permutador de calor geotérmico

Tipo de configuração

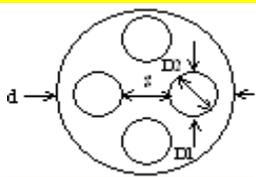
O permutador de calor geotérmico (GSHE) consiste em 7 furos verticais ligados em paralelo de forma balanceada.

Os 6 furos estão colocados numa grelha rectangular de 5x5 m.



Duplo U (especificações)

DOUBLE U TUBE



Diâmetro dos furos (d)	140	mm
Diâmetro interno do tubo (D2)	32	mm
Diâmetro externo do tubo (D1)	35	mm
Espaçamento entre tubos (s)	56	mm

Profundidade dos furos

Cada furo tem uma profundidade de 125 m.

Espaçamento dos furos

Há um espaçamento de 5 m entre cada furo.

Material e condutividade da argamassa

O material da argamassa é areia graduada e tem uma condutividade de 2,4 W/m.K.

Profundidade abaixo da superfície

Há um espaçamento de 0,8 m entre a superfície e o topo dos furos.

Material da tubagem

O material usado nas tubagens é polietileno de alta densidade (HDPE)

Fluido condutor

O fluido usado é água pura

Descrição do sistema hidráulico

Há 7 furos ligados em paralelo e balanceado através de válvulas de equalização. O fluxo externo total é de 11 m³/h.

O circuito externo consiste nos seguintes componentes:

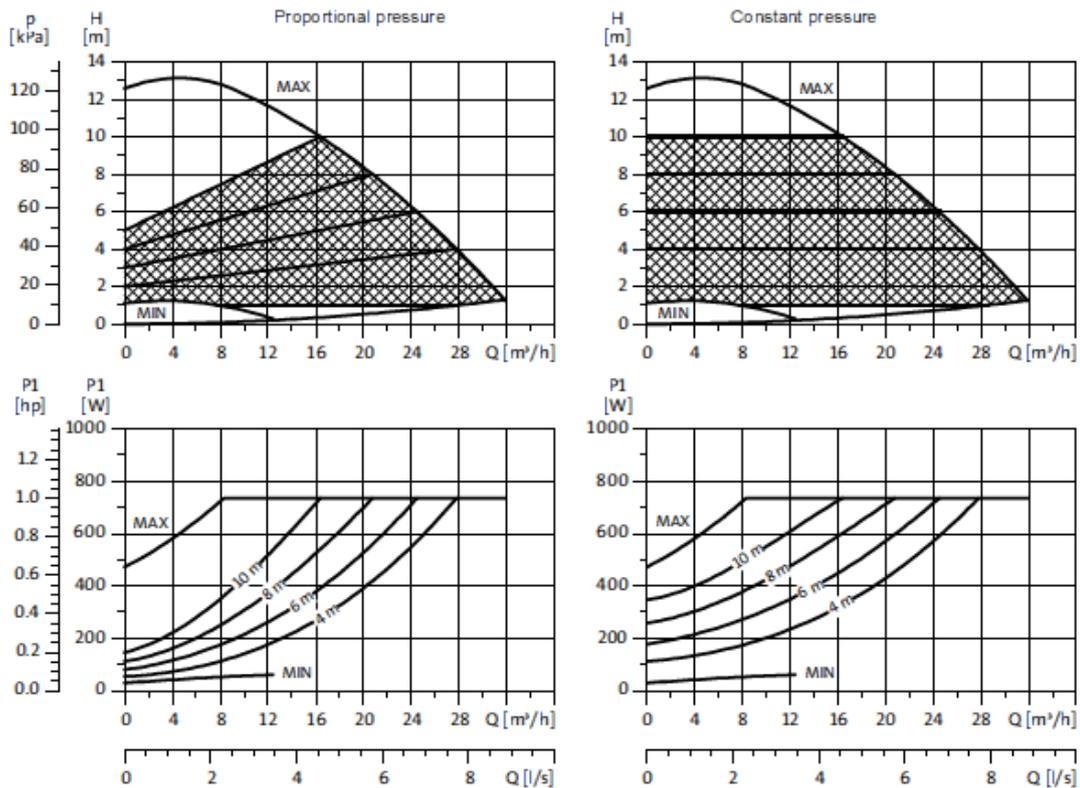
- Uma bomba de circulação
- Vasos de expansão
- Válvulas de regulação e equalização
- Equipamentos de monitorização: sensores de fluxo, temperatura e pressão

Bomba de circulação escolhida

Para o circuito externo foi escolhida uma bomba de ímanes permanentes de alto rendimento fornecida pela Grundfos, modelo Magna 50-120 F, com controlo variável de velocidade.

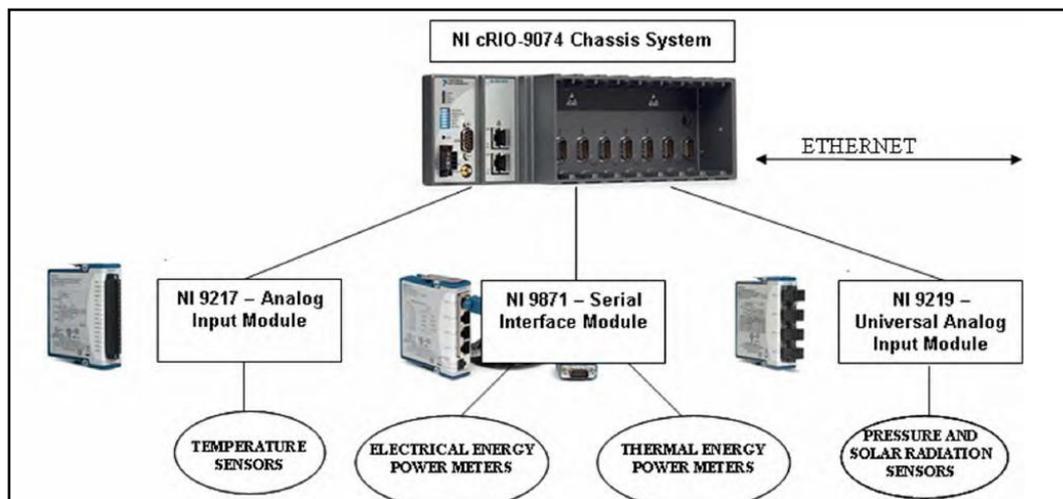
Fluxo – 11 m³/h

Elevação – 9 mH₂O

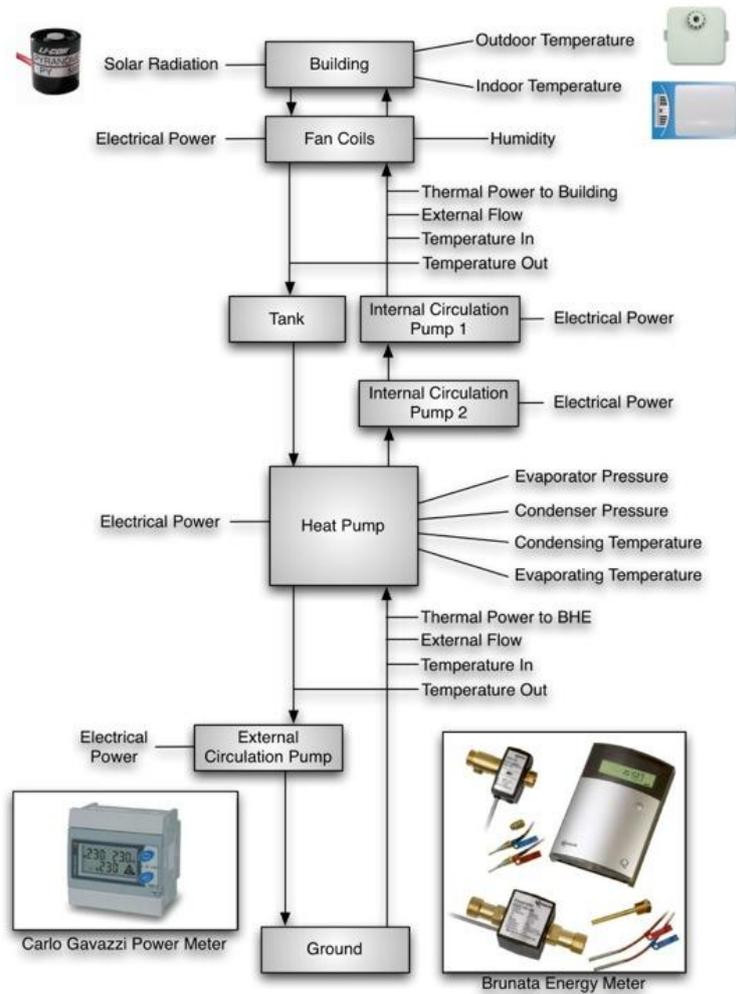


Sistema de aquisição de dados

Para o sistema de aquisição de dados foi escolhido o National Instruments cRIO-9074 com os módulos NI 9217, NI9871 e NI9219 para enviar os dados e gerir o sistema.



Para medição dos consumos eléctricos utiliza-se medidores da Carlo Gavazzi, para medir a energia térmica utiliza-se medidores Brunatta com medidores de caudal e de temperatura.



Para cada variável, o sistema mede um valor a cada 15 segundos e após ter 4 valores faz a média de modo a obter um valor a cada minuto. Os valores são enviados para o servidor em pacotes de 10 minutos.

Anexo B – Código da macro para tratamento dos dados diários

```
Sub GroundMed_Daily()  
,  
' GroundMed_Daily Macro  
' Adiciona nos DailyValues os graficos, o calculos dos consumos e os COPs  
,  
' Atalho por teclado: Ctrl+g  
,  
    shtname = ActiveSheet.Name  
  
    Columns("A:A").Select  
    Selection.NumberFormat = "h:mm"  
  
    With ActiveWindow  
        .SplitColumn = 0  
        .SplitRow = 1  
    End With  
    ActiveWindow.FreezePanes = True  
  
    Range("A:A,P:P,R:R,AS:AS,AU:AU").Select  
    Charts.Add  
    ActiveChart.ChartType = xlLine  
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:="Temperaturas"  
  
    Sheets(shtname).Select  
  
    Range("A:A,N:N").Select  
    Charts.Add  
    ActiveChart.ChartType = xlLine  
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:="Potencia"  
  
    Sheets(shtname).Select  
  
    Range("A:A,AA:AA,AE:AE,BC:BC,BL:BL").Select  
    Charts.Add  
    ActiveChart.ChartType = xlLine  
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:="Bombas e fancoils"  
  
    Sheets(shtname).Select  
  
    Range("A:A,X:X,AZ:AZ").Select  
    Charts.Add  
    ActiveChart.ChartType = xlLine  
    ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:="Potencia Termica"
```

```

Sheets(shtname).Move Before:=Sheets(1)

Range("BN2").Value = "Total ThermalPower2Build"
Range("BN3").Formula = "=sum(X:X)/60"

Range("BN5").Value = "Total ThermalPower2BHE"
Range("BN6").Formula = "=sum(AZ:AZ)/60"

Range("BN8").Value = "Total CompPower"
Range("BN9").Formula = "=sum(N:N)/60"

Range("BN11").Value = "Total ExtPumpPower"
Range("BN12").Formula = "=sum(BC:BC)/60"

Range("BN14").Value = "Total IntPumpPower"
Range("BN15").Formula = "=sum(AE:AE)/60"

Range("BN17").Value = "Total IntPump2Power"
Range("BN18").Formula = "=sum(BL:BL)/60"

Range("BN20").Value = "Total FancoilsPower"
Range("BN21").Formula = "=sum(AA:AA)/60"

Range("BN23").Value = "COP 1"
Range("BN24").Formula = "=sum(X:X)/sum(N:N)"

Range("BO23").Value = "COP 2"
Range("BO24").Formula = "=sum(X:X)/(sum(N:N)+sum(BC:BC))"

Range("BP23").Value = "COP 3"
Range("BP24").Formula =
"=sum(X:X)/(sum(N:N)+sum(BC:BC)+sum(AE:AE)+sum(BL:BL))"

Range("BQ23").Value = "COP 4"
Range("BQ24").Formula =
"=sum(X:X)/(sum(N:N)+sum(BC:BC)+sum(AE:AE)+sum(BL:BL)+sum(AA:AA))"

Range("BQ24").Select
End Sub

```