



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Integração de Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas em Edifícios

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

Autor

Juvêncio Correia Tavares

Orientador

Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Co-Orientador

Pedro Manuel Ferreira Gonçalves

Júri

Presidente: Professor Doutor Pedro de Figueiredo Carvalheira

Vogal: Professor Doutor Divo Augusto Quintela

Coimbra, Setembro de 2011.

A educação é a mais poderosa arma pela qual se pode mudar o mundo.

Nelson Mandela.

À minha mãe.

Agradecimentos

Deixo expressos meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições, que sem as quais o presente trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Orientador Adélio Manuel Rodrigues Gaspar pela disponibilidade, discussões e opiniões que foram muito úteis para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento académico.

Ao Pedro Gonçalves pelo incentivo, apoio, disponibilidade e opiniões que tornaram possível o desenvolvimento e elaboração deste trabalho.

À empresa CHAMA que disponibilizou dados importantes sobre o trabalho.

A Sara Francisco pelas sugestões e apoio na utilização do software *Window e Wis*.

Aos meus familiares pelo apoio e carinho que me disponibilizaram durante esses anos todos, em especial a minha mãe Albertina que apesar de estarmos muito distantes sempre me deu apoio incondicional.

Aos meus amigos e colegas pelas opiniões e força para continuar durante todo esse tempo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra pelos conhecimentos que me transmitiram durante esses anos todos.

À Provedoria da Faculdade de Ciência e Tecnologia para os alunos da CPLP que desde do início sempre me ajudou, sobre tudo nos aspectos burocráticos.

Resumo

A simulação de edifícios e sistemas de aquecimento está na base deste trabalho. O edifício em estudo é a Residência Universitária Polo-II-1, com o objectivo de adaptar utilização de “*Ground Source Heat Pumps*” (GSHP) para satisfazer a necessidade de aquecimento do edifício. Para determinar a carga térmica, o edifício terá que ser modelado no software de simulação dinâmica multizona TRNSYS (*TRaNsient SYstems Simulation*).

Da mesma forma que o edifício, o sistema também é modelado no TRNSYS a fim de obter o desempenho da GSHP a ser utilizado no edifício.

Para melhor avaliar os benefícios do sistema, vai ser preciso uma análise comparativa da GSHP com outros sistemas normalmente utilizados para o aquecimento doméstico.

Palavras-chave: GSHP, TRNSYS, Cargas térmicas, Modelação, Edifício, Simulação.

Abstract

The simulation of buildings and heating systems is the basis of this work. The building under study is the Residência Universitária Polo-II-1, with the aim of adapting the use of Ground Source Heat Pumps (GSHP) to get building thermal load. For determining the thermal load, the building must be modeled in the software for dynamic multizone simulation TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation).

Like the building, the system is modeled in TRNSYS to achieve the performance of the GSHP to be used in the building.

For a better evaluation of the system, it will take a comparative analysis of GSHP systems with others normally used for domestic heating.

Keywords: GSHP, TRNSYS, Thermal load, Modeling, Build, Simulation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objectivo	2
1.3. Enquadramento Regulamentar	3
1.3.1 Decreto – Lei n.º 78/2006 – Sistema Nacional de Certificação Energética e da qualidade do Ar Interior (SCE).....	3
1.3.2 Decreto – Lei n.º 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).....	4
1.4. Estrutura da Tese	5
CAPÍTULO 2 – “GROUND SOURCE HEAT PUMPS”	6
2.2. Perspectiva Histórica.....	6
2.3. Estado da Arte	7
2.3.1. Modo de Funcionamento.....	10
2.3.2. Ligação Terra	11
2.3.3. Sistema de Distribuição para Aquecimento /Refrigeração	13
2.4. Vantagens e Desvantagens	13
2.1. Em Portugal	15
CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO EM ESTUDO	16
3.1. Condições do Edifício Regulamentadas	16
3.2. Caso de Estudo	18
3.2.1. Soluções Construtivas	19
CAPÍTULO 4 – SOFTWARE TRNSYS	22
4.1. Introdução ao TRNSYS.....	22
4.2. Características do Edifício no TRNSYS	24
4.1.1. Envolvente Exterior	25
4.1.2. Condições Interiores	26
4.2. Parametrização do Sistema GSHP no TRNSYS.....	28
4.2.1. Ground Source Heat Pumps	28
4.2.2. Permutador de Calor no Solo (<i>Ground Loop</i>).....	29
CAPÍTULO 5 – SIMULAÇÃO DINÂMICA.....	33
5.1. Modelo do Sistema	33
5.1.1. Modelação do Edifício.....	33
5.1.2. Modelação da GSHP	36
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	44

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXO A – Soluções Construtivas.....	47
ANEXO B – Parametrização dos Módulos	48
ANEXO C - Interface do TRNSYS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição mundial do aproveitamento da energia geotérmica em 2010.	7
Figura 2: Os três principais componentes do sistema GSHP – 1) Bomba de Calor, 2) Ligação à Terra e 3) Sistema de Refrigeração/Aquecimento interior. [RETScreen International]	8
Figura 3: Circuito de arrefecimento passiva com preparação de água quente (Fonte: Dimplex). 9	
Figura 4: Desempenho da GSHP (Fonte: Catálogo da LAMPOASSA).	10
Figura 5: Ground-Coupled Heat Pump a) Vertical e b) Horizontal.	12
Figura 6: Esquema do permutador em U.	13
Figura 7: Projecto do piso e a orientação das fachadas, devidas em zonas.	18
Figura 8: Secção da parede exterior PE.	20
Figura 9: Secção da Laje 1 (laje da cobertura).	21
Figura 10: Exemplos de módulos - condições ambientais (<i>Type109-TMY2</i>) ligado a Edifício (<i>Type56a</i>).....	22
Figura 11: Módulo que representa GSHP no programa TRNSYS.....	22
Figura 12: Interface com os parâmetros do módulo - <i>Type504a</i>	23
Figura 13: Esquema típico de GSHP com os módulos básicos do sistema.....	24
Figura 14: Interface gráfica para introdução das zonas e a sua envolvente no TRNSYS.	25
Figura 15: Constituição da parede e o respectivo coeficiente de transferência de calor.	26
Figura 16: Interface onde se pode introduzir os ganhos internos do edifício.	27
Figura 17: Perfil de ocupação de um escritório para um dia de trabalho.	28
Figura 18: A interface no TRNSYS do permutador em U e a forma do tubo.	30
Figura 19: Interface dos parâmetros do módulo 556 no TRNSYS.	31
Figura 20: Carga térmica média diária do edifício.	35
Figura 21: Os parâmetros do BH mais importantes.	37
Figura 22: Variação da temperatura do fluido na saída do permutador de terra para número de BH constante variável e profundidades constantes (1 a 4 de Janeiro).	37
Figura 23: Variação da temperatura do fluido na saída do permutador de terra para número de BH constante e diferentes profundidades (1 a 4 de Janeiro).	38
Figura 24: O módulo do TRNSYS que representa o controlador.....	39
Figura 25: Perfil de funcionamento da GSHP durante 200 horas (8 dias mais 7 horas) de simulação.....	39
Figura 26: Variação das temperaturas durante 200 horas de simulação.	40
Figura 27: Performance da GSHP.	42
Figura 28: Comparação entre GSHP e ASHP.	43
Figura 29: A parede virada para Norte, Oeste e Sul introduzido no TRNSYS.....	47
Figura 30: As camadas das lajes intermédias (Laje_2) (para o pavimento o 5 é brita).....	47
Figura 32: Os parâmetros do módulo 108 no TRNSYS.	52
Figura 33: Os módulos utilizados na modelação do sistema.	52
Figura 34: Evolução da temperatura anual no solo segundo Kasuda.	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Zona Climática (Fonte: RCCTE).	16
Tabela 2: coeficiente de transmissão térmica (U) superficiais máxima admissíveis de elementos opacos.	17
Tabela 3: As dimensões referentes a zona_1 (1 janela e porta).	48
Tabela 4: As dimensões referentes a zona_2 (são 4 janelas e portas internas).	48
Tabela 5: As dimensões referentes a zona_4 (são 6 portas internas).	49
Tabela 6: As dimensões referentes a zona_5 (4 portas internas).	49
Tabela 7: As dimensões referentes a zona_6 (1 janela).	49
Tabela 8: Os parâmetros do permutador horizontal módulo 556 no TRNSYS.	50
Tabela 9: Os parâmetros do permutador vertical, módulo 557a no TRNSYS.	51

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Um dos grandes desafios que a humanidade tem que ultrapassar é a crescente dependência dos combustíveis fósseis. A tal dependência é devido ao elevado consumo energético e as formas de a obter. Por isso, pode-se afirmar que o sector energético anseia por uma revolução urgente e à escala mundial, sendo para tal necessário investir em novas fontes de energia mais abrangentes e menos poluentes, assegurando e garantindo um futuro para as gerações vindouras.

O assunto tem merecido destaque em grande parte dos estudos científicos nas universidades empresas ou mesmo na sociedade civil, sabendo que reduzindo a tal dependência, outros problemas como: alterações climáticas, delapidação dos recursos naturais e degradação do meio ambiente vão estar resolvidos. É neste contexto que começam a ser cada vez maiores os investimentos nas chamadas energias renováveis.

Energias renováveis são todas aquelas cuja taxa de renovação é superior á taxa de utilização. São exemplo de energias renováveis: a energia solar, a energia das ondas e marés, a energia hídrica, eólica, biomassa, biogás e geotérmica.

Uma das maiores fontes de energia é a própria Terra, pois cerca de 99 % do seu volume possui temperaturas superiores a 1000 °C e apenas cerca de 0,1 % se encontra abaixo dos 100 °C, no entanto é necessário ter em conta que devido há heterogeneidade da crosta terrestre o fluxo de calor verificado pode ser muito variável, sendo que as zonas de maior interesse nesta área serão as que manifestem um gradiente de temperatura mais elevado. (Mantillo & L.Rybach, 2006).

A “*Ground Source Heat Pumps*” faz o aproveitamento do calor armazenado no subsolo ou águas freáticas para a produção de águas quentes sanitárias, climatização ou mesmo produção de electricidade.

Esta tecnologia produz menos agentes contaminantes e utiliza um baixo consumo de electricidade convencional para um elevado rendimento.

Para melhor otimizar o sistema “*Ground Source Heat Pumps*” nos edifícios vai ser determinante a simulação dinâmica multizona no software TRNSYS. Com a simulação pretende-se determinar as cargas térmicas do edifício, posteriormente projectar o sistema mais adequado para o abastecimento das necessidades térmicas do edifício.

Com o intuito de projectar soluções construtivas energeticamente eficientes, as ferramentas de simulação térmica são instrumentos muito poderosos, possibilitando o teste de várias soluções propostas e a escolha daquela que apresente a maior eficiência energética. Com o aparecimento e crescente exigência da regulamentação térmica dos edifícios, a utilização destas ferramentas de simulação trona-se imprescindível, para garantir que os edifícios apresentem performances térmicas melhores ou iguais às requeridas pelos respectivos regulamentos a que estão sujeitos.

A escolha deste tema é devido ao facto das bombas de calor geotérmicas trabalham com energias renováveis, logo estamos na presença de uma tecnologia alternativa para colaborar no desafio do momento, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

1.2. Objectivo

O objectivo deste trabalho é integrar os sistemas de GSHP em edifícios e avaliar o seu desempenho em climas mediterrânicos, assim com este trabalho proporcionar mais condições para a implementação do sistema supracitado. Para melhor integrar a GSHP e fazer as análises/comparação entre alguns sistemas convencionais, vão ser feitas algumas simulações no software TRNSYS.

Desenvolver competências na área de modelação e simulação térmica de edifícios no software de simulação dinâmica multizona TRNSYS. O resultado das simulações vão servir de base para que se tomem medidas sustentáveis, ou seja, projectar as soluções construtivas energeticamente eficientes que proporciona conforto, estética, respeito pelo ambiente, mais económico e duradoira. Com isso tirar maior partido das condições ambientais e assim reduzir as necessidades de utilização de sistemas de aquecimento/arrefecimento.

Conhecimento aprofundado de sistemas “*Ground Source Heat Pumps*” em edifícios característicos e modelos de funcionamento. Comparação com sistemas de aquecimento que normalmente são usados.

O edifício em estudo é a residência universitária polo-II-1. O aquecimento é garantido em todos os quartos. Todos os pisos possuem uma ala dos quartos, uma cozinha, uma zona de hall e uma área de circulação (elevador, escadas e átrio de entrada).

1.3. Enquadramento Regulamentar

No Diário da República (DR 67 – série I – A) foram publicados três diplomas que transpõem parcialmente para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios que serão apresentados seguidamente.

1.3.1 Decreto – Lei n.º 78/2006 – Sistema Nacional de Certificação Energética e da qualidade do Ar Interior (SCE)

Este diploma aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade de Ar Interior nos edifícios (aplica-se nos edifícios novos e nos edifícios existentes sujeitos a grandes intervenções de reabilitação). A Certificação Energética permite obter informação sobre o conjunto dos demais aspectos importantes para a caracterização dos edifícios, nomeadamente, os consumos de energia dos edifícios e os respectivos custos energéticos durante o funcionamento normal dos mesmos. O SCE tem como objectivos: assegurar a aplicação regulamentar, nomeadamente no que respeita às condições de eficiência energética, à utilização de sistemas de energias renováveis de elevada eficiência energética e, ainda, às condições de garantia da qualidade do ar interior, de acordo com as exigências e disposições contidas no RCCTE e no RSECE; certificar o desempenho energético e a qualidade do ar interior nos edifícios; identificar as medidas correctivas ou de melhoria de desempenho aplicáveis aos edifícios e respectivos sistemas energéticos, nomeadamente caldeiras e equipamentos de ar condicionado, tanto no que respeita ao desempenho energético, como à qualidade do ar interior.

1.3.2 Decreto – Lei n.º 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)

No contexto internacional, em relação com o programa de combate às alterações climáticas, Portugal, em alteração com os compromissos da União Europeia no âmbito do Protocolo de Quioto, também assumiu responsabilidades quanto ao controlo das emissões de gases de efeito de estufa. Nesse quadro, há um consenso sobre a importância de melhorar a eficiência energética dos edifícios e de reduzir o consumo de energia e as correspondentes emissões de CO₂ do sector dos edifícios como parte do esforço de redução das emissões a envolver todos os sectores consumidores de energia.

Neste sentido que vem publicado no n.º 2 do artigo 32.º do RSECE que são de consideração prioritária obrigatória nos edifícios novos e nas grandes reabilitações, salvo demonstração de falta de viabilidade económica pelo projectista, utilizando a metodologia referida no mesmo regulamento no n.º 3 do artigo 14.º, ou por outros impedimentos devidamente justificados e aceites pela entidade licenciadora, os seguintes sistemas de energia alternativas:

- a) Sistema de colectores solares planos para produção de água quente sanitária (AQS);
- b) Sistemas de aproveitamentos de biomassa ou resíduos, quando disponíveis;
- c) Sistemas de aproveitamentos da energia geotérmica, sempre que disponível;
- d) Sistemas autónomos, combinando solar térmico, solar fotovoltaico, eólico, etc., em locais distantes da rede eléctrica pública.

Na alínea c) demonstra que consta no RSECE o aproveitamento da energia geotérmica sempre que disponível, neste sentido a utilização de “*Ground Source Heat Pumps*” está assente numa base legal.

A energia geotérmica é um recurso natural, livre, ecológico e renovável. A terra possui uma elevada inércia térmica. À medida que se penetra no solo, a temperatura aumenta aproximadamente 3º por cada 100 m. A 5 m de profundidade, a temperatura é estável a sensivelmente 15º durante todo o ano [Catálogo da LAMPOASSA].

1.4. Estrutura da Tese

1. CAPÍTULO 1 - neste capítulo fica descrito a introdução (motivação, objectivo e o enquadramento regulamentar do sistema).
2. CAPÍTULO 2 – como o trabalho é sobre a integração da GSHP nos edifícios logo, neste capítulo é abordado as questões essenciais sobre o equipamento, como: os componentes do equipamento, estado da arte, modos de funcionamento entre outros.
3. CAPÍTULO 3 – o edifício em estudo é a Residência Universitária polo – II-1, para prosseguir o estudo foi feito um levantamento de dados sobre o edifício e o seu enquadramento nos regulamentos de certificação energética.
4. CAPÍTULO 4 - o software a ser utilizado para fazer as simulações é o TRNSYS e a descrição dos módulos – Type utilizados é descrito neste capítulo com a ajuda de um conjunto de *print screen*.
5. CAPÍTULO 5 – é o capítulo em que fica parametrizado os módulos – Type descritos no capítulo 4, a análise dos resultados das simulações dinâmica de edifício e sistemas térmicas e a comparação entre GSHP e bomba de calor ar – ar.
6. CAPÍTULO 6 – na conclusão do trabalho consta a análise das vantagens e desvantagens do uso da GSHP em detrimento do uso da bomba de calor ar – ar (análise energética e custo de utilização)

CAPÍTULO 2 – “GROUND SOURCE HEAT PUMPS”

2.1. Introdução

“*Ground Source Heat Pump*” (GSHP) são equipamento reversíveis que aproveitam e transferem calor, armazenado a poucos metros da superfície da terra, permitindo a sua utilização para aquecimento de águas quentes sanitárias e climatização dos edifícios.

Nas estações frias, o calor armazenado no solo é recuperado através de um sistema de tubos subterrâneos, localizado perto da bomba de calor. Nas estações frias o processo é invertido, sendo o calor transferido e dissipado no solo.

Este sistema permite que estas unidades tenham uma elevada eficiência energética. Por exemplo, no Inverno, é mais eficiente chegar a uma temperatura confortável de 22 °C partindo de 15 °C, ao invés do ar exterior que pode chegar a temperaturas negativas.

A bomba de calor funciona a electricidade, não necessitando de outra fonte de energia como combustíveis fósseis. Assim, não liberta gases resultantes de queima, nomeadamente CO₂, tecnologia competitiva em termos de conforto e reduzido nível de ruído.

2.2. Perspectiva Histórica

A bomba de calor foi descrita por Lord Kelvin em 1853 e desenvolvido por Peter Ritter von Rittinger em 1855. Depois de experimentar com um congelador, Robert C. Webber construiu a primeira bomba de troca directa de calor da terra (fonte) no final de 1940. O projecto de sucesso do primeiro comercial foi instalado no Edifício da Commonwealth (Portland, Oregon), em 1946, e tem sido designado um “*National Historic Mechanical Engineering Landmark*” pela ASME. A tecnologia tornou-se popular na Suécia na década de 1970, e a sua aceitação foi crescendo lentamente em todo o mundo desde então. Sistema de circuito aberto dominou o mercado até o desenvolvimento de tubos de polibutileno em 1979 que tornaram os sistemas de circuito fechado economicamente viável.

Em 2010 já existia 3 5236 MW de potência instalada de *GSHP* num total de 43 países, em energia são 21 4782 TJ/ano utilizada, que se traduz em 70% do aproveitamento mundial da energia geotérmica como se mostra na Figura 1, com um factor de capacidade de 0,19 (no

modo aquecimento). O número equivalente de *GSHP* de 12 kW (típico nas habitações nos Estados Unidos e na Europa Ocidental) é aproximadamente 2,94 milhão de unidades, mais do dobro das unidades que existia em 2005.

O tamanho das unidades individuais, no entanto, varia de 5,5 kW para uso residencial a grandes unidades de 150 kW para instalações comerciais e institucionais. Maior parte das instalações ocorre na América, Europa e na China. (Lund at al., 2010)

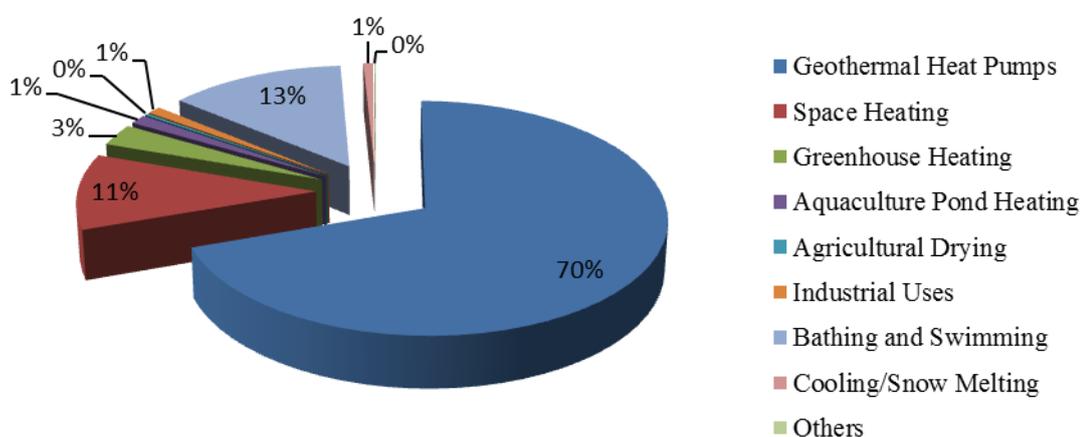


Figura 1: Distribuição mundial do aproveitamento da energia geotérmica em 2010.

2.3. Estado da Arte

Um sistema (GSHP) tem três componentes principais: uma bomba de calor, uma ligação à terra e um sistema de distribuição aquecimento/arrefecimento no interior da habitação (ver Figura 2). Estes três componentes principais, juntamente com as diferentes configurações de conexão de terra constituem uma instalação típica de GSHP, são explicados nas seções seguintes.

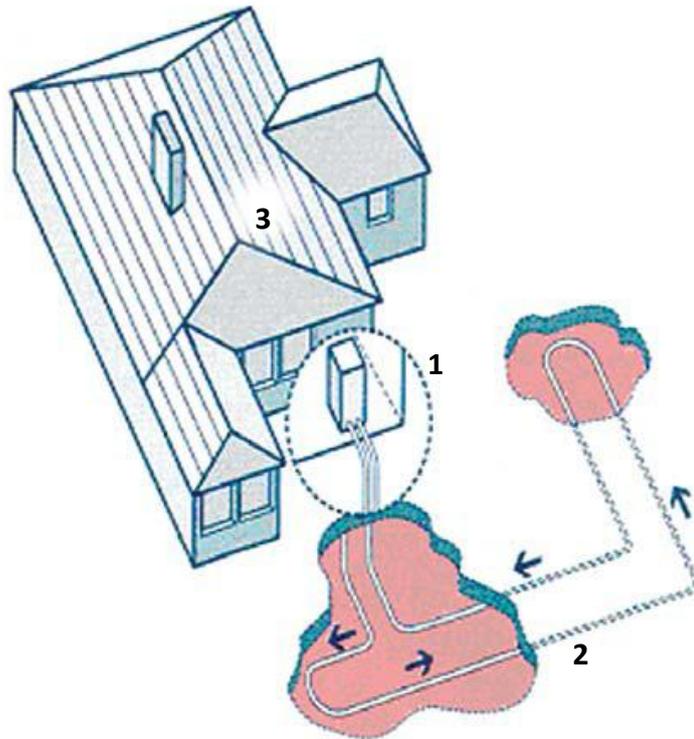


Figura 2: Os três principais componentes do sistema GSHP – 1) Bomba de Calor, 2) Ligação à Terra e 3) Sistema de Refrigeração/Aquecimento interior. [RETScreen International]

A GSHP envolve diversas tecnologias que se encontram disponíveis no mercado, para aplicações domésticas.

O critério básico para a classificação é baseada na entalpia dos fluidos geotérmicos que são os responsáveis pelo transporte do calor até a superfície. A entalpia, cuja variação é proporcional à temperatura, consiste numa boa medida da quantidade de energia térmica contida no fluido geotérmico. (Fanelli & Dickson, 2004).

- **Fonte Geotérmica de Baixa Entalpia**

Os recursos geotérmicos de baixa entalpia prestam-se geralmente à utilização directa do calor, por meio de permutadores ou de GSHP, para aquecimentos domésticos, industriais e agrícolas (estufas). A Figura 3 é um esquema representativo de um GSHP típico usado para captação da energia geotérmica em que: 1) O compressor, 2) condensador (permutador de calor), 3) válvula de expansão, 4) sondas de terra, 5) evaporador (permutador de calor), 6) válvulas de

comutação, 7) ventiloconvetor, 8) piso radiante, 9) Válvulas de comutação e 10) Permutador de arrefecimento de espaço.

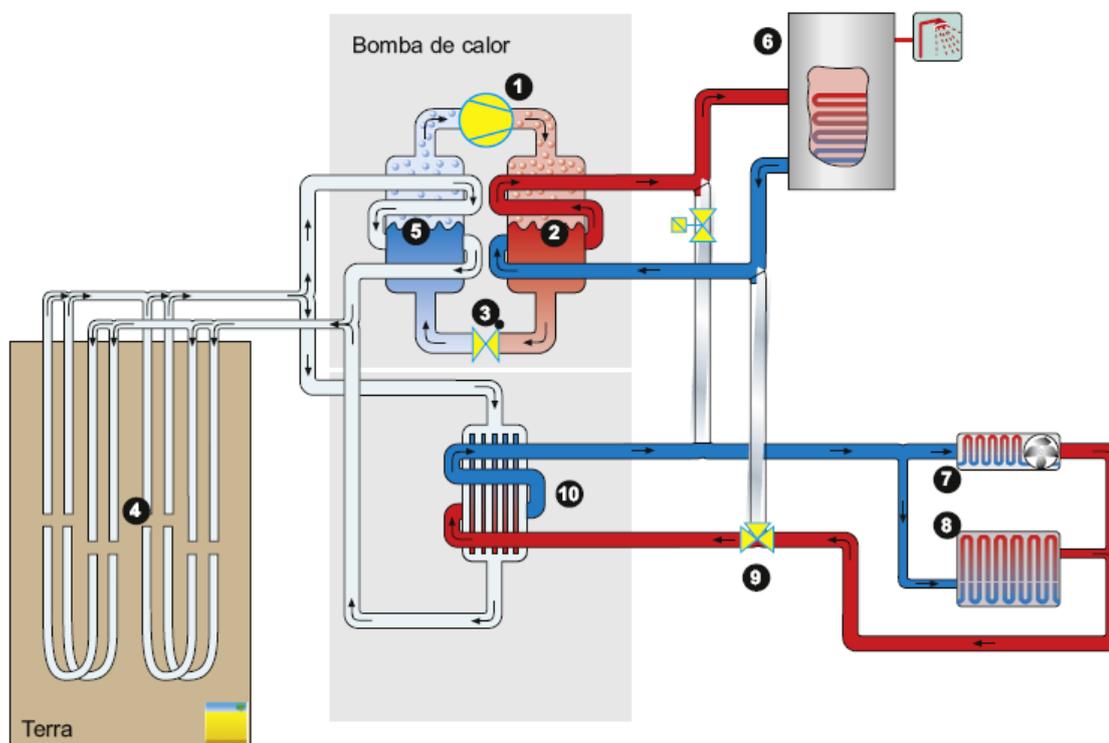


Figura 3: Circuito de arrefecimento passiva com preparação de água quente (Fonte: Dimplex).

A água quente é garantida no depósito de inércia (6) e o aquecimento/arrefecimento do espaço através ventiloconvetor (7) ou piso radiante (8). O fluido que circula no circuito terra é o R-134a.

Com o catálogo da LAMPOASSA (fornecido pela CHAMA empresa que faz instalação da GSHP) a GSHP trabalha com o desempenho que consta na Figura 4. Que como se pode constatar tanto o C.O.P como a potência térmica aumenta com o aumento da temperatura de entrada do Fluido (fluido do permutador).

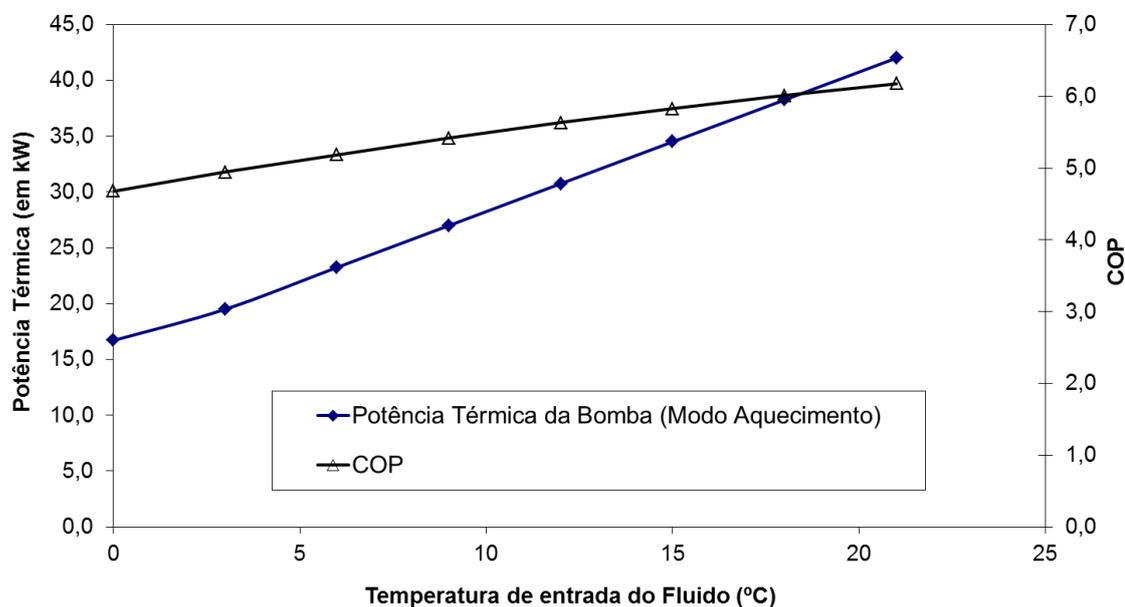


Figura 4: Desempenho da GSHP (Fonte: Catálogo da LAMPOASSA).

2.3.1. Modo de Funcionamento

O processo de conversão/transporte da energia da terra para o uso doméstico é feito por intermédio de GSHP. Consiste em um equipamento responsável para a captação e transferência de calor para o aquecimento/arrefecimento, com ligação à terra num ciclo fechado. O tipo mais comum de bomba de calor usado com sistemas GSHP é ar-água, unidade que variam em tamanho de 3,5 kW a 105 kW de capacidade de refrigeração [Dimplex (fabricante)]. A ar-água é uma designação que indica que o fluido que transporta calor da terra é a água ou uma mistura água/anticongelante e que o sistema de distribuição de calor no interior do edifício conta com ar quente ou frio. Na Figura 3 está ilustrado um GSHP com todos componentes. Na secção seguinte está descrito um dos modos de funcionamento de GSHP proposto pela Dimplex.

- **Arrefecimento passivo com preparação de água quente em paralela**

Com base na Figura 3:

- 1) O compressor leva o refrigerante, que circula num circuito fechado, a um nível de temperatura mais elevado. Deste modo, sobe a temperatura do refrigerante em estado gasoso.

- 2) No condensador (permutador de calor) o calor é transportado para a água de aquecimento. O refrigerante arrefece e condensa-se.
- 3) Na válvula de expansão o refrigerante é expandido (queda de pressão) e continua assim a arrefecer.
- 4) As sondas terras aproveitam o nível de temperatura constante das camadas de terra mais profundas, como fonte de calor para a preparação de água quente e como fonte de frio para o arrefecimento passivo.
- 5) No evaporador (permutador de calor) é transportada a energia ambiental aceite na sonda terra para um refrigerante. O refrigerante aquece e evapora-se.
- 6) Para o funcionamento paralelo da preparação de água quente central e arrefecimento passivo, ambos os sistemas são separados hidraulicamente por meio de válvulas de comutação.
- 7) No ventiloconvector passa água de aquecimento arrefecida e extrai calor ao ar do espaço (arrefecimento dinâmico).
- 8) Por sistema de tubos colocado no interior do chão, da parede ou tecto passa água arrefecida, arrefecendo assim a superfície do componente (arrefecimento estável).
- 9) Válvulas de comutação conduzem a água quente por meio do permutador de calor passivo e arrefece-o.
- 10) Por activação da bomba de circulação geotérmica no modo arrefecer, a energia da água de aquecido é transportada para o permutador e é arrefecido, consequentemente a energia é transferida para circuito do fluido terra e extraído para o interior da terra.

2.3.2. Ligação Terra

A ligação à terra é onde o calor do solo se transfere para o fluido que circula nos tubos (de polietileno) enterrados. Para além do solo como fonte de calor, também se usa águas subterradas ou mesmo águas superficiais. Uma das formas mais comum de ligação terra é enterrar tubos numa vala horizontal ou num poço vertical, alternativamente pode-se submergir-se nos lagos.

A nomenclatura seguinte foi adoptada por *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) para distinguir os vários tipos sistemas de ligação terra existente:

- “*Ground - Coupled Heat Pumps*” (GCHPs) – usa a terra como fonte de calor, pode-se usar permutadores horizontais como verticais,
- “*Groundwater Heat Pumps*” (GWHPs) – usa águas subterrâneos (aquífero) como fonte de calor e,
- “*Surface Water Heat Pumps*” (SWHPs) – usa águas superficiais (lagos) como fonte de calor.

“*Ground - Coupled Heat Pumps*” (GCHPs): no sistema GCHP, o fluido que circula nos tubos enterrados encontram-se num ciclo fechado: nunca saem do sistema, mas circulam entre a bomba e o permutador de terra. O fluido que circula é a mistura entre água e uma solução anticongelante. O permutador de terra pode ser, o vertical ou o horizontal.

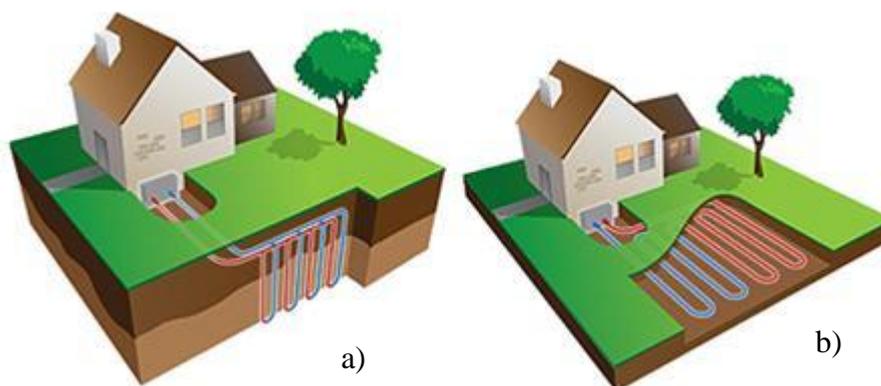


Figura 5: Ground-Coupled Heat Pump a) Vertical e b) Horizontal.

Os permutadores verticais (Figura 5, a)) são muito eficientes, requer menos tubos, custos de instalação é elevado (equipamento muito sofisticado usado nas perfurações) e apresentam menos flutuações de temperatura devido à profundidade a que são instaladas (45 a 150 m), enquanto as horizontais (Figura 5, b)) tem o custo de instalação menor, são mais adequadas para pequenas aplicações, é preciso maior área de terreno para a sua instalação e encontram-se na maioria das vezes a 2 metros de profundidade, logo estão sujeitas a maiores flutuações de temperatura.

Normalmente os poços (onde são instalados os permutadores verticais) medem de 100 a 150 mm de raio, por dentro possuem tubos em U geralmente de **PE** (polietileno) **de alta densidade** com diâmetros **DN 32** e **DN 40**. Para facilitar a sua introdução nos furos, estes circuitos são fixos com pesos de 15-20 Kg (Figura 6).

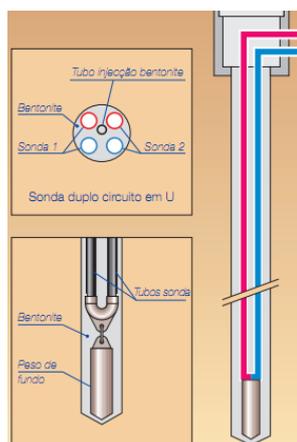


Figura 6: Esquema do permutador em U.

2.3.3. Sistema de Distribuição para Aquecimento /Refrigeração

O sistema de aquecimento/arrefecimento fornece a distribuição de calor de GSHP para o edifício. Aquecimento e arrefecimento em um sistema de distribuição GSHP é geralmente o mesmo, como nos sistemas convencionais. No entanto, grandes instalações podem usar várias GSHP, talvez um para cada zona do edifício, ligando-as a um circuito de distribuição comum. Os vários tipos de sistemas de distribuição de ar que podem ser usados estão bem documentados no RSECE, e consistem principalmente em condutas de ar, difusores, sistemas de abastecimento de ar fresco e componentes de controlo.

2.4. Vantagens e Desvantagens

❖ Vantagens

Eficiência energética – Quanto maior for a diferença de temperatura entre o meio a aquecer e o meio exterior, maior será a eficiência do sistema. Esta eficiência é medida pelo coeficiente de desempenho, designado por COP, que expressa a quantidade de energia que é cedida ao consumo por cada unidade de energia eléctrica consumida por uma bomba de calor. O COP médio das GSHP situa-se entre 3,5 e 5, em contrapartida as bombas de calor convencionais

mais eficientes possuem um COP que se situa entre 2,2 para $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 4,2 para $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [*The Green Building site*], ou seja uma bomba de calor geotérmica permite uma redução média situada entre 25 % a 60 % do consumo de energia eléctrica, para a mesma quantidade de calor fornecida.

Versatilidade – oferece diversas soluções técnicas que satisfazem as necessidades de calor/frio de espaços ou de água quente sanitária. A produção de frio e de calor é centralizada, com total integração das unidades exteriores convencionais num espaço reduzido, e sem limite de potência (sistema modular).

Reduzida poluição sonora – elimina por completo os ruídos desagradáveis acusados pelos ventiladores exteriores das unidades convencionais de condensação.

Eliminação da poluição visual – as baterias de condensadoras colocadas nas fachadas, terraços e telhados dos edifícios são substituídos por um sistema de captação totalmente enterrado, ou seja invisível, sendo a bomba de calor acondicionada num reduzido espaço, em zona técnica, pelo que fora do campo de visão dos utilizadores.

Maior longevidade ou durabilidade – o tempo de vida útil das bombas de calor geotérmicas é superior a 15 anos, e das captações subterrâneas oscila entre os 40 a 50 anos.

Requer menores trabalhos de manutenção – possui menos partes mecânicas, e reduz a acumulação de sujidade nos elementos filtrantes, serpentinas, e ventiladores do sistema.

Redução da poluição ambiental – permite mitigar as emissões de CO_2 da empresa para a atmosfera dada a sua maior eficiência, gera menor quantidade de resíduos industriais após abate, e reduz o risco de poluição dos solos por derrame de substâncias químicas não biodegradáveis.

Redução da potência instalada – a sua instalação constitui uma eficaz medida de gestão de compra de energia eléctrica, ao permitir reduzir a potência solicitada à rede, sobretudo nas horas de ponta, onde se verificam os períodos de maior consumo em climatização. O encargo com a factura eléctrica é assim reduzido, quer ao nível da parcela de consumo correspondente às horas de ponta, quer ao nível da potência contratada. [ADENE, 2008]

“Possibilidade de conjugação com um sistema de aquecimento solar (todos os modelos tem esta ligação de série) para uma maior eficiência e redução no consumo;

Possibilidade de conjugar um módulo GSM¹ para controlo remoto de todo o sistema ou ainda através da internet. “ [Fonte, LAMPOASSA]

❖ Desvantagens

Os anticongelantes (R-134a) usados nas zonas mais frias são poluentes: apesar de terem uma baixa toxicidade, alguns produzem CFC²s e HCFC³s,

Este sistema tem um custo inicial elevado, e a reduzida manutenção da GSHP (que por estar situada dentro de um edifício não está exposta ao mau tempo e a vandalismo), é contrabalançada pelo elevado custo de manutenção das tubagens (onde a água causa corrosão e depósitos minerais).

2.1. Em Portugal

A GSHP em Portugal encontra na sua fase embrionária, dado que ainda existem poucas ofertas no mercado português, estima-se que existe 24 instalações em 12 kW, um COP de 3,5 e 1,5 mil horas de operação que corresponde a uma potência instalada de 0,3 MWt e 1,1 TJ / ano. Isto dá um total para o país de 28,1 MWt e 386,4 TJ / ano (Lund et al., 2010).

¹ Um tipo de sistema usado para controlo remoto.

² Clorofluorocarbonetos

³ Hidrofluorocarbonetos

CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO EM ESTUDO

3.1. Condições do Edifício Regulamentadas

Condições ambientais exteriores

De acordo com o artigo n.º 18 ANEXO III do RCCTE, Portugal é dividido em três zonas climáticas de Inverno (I1, I2 e I3) e em três zonas climáticas de Verão (V1, V2 e V3). A delimitação dessas zonas vem na tabela. As zonas de verão divididas em região Norte e região Sul. A região Sul abrange toda a área a sul do rio Tejo e ainda os seguintes conselhos dos distritos de Lisboa e Santarém: Lisboa, Oeiras, Cascais, Amadora, Loures, Odivelas, Vila Franca de Xira, Azambuja, Cartaxo e Santarém.

Tabela 1: Zona Climática (Fonte: RCCTE).

Conselho	Zona climática de inverno	Número de graus-dias (GD)(°C)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de verão	Temperatura externa do projecto (°C)	Amplitude Térmica
Cinfães	I ₃	2350	7	V ₂	33	13
Coimbra	I ₁	1 460	6	V ₂	33	13
Condeixa-a-Nova	I ₂	1560	6	V ₂	32	13

Como o edifício em estudo situa-se em Coimbra, logo as zonas climáticas de Inverno é I₁ e de Verão é V₂.

Condições interiores de referência

No artigo n.º 14 do RCCTE, as condições ambientais de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20 °C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25 °C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento.

A taxa de referência para a renovação do ar, para garantia da qualidade do ar interior, é de 0,6 renovações por hora, devendo as soluções construtivas adoptadas para o edifício ou fracção autónoma, dotados ou não de sistemas mecânicos de ventilação, garantir a satisfação desse valor sob condições médias de funcionamento.

No ponto 1 do artigo 4.º do RSECE está exposto no requisito das exigências para a velocidade do ar interior, que não pode exceder os 0,2 m/s e que quaisquer desequilíbrios radioactivos térmicos devem ser devidamente compensada.

Por outro lado, o projecto em estudo terá que respeitar os requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente de edifícios, que é imposto pelo RCCTE, n.º 1 do Anexo IX. Os requisitos mínimos para as zonas climáticas de Inverno terão como coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos os valores da Tabela 2 cuja unidade é [W/ (m²°C)]:

Tabela 2: coeficiente de transmissão térmica (U) superficiais máxima admissíveis de elementos opacos.

Elemento da envolvente	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elemento exteriores em zona corrente			
Zonas opacas verticais	1,8	1,6	1,45
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,9
Elementos interiores em zona corrente			
Zonas opacas verticais	2	2	1,9
Zonas opacas horizontais	1,65	1,3	1,2

Tratando de um edifício existente, para o cálculo da envolvente só se leva em conta as zonas correntes com o seguinte U:

$$U = U_c \cdot 1,35 \quad (1)$$

Em que:

U - Coeficiente de transmissão térmica máxima da parede [W/(m² °C)].

U_c- Coeficiente de transmissão térmica da zona corrente [W/ (m² °C)].

3.2. Caso de Estudo

O edifício em estudo é a Residência Universitária polo-II-1, fica situado na Rua Miguel Bombarda perto do edifício central da FCTUC, com uma área de 172 m² de pavimento que desenvolve em sete pisos iguais. No piso 0 as fachadas orientadas para Norte, Sul e Oeste são subterradas também no piso 1 as fachadas orientadas a Norte e Oeste. Cada piso dispõe de seis quartos (cada um ocupado por duas pessoas), três hall (cada um com duas casas de banhos), uma cozinha e uma circulação (que engloba elevador, corredor, átrio de entrada e caixa de escada).

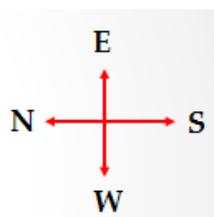
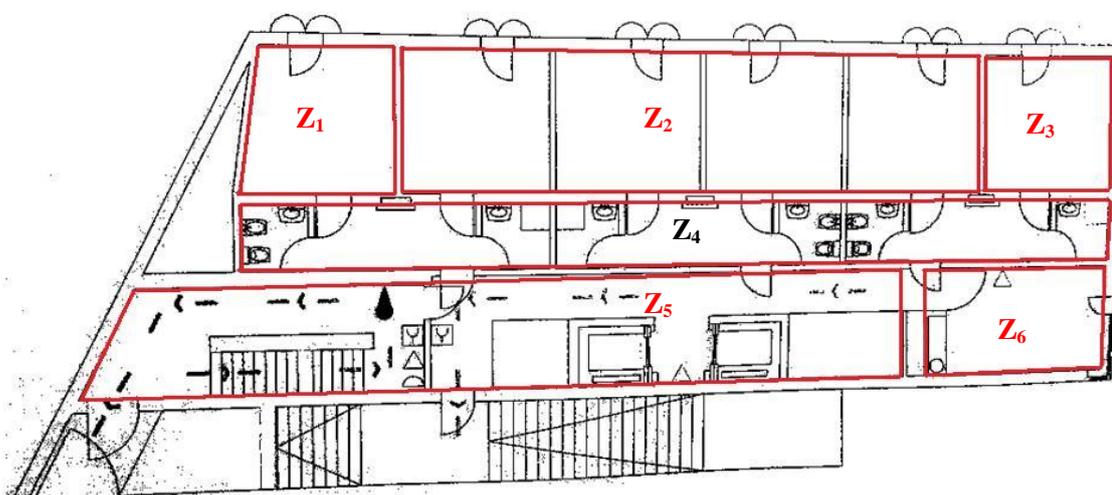


Figura 7: Projecto do piso e a orientação das fachadas, devidas em zonas.

Para a introdução do edifício no software TRNSYS, o edifício foi dividido em zonas. Assim, cada piso ficou dividido em 6 zonas (Figura 7), todas com a mesma dimensão e tipologia (quartos, hall (casas de banho), circulação (corredores, caixa de escadas e elevador) e cozinha).

Zona_1: 1 quarto com fachada externa orientada para Norte e Este,

Zona_2: 4 quartos com fachada externa orientada para Este,

Zona_3: 1 quarto com fachada externa orientada para Este e Sul,

Zona_4: zona das casas de banho (hall),

Zona_5: zona da circulação, elevador e escadas,

Zona_6: cozinha.

Vai no Anexo A as dimensões das zonas.

3.2.1. Soluções Construtivas

O edifício em estudo é um edifício já existente, devido a ausência de matriz da construção foi improvisado as soluções construtivas com ajuda do ITE50 (Informação Técnica para Edifícios). As soluções adoptadas são para **paredes externas, paredes internas, pavimento e lajes**. As **janelas** (envidraçados) foram definidas com ajuda do software *Window 6.3*.

▪ Paredes

Como já antes referido, com base no ITE50 foram definidos 4 tipos de paredes: PE_E: parede com revestimento de madeira orientado para Este, PE_NSW: parede com revestimento de calcário, orientado para Norte, Sul e Oeste, PI_GERAL: parede das divisões interiores e PS1 - Paredes subterrados. O cálculo do coeficiente de transmissão de calor (U ($W/m^2\text{°C}$)) no programa é feito com base nas seguintes equações:

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}} [W/(m^2\text{°C})] \quad (2)$$

Onde:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} [(m^2\text{°C})/W] \quad (3)$$

E que:

R_j - Resistência térmica da camada j [($m^2\text{°C}$)/W].

$R_{si} = 0,13$ e $R_{se} = 0,04$ - Resistências térmicas superficiais interior e exterior, respectivamente $[(m^2\text{°C})/W]$.

λ_j - Condutibilidade térmica do material que constitui a camada j $[W/(m\text{°C})]$.

d_j - Espessura da camada j $[m]$.

As resistências térmicas superficiais são referidas no *Anexo VII*, RCCTE.

Constituição da parede externa PE (Figura 8) orientada para Este:

Reboco, Tijolo 11, Caixa-de-ar, Tijolo 11, Argamassa leve e Madeira. A parede externa orientada para Norte, Sul e Oeste tem a mesma constituição tendo como única diferença o revestimento exterior calcário em vez de madeira.

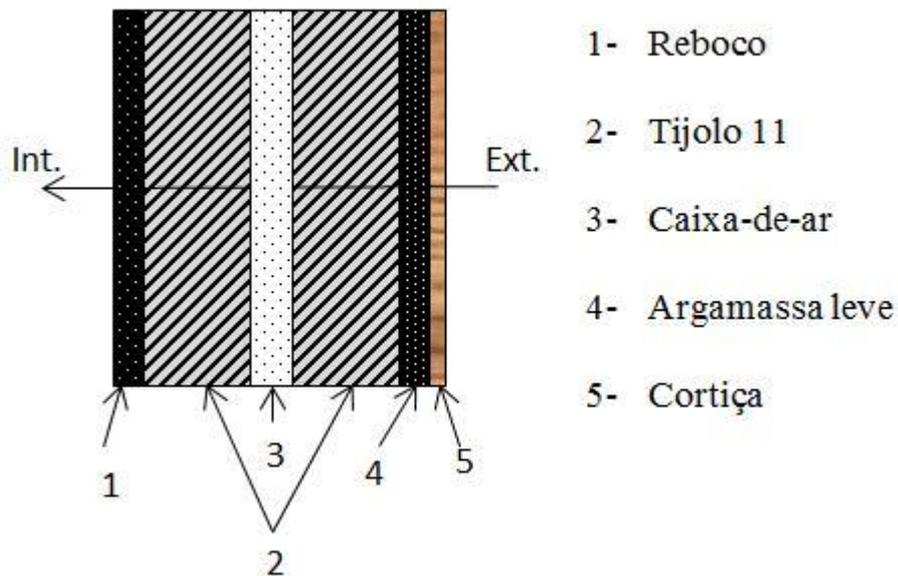


Figura 8: Secção da parede exterior PE.

Da mesma forma que as paredes têm-se a constituição da laje da cobertura (Laje_1): Ladrilho, XPS, Betonilha, Betão armado e Reboco.

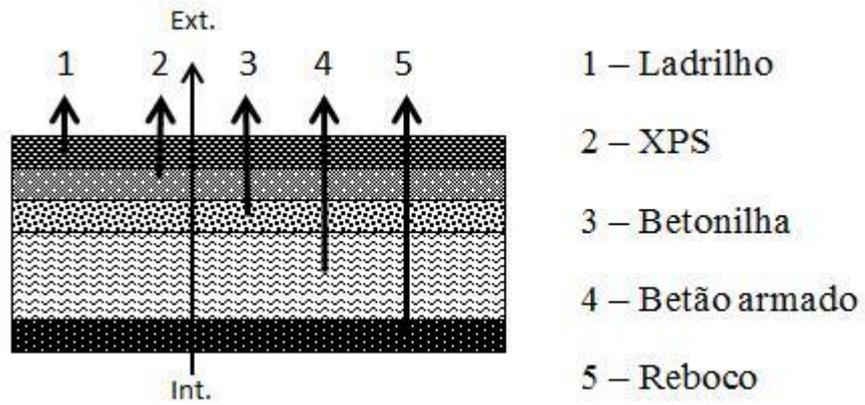


Figura 9: Secção da Laje 1 (laje da cobertura).

No Anexo A se encontram as especificações das outras paredes, laje e pavimento.

CAPITULO 4 – SOFTWARE TRNSYS

4.1. Introdução ao TRNSYS

A primeira versão pública do software TRNSYS (*TRaNsient SYstems Simulation*) foi desenvolvido em 1975 para o estudo do sistema solar, mas hoje é uma ferramenta poderosa que permite a resolução temporária de qualquer sistema.

O TRNSYS é um solver de equações diferenciais algébricas e especialmente concebido para simulação transitório, que incorpora uma biblioteca com os mais comuns dos sistemas térmicas. O TRNSYS adopta uma estrutura modular para resolver sistemas de componentes, onde cada componente é descrito por uma sub-rotina na nomenclatura usada de nome TRNSYS TYPE - módulo [Figura 10]. Esta técnica modular permite analisar todo um sistema como a soma de componentes individuais ou sistemas e a interligação entre eles. Do ponto de vista prático, são resoluções de pequenos problemas, em vez de um problema maior.



Figura 10: Exemplos de módulos - condições ambientais (*Type109-TMY2*) ligado a Edifício (*Type56a*).

Os dados que caracterizam cada módulo dependem do componente a que se refere o módulo.



Figura 11: Módulo que representa GSHP no programa TRNSYS.

Dado que os módulos têm que ser ligados entre si, fazendo com que um conjunto de módulos interligados formem um sistema, os parâmetros referentes ao funcionamento do equipamento estão todos disponíveis a serem analisados e alterados de acordo com o pretendido como mostra a Figura 12.

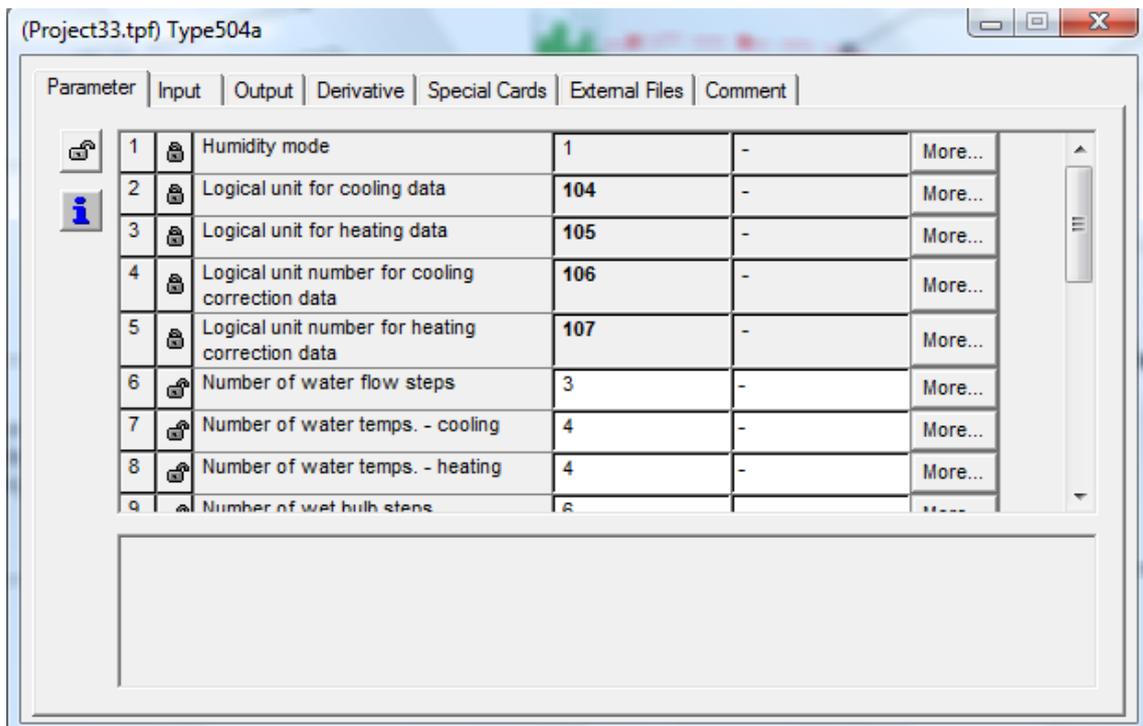


Figura 12: Interface com os parâmetros do módulo - *Type504a*.

As simulações são em regime transitório e podem ser realizadas em intervalos de tempo especificados pelo utilizador, de várias horas a segundos, dependendo do tipo de processo que se pretende estudar. A modularidade do programa permite que o utilizador tenha muitos elementos (bombas, refrigeradores, colectores solares, etc.), se necessário, em qualquer configuração.

Usando uma interface gráfica baseada em ícones, o utilizador define directamente os componentes do seu sistema e liga-los. Através desta interface gráfica tem a capacidade de definir os parâmetros e as variáveis de entrada (*input* da Figura 12) de cada um dos componentes do sistema e criar o arquivo de entrada para o TRNSYS executável para executar a simulação.

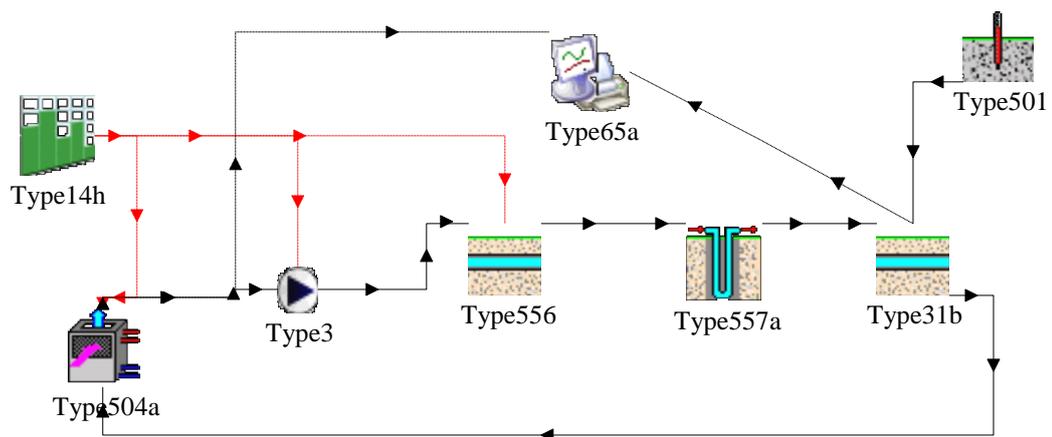


Figura 13: Esquema típico de GSHP com os módulos básicos do sistema.

Na Figura 13 estão representados alguns dos módulos que normalmente são utilizados no sistema GSHP no TRNSYS, *Type14h* - Time Dependent Forcing Function, *Type65a* - Online graphical plotter with output file, *Type501* - Perfil de temperatura no solo, *Type3* - Bomba de circulação, *Type504a* - Modelo da bomba de calor a água, *Type556* - Permutador de calor horizontal no solo, *Type557a* - Permutador de calor vertical no solo de tubos em U e *Type31b* - Modelo simples de tubos enterrados.

A biblioteca padrão inclui componentes do TRNSYS encontrados em sistemas comuns de energia térmica (de equipamentos de climatização de edifícios, dos controladores e sistemas de controle de colectores solares) e sub-rotinas que permitem processar os dados dos componentes e outras funções do tempo de transição. O TRNSYS também fornece módulos que permitem o processamento e formatação dos resultados das simulações na saída. O utilizador deve criar um sistema para simular um arquivo de entrada para o software TRNSYS, que é uma descrição dos componentes que compõem o sistema e seus interconectores.

4.2. Características do Edifício no TRNSYS

Na Figura 14 estão representados as zonas introduzidas no TRNSYS e as características da envolvente de cada zona.



Figura 14: Interface gráfica para introdução das zonas e a sua envolvente no TRNSYS.

Ao abrir uma zona podemos introduzir todos os dados referentes a sua envolvente externa (paredes, janelas e lajes/pavimento) e dados referentes ao interior (desde o volume, infiltrações, ventilação, ...). Na interface do programa representada na Figura 14 estão os principais itens referentes ao condicionamento do espaço (*frame - Regime Data*).

4.1.1. Envolvente Exterior

A envolvente exterior é muito importante na definição das características do projecto do edifício. Sendo assim o software TRNSYS possibilita a importação de vários tipos de ficheiros com os dados meteorológicos, como por exemplo: TMY (*Typical Meteorology Year*) e TMY2 (*Typical Meteorology Year2*). Todos esses ficheiros podem ser importados para o módulo (*Type109 - TMY2*) (Figura 10), devidamente seleccionada de acordo com a localização do edifício em estudo, Cidade e País.

A garantia de que um edifício garante conforto aos seus ocupantes e um bom desempenho energético está enormemente dependente das condições de fronteiras delimitadas no projecto. Neste sentido o software TRNSYS possui um anexo com muito das matérias usados na construção civil para definir as soluções construtivas mais fiáveis para projectar e simular as cargas térmicas de um edifício. A metodologia do software TRNSYS permite adicionar a

parede (Figura 15) em camadas ou seja para introduzir uma parede adiciona-se todas as camadas que constituem a parede e as suas respectivas espessuras. O cálculo do U [W/m^2K] (Figura 12) da parede no programa é equacionado por TESS (*Thermal Energy System Specialists of Madison, Wisconsin*) de forma automático no programa.

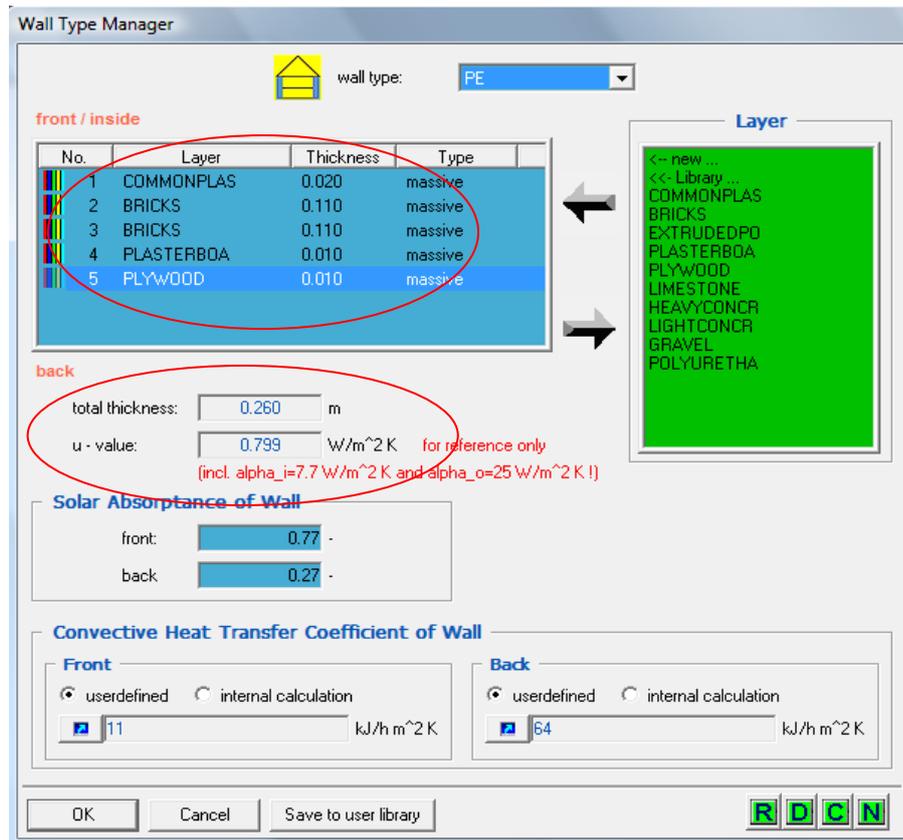


Figura 15: Constituição da parede e o respectivo coeficiente de transferência de calor.

4.1.2. Condições Interiores

De entre muitas outras características do edifício que se pode editar, temos os ganhos internos (Figura 16) (ocupação, equipamentos, iluminação e outros ganhos). Todos esses ganhos podem ser contabilizados com ajuda de um perfil de uso ou ocupação.

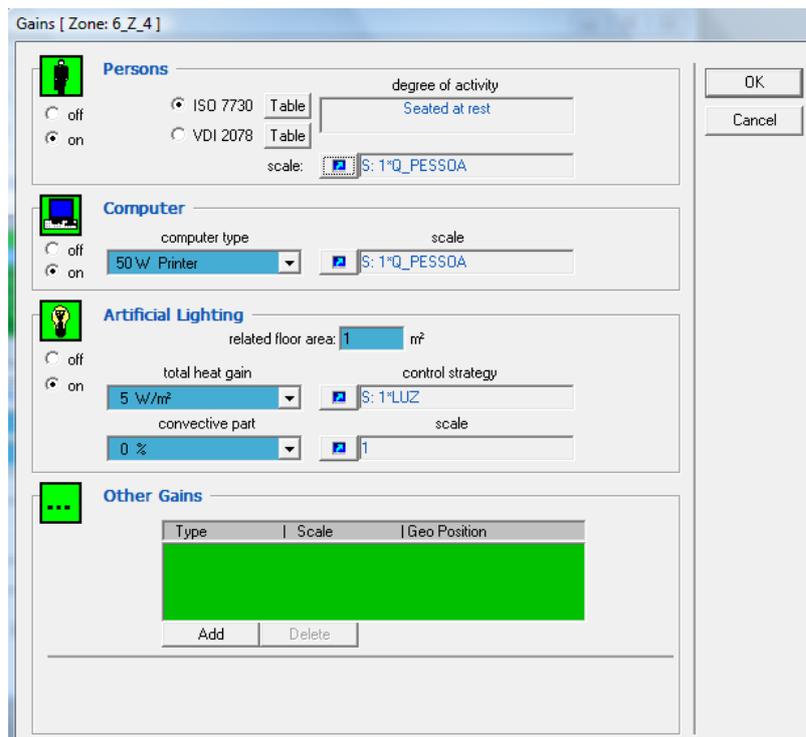


Figura 16: Interface onde se pode introduzir os ganhos internos do edifício.

Os ganhos internos são muito importantes na determinação das cargas térmicas do edifício, dado que uma pessoa, uma lâmpada acesa ou qualquer tipo de electrodoméstico ligado liberta calor que influencia a temperatura do espaço.

Neste programa, os ganhos internos serão variados durante todo o dia com base num cronograma ou perfil (Figura 17) pré-definido. Este perfil é introduzido no programa através do componente TRNSYS – *Forcing Functions*.

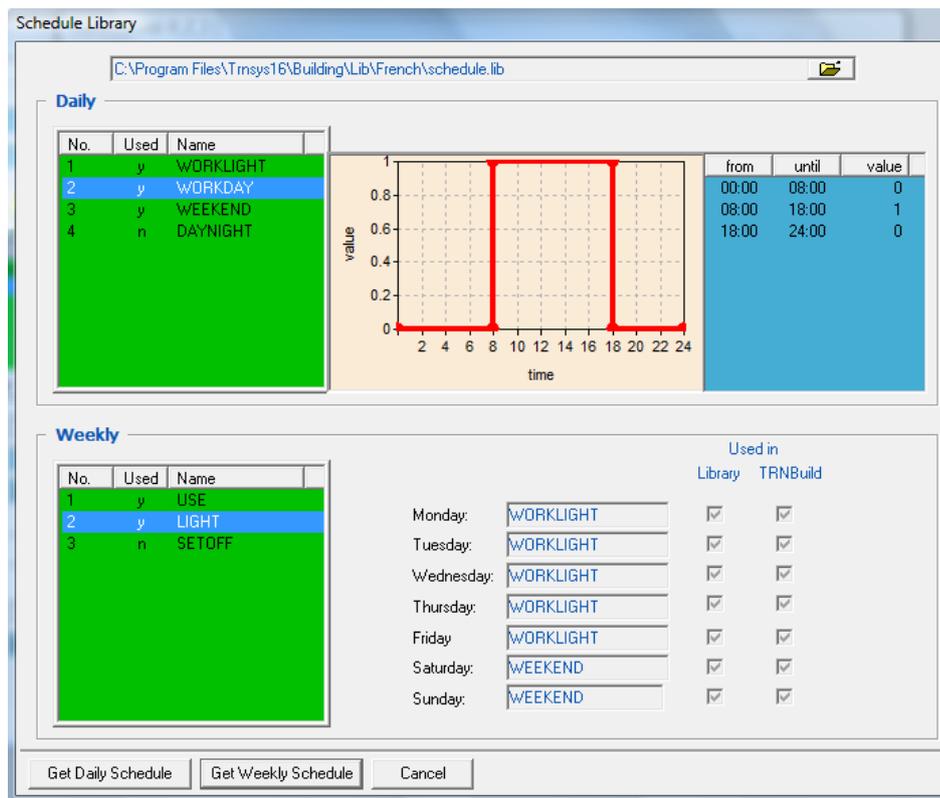


Figura 17: Perfil de ocupação de um escritório para um dia de trabalho.

4.2. Parametrização do Sistema GSHP no TRNSYS

O projecto do sistema GSHP no TRNSYS inclui os módulos da Figura 13, interligadas uns com os outros pelas suas entradas e saídas de dados. Editando os parâmetros de acordo com as condições do nosso projecto pode-se idealizar um sistema de acordo com a necessidade de águas quentes sanitárias e de climatização do edifício.

Para melhor definir as condições ideais do sistema é preciso saber as necessidades de potência (de aquecimento e arrefecimento), a temperatura ambiente, a temperatura da água quente sanitária, a temperatura do espaço, a humidade relativa do ar interior e ar exterior, caudal de águas quentes sanitárias etc.

4.2.1. Ground Source Heat Pumps

No modo aquecimento o fluido que circula nos permutadores absorve calor e no modo arrefecimento o fluido rejeita calor (reversível), tanto a rejeição como absorção é no solo. É de realçar que possuem serpentinas opcionais para aquecer água.

O modelo da Figura 11 tem um arrefecedor ligado a uma corrente de fluidos secundários. No modo arrefecimento, o arrefecedor minimiza o fluxo do líquido e parte da carga de rejeição de calor. No entanto, no modo arrefecimento, o arrefecedor necessita do fluxo líquido para absorver mais energia do que é apenas necessário para o aquecimento do espaço.

Os dados relativamente à potência são baseados numa base de dados editado pelo simulador, baseado na temperatura, fluxo de água e fluxo de ar na entrada de GSHP. Os ficheiros são quatro: um contendo dados de desempenho de refrigeração, um contendo dados de desempenho de aquecimento e mais dois contendo dados de correcções, uma de refrigeração e outra de aquecimento. Estes ficheiros contêm dados que servem de padrão, para adaptar a necessidade do projecto é preciso introduzir um factor que faz com que o modelo tenha potências igual ao desejado.

4.2.2. Permutador de Calor no Solo (*Ground Loop*)

Os componentes do sistema GSHP que fica subterrado e interage termicamente com o solo são os modelos de permutador de tubos da Figura 13 (módulos 557a, 556 e 31b). Como evidencia a Figura 13 quase todos os permutadores de solo incluem uma bomba de circulação (módulo 3) que só se liga quando a GSHP estiver ligada.

❖ Módulo 557 – permutador vertical

Os permutadores de calor vertical disponibilizados no programa são os módulos 557 (a, b, c e d) todos os modelos são de tubos em U (Figura 18).

Durante a instalação dos circuitos, o espaço que existe entre as paredes dos furos e os tubos dos circuitos é preenchido com uma suspensão à base de cimento e substâncias inertes.

Os algoritmos de modelação foram desenvolvidos pelo *Department of Mathematical Physics* na *University of Lund*, na Suécia e é considerado o estado-da-arte em simulações dinâmicas de permutadores de calor no solo.

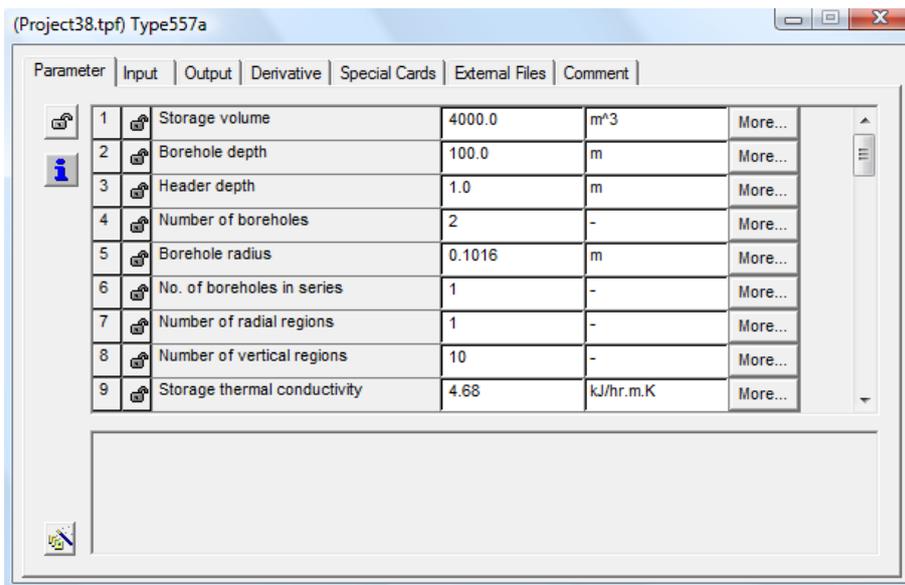


Figura 18: A interface no TRNSYS do permutador em U e a forma do tubo.

❖ Módulo 556 – permutador horizontal

O módulo 556 (Figura 13) representa o permutador de calor horizontal (tubos de polietileno enterrados no solo). Da mesma forma que o módulo 557 permite absorver/rejeitar calor no solo.

Na Figura 19 está representado a interface do módulo 556 onde se pode alterar os parâmetros de acordo com o que se pretende.

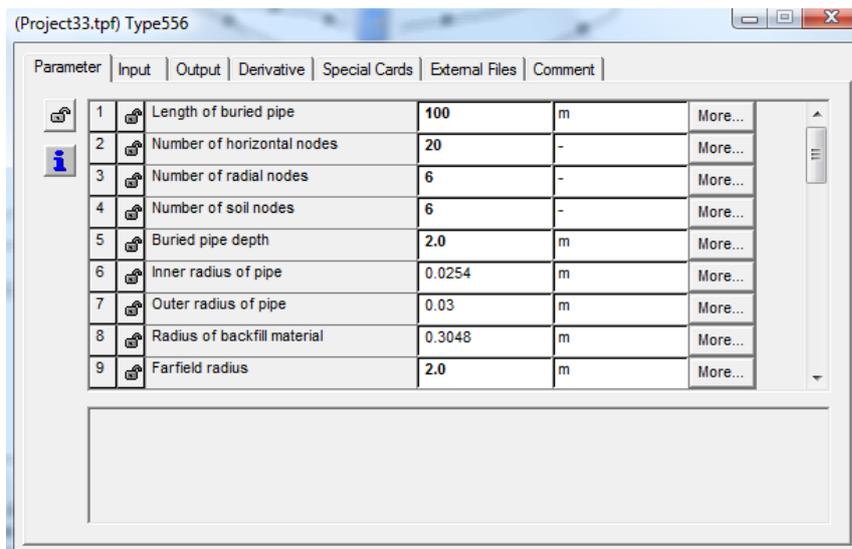


Figura 19: Interface dos parâmetros do módulo 556 no TRNSYS.

O modelo é baseado no trabalho feito por John Giardina no *Solar Energy Lab at the University of Wisconsin*.

❖ **Módulo 31b - Tubo simples enterrado**

Este modelo de permutador de calor horizontal é simples e na maioria das vezes é usado para fazer a ligação a entrada da GSHP, e também podemos obter o perfil de temperatura no interior do solo. Tal como o módulo 556, o módulo 31b (Figura 13) foi desenvolvida no *Solar Energy Lab at the University of Wisconsin* e possui o seu respectivo interface onde se pode fazer alguns estudos paramétricos.

❖ **Módulo 14h – perfil de funcionamento**

O modelo representado no módulo 14h é o perfil que dita as horas em que o sistema liga e desliga. O tempo que a bomba liga e desliga fica melhor esclarecido na secção do controlador.

❖ **Módulo 501 – perfil da temperatura no solo**

Este módulo funciona como um sensor, onde podemos saber o perfil da temperatura na posição vertical no interior do solo através da temperatura média anual da superfície. Está representada na Figura 13 (Type 501). O modelo foi baseado no trabalho de Kasuda [Anexo D].

Todos os componentes da GSHP foram desenvolvidos por engenheiros consultores especialistas em modelação e análise de sistemas de energia inovadores para edifícios. Esses engenheiros fazem parte da TESS (*Thermal Energy System Specialists*).

CAPITULO 5 – SIMULAÇÃO DINÂMICA

A simulação dinâmica de edifícios tem como objectivo principal prever o comportamento térmico de um edifício recorrendo a software de simulação multizona. Através de uma simulação detalhada e com base nos valores característicos dos parâmetros regulamentados para um edifício, pode-se projectar um conjunto de soluções com vista a garantir o conforto aos seus ocupantes.

5.1. Modelo do Sistema

A modelação do edifício e de sistema consiste em conjugar um conjunto de dados externos que compõem o projecto em estudo, a fim de obter um modelo mais aproximado possível do real. Para isso é necessário conhecer em detalhe as características do projecto, proceder um estudo paramétrico cauteloso e conhecer bem o software a utilizar. Tudo, para garantir que os resultados da simulação têm significado real.

5.1.1. Modelação do Edifício

As principais características do envolvente externa do edifício abordadas no TRNSYS são:

- **As paredes**

De acordo com as soluções construtivas anteriormente apresentadas, foram introduzidas no TRNSYS quatro tipos de paredes:

PE – com uma espessura de 0,26 m e $U = 0,779 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$,

PE_NSW – com uma espessura de 0,26 m e $U = 0,853 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$,

PI_GERAL – com espessura de 0,15 m e $U = 1,381 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$ e

PS1 – com espessura de 0,26 e $U = 0,56 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$.

A espessura das paredes corresponde as espessuras definidas no edifício.

De acordo com o ITE 54 o U das paredes de um edifício existente é aceite se a condição da equação for respeitada:

$$U_{\text{parede}} \leq U = U_c \cdot 1,35 \quad (4)$$

Em que:

U – coeficiente de transmissão térmica normalizado [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],

U_{parede} – coeficiente de transmissão térmica calculada da parede [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],

U_c – coeficiente de transmissão térmica da zona corrente (calculado) [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], o valor da Tabela 2, $U_c = 1,8$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

$$U = 1,8 \cdot 1,35 = 2,43 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

$$PE - U = 0,779 \leq 2,43$$

Logo, todas as paredes externas (PE, PE_NSW e PS1) respeitam a condição da equação (2).

- **Lajes**

As lajes introduzidas no TRNSYS são dois e o pavimento (chão do piso zero). As lajes intermédias (Laje_2) são todas iguais e a laje da cobertura (Laje_1).

Laje_1 – possui uma espessura de 0,39 m e $U = 0,332$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],

Laje_2 – possui uma espessura de 0,24 m e $U = 2,488$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

PV1 – possui uma espessura de 0,23 m e $U = 1,323$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], sendo a superfície externa se encontra em contacto com o solo. Para este tipo de pavimento define-se a temperatura da superfície em contacto com o solo, que pode ser com um perfil ou com um valor constante, neste caso o valor assumido é constante ($T = 15$ °C).

Da mesma forma que as paredes para as lajes também a equação [4] têm que verificar. Segundo a Tabela 2, $U_{\text{lajes}} = 1,25$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

$$U = 1,25 * 1,35 = 1,69 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

$$\text{Laje}_1 - U = 0,332 \leq 1,69$$

Para a Laje_1 e PV1 verifica-se a equação, mas já para a Laje_2 não, porque é a laje intermédia e serve de fronteira entre espaços à mesma temperatura logo tem pouca influência na carga térmica do edifício.

Todas as superfícies internas são pintadas de branca, de acordo com a ajuda do TRNSYS a absorptância da radiação solar da superfície interna é de 0,33. Para a superfície externa revestido de cortiça é de 0,27 e para superfície revestido de calcário (acinzentado) a absorptância é de 0,4.

- **Janelas**

A definição das janelas no programa teve que ser através do software *WINDOW 6.3*, que permite reportar ficheiros no formato que o TRNSYS consegue ler (*DOE-2*).

Trata-se de janelas com vidro duplo com moldura de alumínio, uma camada de ar de 5 mm de espessura e os dois vidros ambos com 4 mm de espessura. Com essas características o *WINDOW 6.3* calculou o $U_{\text{janela}} = 2,83 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$.

A obtenção da carga térmica do edifício (Figura 20) baseou-se numa simulação no TRNSYS de 8760 horas (um ano), cada mês são 744 horas (Janeiro [0 a 744] assim sucessivamente até Dezembro). A temperatura das zonas considerada é de 20°C e a taxa de infiltração é de 2 renovações por hora.

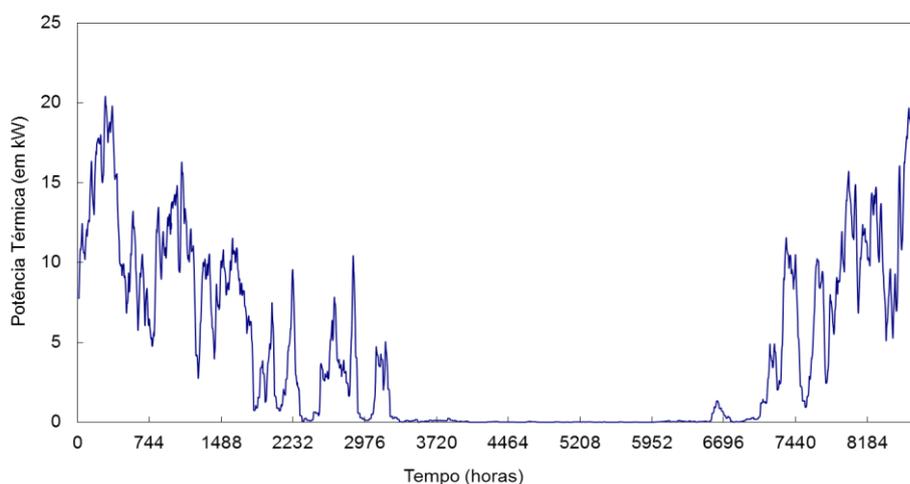


Figura 20: Carga térmica média diária do edifício.

5.1.2. Modelação da GSHP

O sistema GSHP no TRNSYS obedece o esquema básico da Figura 13, onde consta um conjunto de módulos que depois de parametrizados de acordo com as condições do sistema têm-se um modelo do sistema GSHP.

Basicamente um modelo de GSHP é composto por:

- ❖ Permutador enterrado no solo,
- ❖ Controlo,
- ❖ Bomba de circulação e
- ❖ Bomba de calor (instalação dentro do edifício).

Permutador Enterrado no Solo

Os tubos enterrados são modelados em três módulos no TRNSYS (Figura 13, os módulos 556, 557a e 31b). O módulo 556 é utilizado como permutador horizontal, mas também como ligação da saída da bomba de circulação ao permutador vertical (o principal), em seguida o módulo 557a que representa o permutador principal (vertical) e o módulo 31b que faz a ligação entre a saída do permutador vertical e a bomba.

Os parâmetros mais importantes na modelação do permutador vertical são: volume de armazenamento, a profundidade dos poços designados *boreholes* (BH) e número de BH.

$$SV = \pi \cdot n^{\circ}BH \cdot BHD \cdot (0,525 \cdot BHS)^2 \quad (5)$$

Em que:

SV – volume de armazenamento,

$n^{\circ}BH$ – número de (BH),

BHD – profundidade dos (BH's),

BHS – espaçamento entre os (BH's).

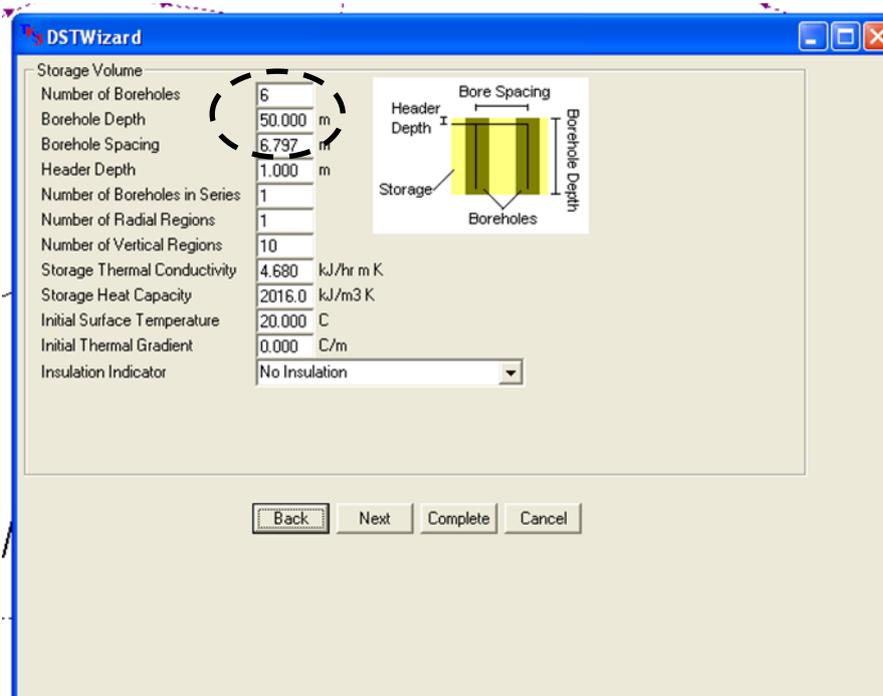


Figura 21: Os parâmetros do BH mais importantes.

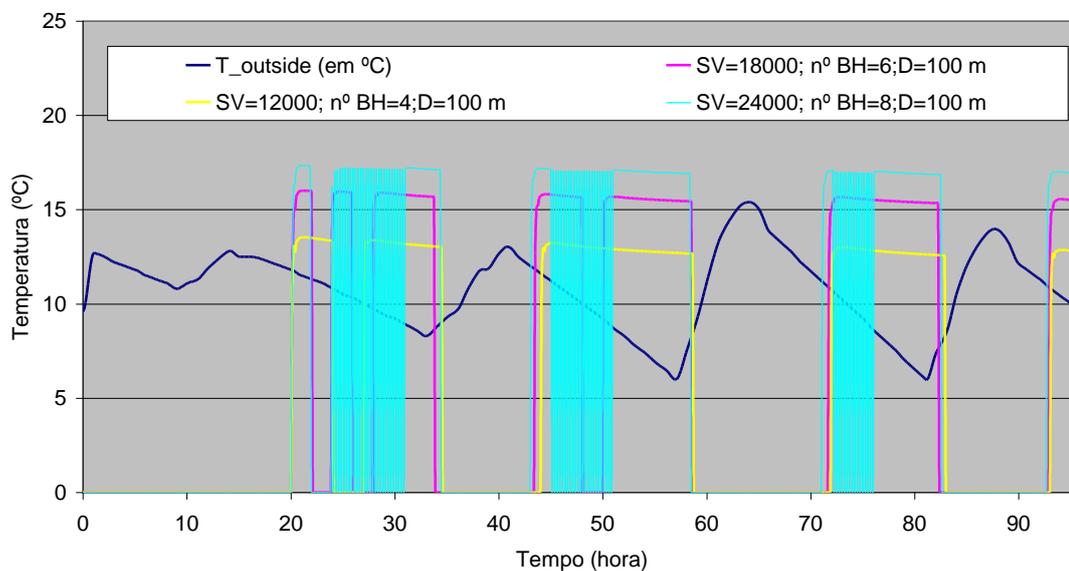


Figura 22: Variação da temperatura do fluido na saída do permutador de terra para número de BH constante variável e profundidades constantes (1 a 4 de Janeiro).

O gráfico da Figura 22 mostra a evolução das temperaturas verificadas no fluido a saída do permutador (solo) e a temperatura do ar exterior. Mostra claramente como primeira aproximação que apenas na transição de 4 para 6 BH, a temperatura do fluido poderá atingir

valores superiores aos do ar. Poderá ser um indicador de primeira aproximação já que o COP da bomba de calor é muito influenciado pela temperatura de entrada no evaporador (no modo de aquecimento).

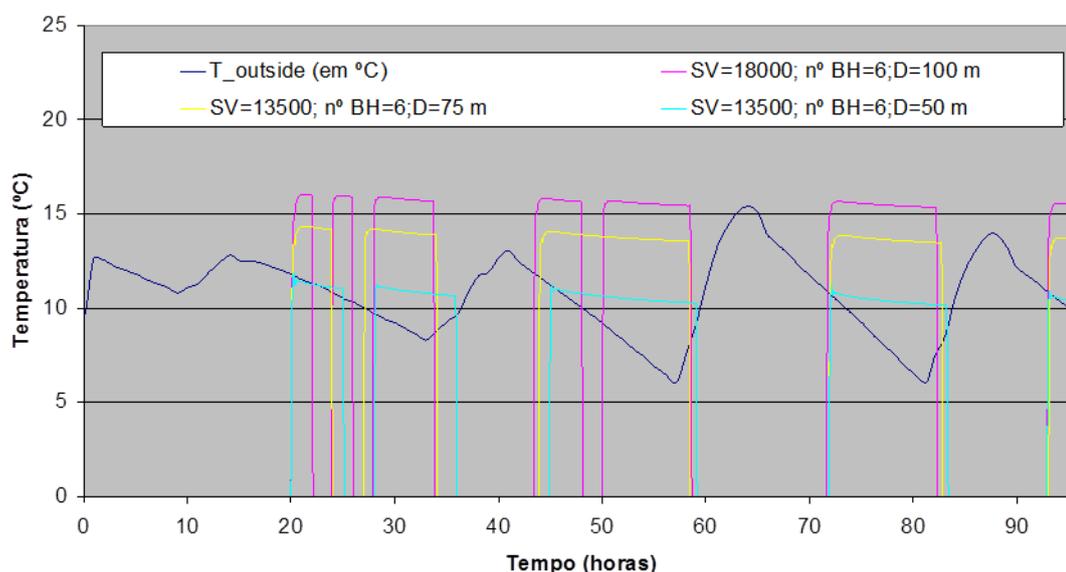


Figura 23: Variação da temperatura do fluido na saída do permutador de terra para número de BH constante e diferentes profundidades (1 a 4 de Janeiro).

Na Figura 23 está representado o gráfico que demonstra a variação da temperatura do fluido a saída do permutador com número de BH constante e a diferentes profundidades. Tal como o gráfico da Figura 22 é notável a diferença de temperatura e o ar ambiente o que faz com que a GSHP por exemplo tenha maior eficiência do que um equipamento que utiliza ar como fluido de admissão.

Controlo

O sistema é controlado automaticamente através do módulo 108 (Figura 24), que basicamente liga e desliga a GSHP de acordo com a temperatura das zonas. Por exemplo no modo aquecimento o controlador liga a GSHP quando a temperatura da zona for inferior a temperatura de monitorização (normalmente é de 20 °C com uma banda morta de 2 °C). No Anexo C consta o interface onde pode-se parametrizar o módulo – controlador.



Type108

Figura 24: O módulo do TRNSYS que representa o controlador.

Bomba de Circulação

A bomba de circulação (Figura 13 – módulo 3) é necessário para garantir a circulação da água entre o permutador e a GSHP, só não é necessário no caso em que o sistema funciona no regime de termossifão⁴.

Bomba de calor (instalação dentro do edifício, módulo 504)

Depois de parametrizar o modelo no TRNSYS, procedem as simulações no sentido de avaliar a eficiência da GSHP.

Para um volume de armazenamento de 19000 m³ e com 6 BH's de 100 m de profundidade e BHS de 6 m obtém-se o seguinte gráfico:

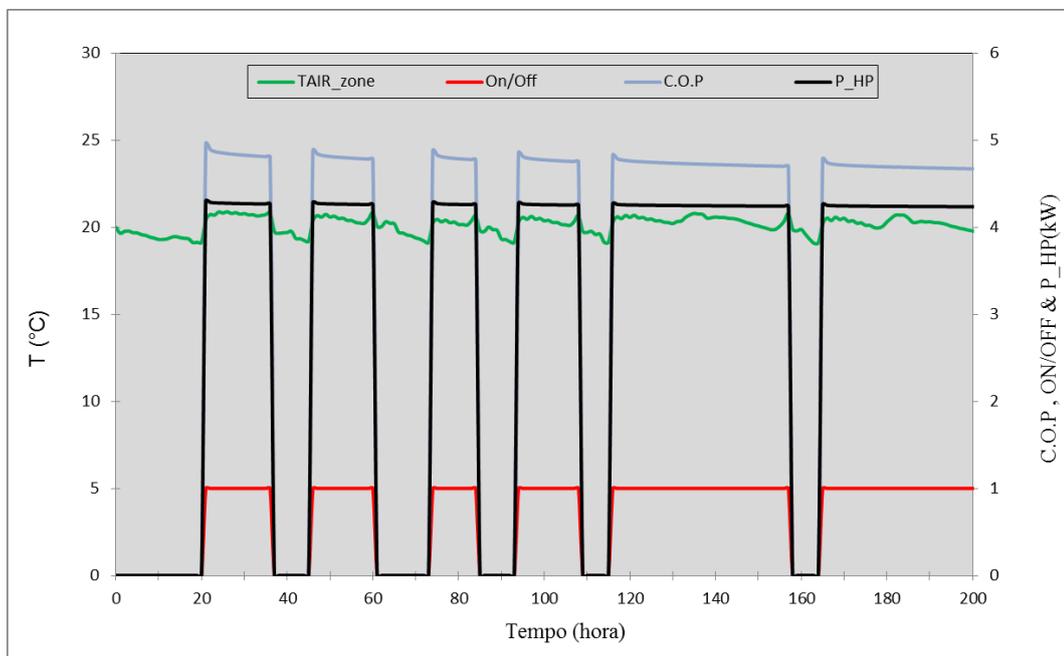


Figura 25: Perfil de funcionamento da GSHP durante 200 horas (8 dias mais 7 horas) de simulação.

⁴ É quando o fluido se move apenas pela diferença de densidade que ocorre quando um líquido é quente ou frio.

(T_{zona} – temperatura das zonas, C.O.P – *Coefficient of Performance*, P_{HP} – potência da bomba e ON/OFF – ligar e desligar a bomba).

Como se pode verificar no gráfico da Figura 25 a GSHP é monitorizado pela temperatura das zonas climatizadas. Quando a temperatura das zonas estiver abaixo dos 19 °C o sistema liga e para temperatura superiores a 21 desliga (banda morta de 2 °C).

Com a simulação conclui-se que o C.O.P é de 4,7 e a potência da bomba é de 4,26 kW.

$$\text{C.O.P} = \frac{P_{\text{Térmica}}}{P_{\text{HP}}} \quad (6)$$

Substituindo os valores de C.O.P e da potência da bomba na equação (6), vem:

$$4,7 \cdot 4,26 = P_{\text{Térmica}} \rightarrow P_{\text{Térmica}} = 20,022 \text{ kW}$$

Satisfaz a carga térmica do edifício.

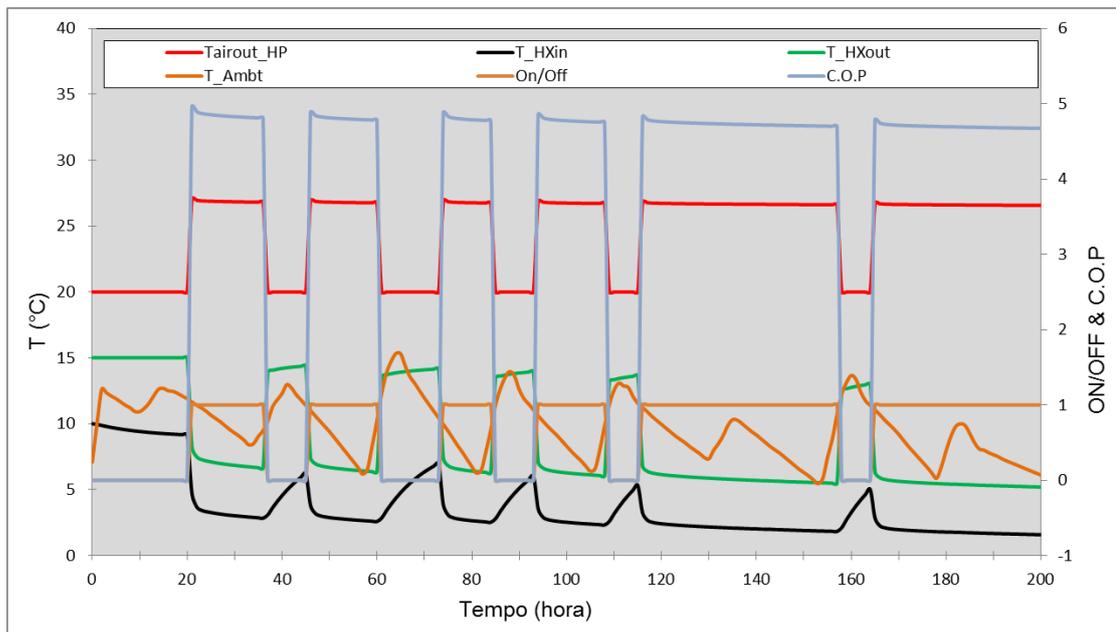


Figura 26: Variação das temperaturas durante 200 horas de simulação.

($T_{\text{airout_HP}}$ – temperatura do ar na saída do permutador da bomba, T_{HXout} – temperatura do fluido a saída do permutador da terra e a T_{ambt} – temperatura ambiente e T_{HXin} -temperatura do fluido a entrada do permutador)

O gráfico da Figura 26 foi obtido nas mesmas condições que o gráfico da Figura 25, do gráfico pode-se constatar que a temperatura do ar na saída do permutador da bomba é de 27 °C, temperatura esse que vai ser distribuída para as zonas. O caudal de ar é 2400 l/s, determinado da seguinte forma:

Através da fórmula,

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (7)$$

Em que:

Q – Potência térmica [20 kW],

\dot{m} – Fluxo total de ar [kg/s],

C_p – Capacidade calorífica do ar [1,005 kJ/kg. K] e

ΔT – Variação da temperatura [27 – 20 = 7K].

Substituindo na fórmula e resolvendo em ordem a \dot{m} , vem:

$$\dot{m} = \frac{20}{1,005 \cdot 7} = 2,8 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = \frac{2,8}{1,2} \cdot 1000 = 2400 \text{ l/s}$$

O caudal de ar que a bomba tem que aquecer para satisfazer a carga térmica do edifício (1300 m³ de espaços climatizados) é de 2400 l/s.

O valor da temperatura do ar á saída do permutador é de 27 °C. È um valor que foi assumido para que quando a GSHP estiver ligado o ar do espaço manter a temperaturas entre 20 a 21 °C.

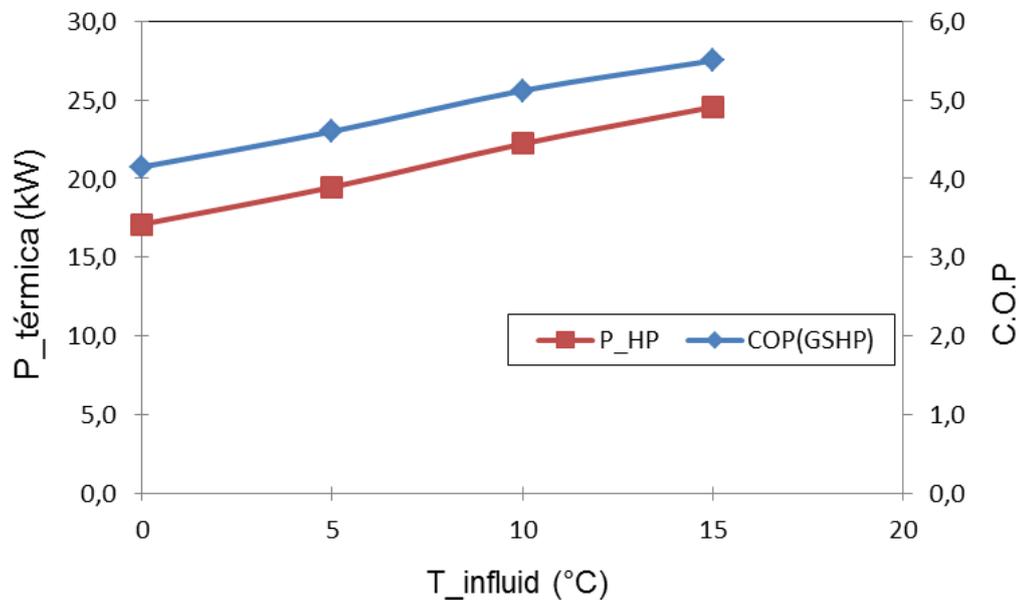


Figura 27: Performance da GSHP.

Na Figura 27 consta a evolução do C.O.P e a potência térmica com a variação da temperatura de entrada do fluido na GSHP. O aumento do C.O.P tem fortes influências com o aumento da temperatura de entrada do fluido, porque diminui a diferença entre a temperatura de entrada e a saída.

Comparação entre o GSHP com ASHP (Air Source Heat Pump – bomba de calor ar - ar)

A comparação entre GSHP e ASHP foi feito com base na evolução dos C.O.P's em função da temperatura de entrada do fluido e ar respectivamente, como mostra a Figura 28.

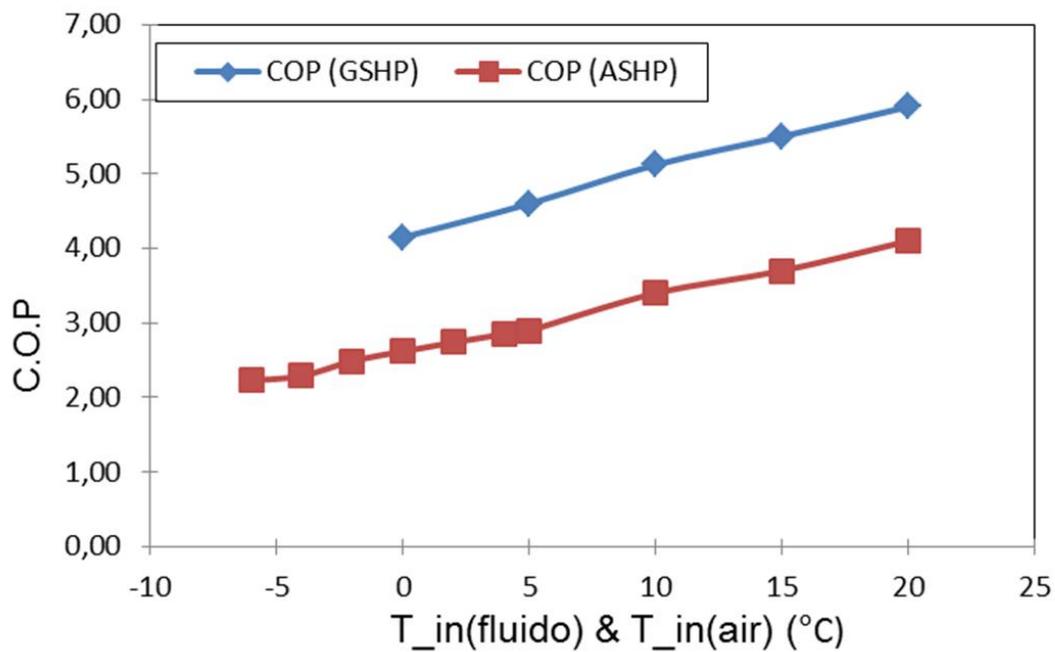


Figura 28: Comparação entre GSHP e ASHP.

Da análise do gráfico da Figura 28, pode - se concluir que a GSHP é mais eficiente que ASHP, dado que no inverno a temperatura do ar exterior médio em Coimbra pode chegar a valores médios diários muito baixo (6 °C) [Fonte: site da Meteorologia], o mesmo não acontece com a temperatura na profundidade do solo, por exemplo a 50 m de profundidade a temperatura é constante cerca de 20 °C [Figura 33].

Para a mesma potência térmica é preciso menos potência para GSHP do que ASHP.

De acordo com as simulações uma GSHP com potência de 4,25 kW e C.O.P de 4,7 dá para climatizar o edifício (20 kW), utilizando um ASHP teria que ter uma potência de 7 kW e um C.O.P de 2,9 para climatizar o mesmo edifício.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

As preocupações com o ambiente e a necessidade de gastar menos sem abdicar do conforto é uma das preocupações básica do uso dos equipamentos com maior eficiência em termos energéticos e em termos económicos. Assim, com a análise das temperaturas nas profundezas da terra pode-se dizer que é alternativa o uso de GSHP.

A integração da GSHP nos edifícios é bastante viável uma vez que o equipamento produz baixo nível de ruído, nível de poluição reduzida (usa energia eléctrica para o compressor).

Da simulação conclui-se que em um ano a GSHP mantem ligado durante 1605 horas, sendo a potência média da bomba é 4,25 kW e o custo de energia por kWh é de 0,13 € (TS- tarifa simples para potências > 2,3 kVA, estipulado pela ERSE e a EDP), vem:

$$4,2 \text{ [kW]} \cdot 1605 \text{ [h]} = 6741 \text{ kW} \cdot \text{h} \rightarrow 0,13 \cdot 6741 = 876,33 \text{ €}$$

Para bomba de calor ar – ar seria o seguinte:

$$7 \text{ [kW]} \cdot 1605 \text{ [h]} = 11235 \text{ kW} \cdot \text{h} \rightarrow 0,13 \cdot 11235 = 1460,55 \text{ €}$$

A utilização de GSHP significa que vai ser preciso menos potência instalado do que se for bomba de calor ar – ar a ser instalado, logo contribui muito pela diminuição do consumo da electricidade, assim reduz a factura da electricidade a poluição.

Uma das grandes desvantagens é o elevado custo de instalação, para fazer perfurações no solo são precisas máquinas com potência elevadas.

Devido a reduzida poluição sonora é muito aconselhado para edifícios de habitação.

O software TRNSYS despõe de todos os requisitos necessários para simular um edifício ou um sistema energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Nikolas G. Papatheodorou, Georgios I. Fragoniannis and Sofia K. Stamataki (2010), “Thermal Performance Simulation of a Hybrid Ground Source Heat Pump”, National Technical University of Athens, School of Mining Engineering and Metallurgy, 15780 Athens, Greece.
- Teresa Magraner, Álvaro Montero, Salvador Quilis and Javier Urchueguía (2010), “Comparison Between Simulation and Experimental Results for a Monitored Ground Coupled Heat System”, Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de València, Comino de Vera s/n, València 46022. Spain.
- L. Lamarche, G. Dupré and S. Kajl (2009), “A new Design approach for Ground Source Heat Pumps based on hourly load simulations”, Department of mechanical engineering & Ecole de Technologie Superieure 1100 Notre-Dame Ouest Montréal, CANADA H3C 1K3.
- John W. Lund, Derek H. Freeston, Tonya L. Boyd (2010), “Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review”, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Tecnologyg, Klamath Fall, Oregon, USA and Geothermal Institute, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Diâmetro Nominal dos Tubos (Ground Loop), DN 32 e DN 40. Acedido a 15 de Agosto de 2011, em: http://www.engineeringtoolbox.com/nps-nominal-pipe-sizes-d_45.html,
- Informação Técnica para Edifícios (ITE 50 e ITE 54), Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (2006), Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) – Tarifas. Acedido a 04/09/2011, em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/Paginas/default.aspx>
- Site de RETScreen International, acedido a 10/06/2011, em: http://www.etscreen.net/ang/g_ground.php

ASHRAE Handbook (1999), “Geothermal Energy”

The Green Building site. Acedido a 10/09/2011, em:

<http://www.thegreenbuildingsite.co.uk/store-products.php?i=air-source-heat-pump-systems&cookie=checked>

Wikipedia. Acedido a 08/05/2011, em:

http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_heat_pump ,

Site da LAMPOASSA. Acedido a 17/04/2011, em:

<http://www.lampoassa.fi/> através da <http://www.chama.com.pt/>

Agência para energia. Acedido a 15/08/2011, em:

<http://www.adene.pt/ADENE.Portal>,

TESS (*Thermal Energy System Specialists*). Acedido a 20/05/2011, em:

<http://www.tess-inc.com/>,

Site da Dimplex. Acedido a 03/04/2011, em:

http://www.bombasdimplex.com/main.asp?cont=prod_revi

TMY (*Typical Meteorology Year*). Acedido a 25/06/2011, em:

<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/generate.htm>

Site da Linde (empresa que fornece refrigerante). Acedido a 12/08/2011, em:

http://www.linde.pt/international/web/lg/pt/like35lgpt.nsf/docbyalias/nav_prod_refrg

ANEXO A – Soluções Construtivas

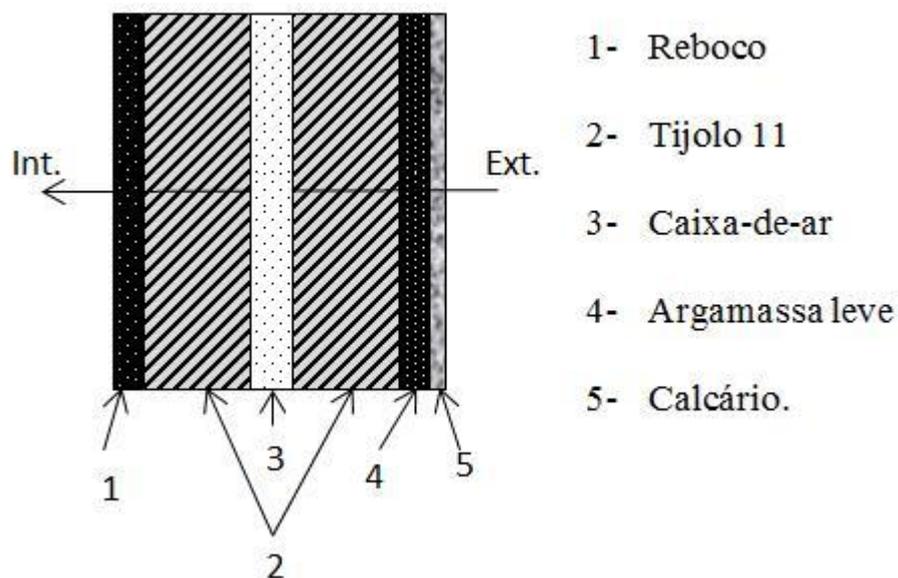


Figura 29: A parede virada para Norte, Oeste e Sul introduzido no TRNSYS.

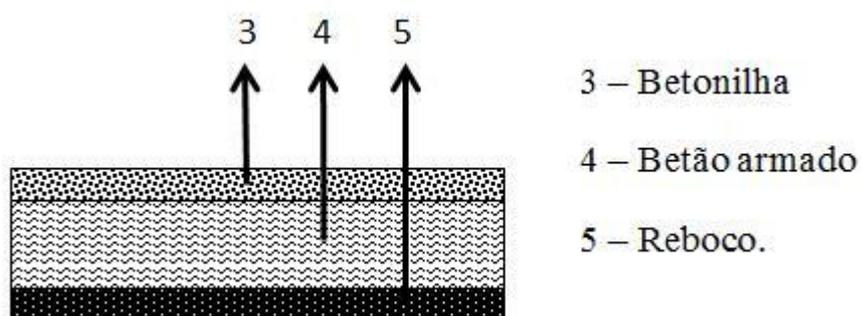


Figura 30: As camadas das lajes intermédias (Laje_2) (para o pavimento o 5 é brita).

ANEXO B – Parametrização dos Módulos

Tabela 3: As dimensões referentes a zona_1 (1 janela e porta).

Zona 1		
Quarto		
Linterior	3,46	m
Lexterior	3,56	m
Pd	2,5	m
Janela		
L	0,85	m
h	1,8	m
Porta		
L	0.8	m
h	2,1	m

Tabela 4: As dimensões referentes a zona_2 (são 4 janelas e portas internas).

Zona 2		
Quarto		
Linterior	3,46	m
Lexterior	14,24	m
Pd	2,5	m
Janela		
L	0,85	m
h	1,8	m
Porta		
L	0.8	m
h	2,1	m

A zona 3 tem as mesmas dimensões que zona_1.

Tabela 5: As dimensões referentes a zona_4 (são 6 portas internas).

Zona 4		
hall		
L _{exterior}	1,64	m
L	21,36	m
Pd	2,5	m
Porta		
L	0.8	m
h	2,1	m

Tabela 6: As dimensões referentes a zona_5 (4 portas internas).

Zona 5		
Circulação		
L _{exterior}	2,94	m
L	16,3	m
Pd	2,5	m
Porta		
L	0.8	m
h	2,1	m

Tabela 7: As dimensões referentes a zona_6 (1 janela).

Zona 6		
Cozinha		
L _{interior}	5,06	m
L _{exterior}	2,94	m
Pd	2,5	m
Porta		
L	0.8	m
h	2,1	m
Janela		
L	3,2	m
h	0,45	m

Tabela 8: Os parâmetros do permutador horizontal módulo 556 no TRNSYS.

Comprimento do tubo	100	m
Profundidade do tubo	2	m
Raio interno do tubo	0,0254	m
Raio externo do tubo	0,03	m
Densidade do tubo	770	kg/m ³
Densidade do solo	3200	kg/m ³
Condutividade térmica do tubo	6,96	kJ/hr.m/k
Condutividade térmica do solo	8,72	kJ/hr.m/k
Temperatura média da superfície	15	°C

Tabela 9: Os parâmetros do permutador vertical, módulo 557a no TRNSYS.

Volume do armazenamento	9000	m ³
Profundidade do furo	50	m
Nº de furos	6	
Raio do furo	0,7	m
Condutividade térmica do material de armazenamento	8,722	kJ/hr.m.K
Raio externa do tubo em U	0,017	m
Raio interno do tubo em U	0,014	m
Condutividade térmica do tubo	1,51	kJ/hr.m.K
Fluxo	613,04	Kg/hr
Temperatura referencial	30	°C
Capacidade específica do fluido	4,19	kJ/kg.K
Densidade do fluido	1000	kg/m ³
Temperatura inicial da superfície	15	°C
Temperatura média do ar	10	°C

ANEXO C - Interface do TRNSYS

(Project33.tpf) Type108

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Monitoring temperature	20.0	C	More...		
2	1st stage heating setpoint	20.0	C	More...		
3	2nd stage heating setpoint	18.0	C	More...		
4	3rd stage heating setpoint	16.0	C	More...		
5	1st stage cooling setpoint	24.0	C	More...		
6	2nd stage cooling setpoint	26.0	C	More...		

Figura 31: Os parâmetros do módulo 108 no TRNSYS.

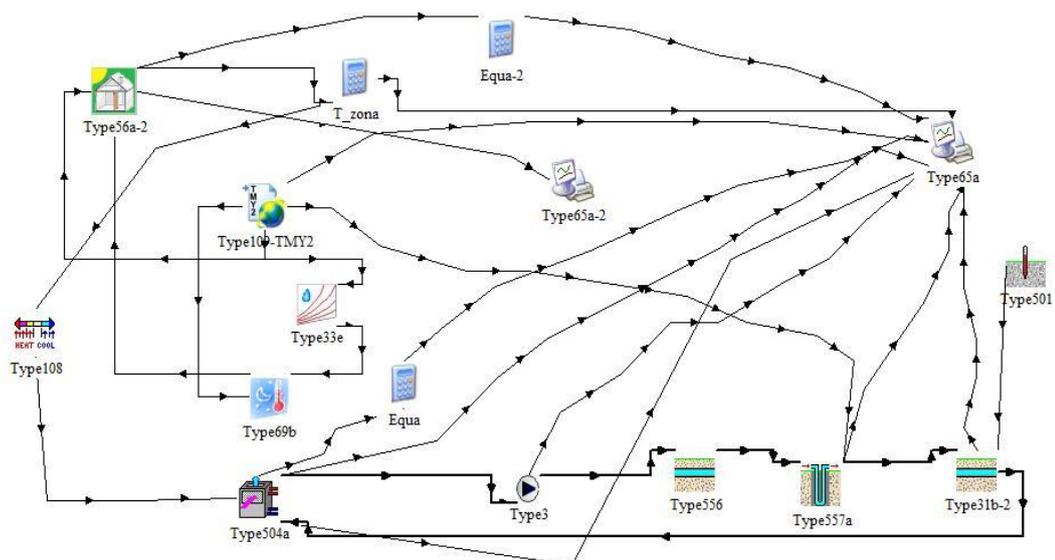


Figura 32: Os módulos utilizados na modelação do sistema.

ANEXO D - Gráficos

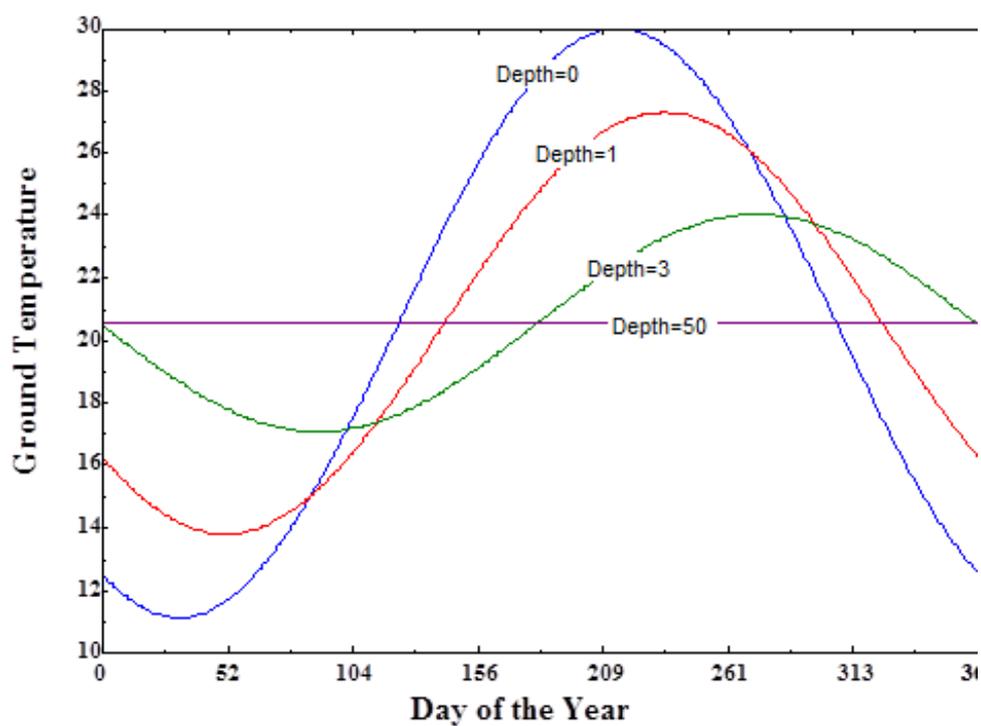


Figura 33: Evolução da temperatura anual no solo segundo Kasuda.