



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Miguel Mexia Leitão de Almeida e Sousa

Orientadores

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Santos e Professor Doutor José Costa, por todo o apoio, disponibilidade e conhecimentos transmitidos ao longo de todo o trabalho.

À empresa “Cool Haven”, pela disponibilização das suas instalações para a realização deste trabalho.

À minha família pelo incentivo e apoio dado ao longo de todo o curso.

RESUMO

O comportamento térmico de um edifício depende de muitos parâmetros, sendo um deles a respetiva massa, com influência direta na inércia térmica. Esta é uma propriedade de grande importância, uma vez que determina a capacidade de o edifício absorver os picos diários de temperatura no Verão e influencia a sua capacidade de utilização dos ganhos solares no Inverno. Permite ainda a poupança de energia quer para aquecimento do edifício quer para o seu arrefecimento, cumprindo assim o principal objetivo definido no artigo 1º do RCCTE.

Existem várias estratégias para aumentar a inércia térmica em edifícios com reduzida massa, como é o caso dos edifícios com estrutura metálica constituída por perfis metálicos enformados a frio. Uma destas estratégias baseia-se na utilização de sistemas de ventilação geotérmica (SVG) que, além de suavizarem as variações de temperatura interna do edifício, promovem ainda a renovação do ar no seu interior. A grande inércia térmica do solo permite que, durante o ano, ocorram diferenças de temperatura significativas entre o solo e o ar ambiente. Esta diferença é favorável tanto no Inverno como no Verão e é aproveitada pelas tubagens enterradas que funcionam como um permutador de calor solo-ar.

Na presente dissertação foram estudadas as vantagens dos SVG tendo por base uma instalação deste tipo devidamente monitorizada e em funcionamento num edifício residencial em Coimbra. Deste estudo concluiu-se que, quando corretamente dimensionados e sob as condições certas, os SVG têm um efeito positivo no comportamento térmico dos edifícios.

Neste trabalho foi ainda apresentado e validado um modelo de previsão do desempenho do SVG que foi posteriormente utilizado para a realização de um estudo paramétrico das variáveis intervenientes no funcionamento destes dispositivos.

ABSTRACT

The thermal behavior of a building depends on many parameters, such as its mass, which has a direct influence on the thermal mass. This is a property of great importance, since it determines the ability of the building to absorb temperature peaks in summer and influences its capacity to use solar gains during winter. It also allows energy savings for the building's heating and cooling.

There are many strategies to increase the thermal inertia of buildings with low mass, like light-weight steel-framed buildings. One of these strategies is based on the use of geothermal ventilation systems that, besides smoothing the temperature variation within the building, also promote the renewal of indoor air. The high thermal inertia of the ground allows, during the year, leads to the occurrence of significant temperature differences between the ground and the outside air. This difference is favorable both in winter and summer and is exploited by the buried pipes that work as an earth-to-air heat exchanger.

The present dissertation is devoted to a study of the advantages of geothermal ventilation systems based on an installation of this type properly monitored and working in a residential building in Coimbra. This study has shown that, when correctly designed and under the right conditions, geothermal ventilation systems may have benefits for the buildings' thermal behavior.

A model for predicting the performance of geothermal ventilation systems was also presented and validated in this work. This model was then used to perform a parametric study of the intervening variables in the behavior of these systems.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento Geral	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2. VENTILAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS	5
2.1 Ventilação em edifícios	5
2.2 Estruturas leves em aço	8
2.2.1 Definição	8
2.2.2 Origem e história	8
2.2.3 Vantagens e Desvantagens	9
2.3 Inércia térmica	10
3. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO GEOTÉRMICA	14
3.1 Definição	14
3.2 Energia Geotérmica	14
3.3 Princípios de funcionamento	15
3.3.1 Coeficiente de desempenho	16
3.4 Vantagens e desvantagens	17
3.5 Enquadramento histórico	18
3.6 Estudos realizados acerca dos sistemas de ventilação geotérmica	20
3.6.1 Análise do comportamento térmico do solo	21
3.6.2 Modelos de previsão do comportamento térmico dos SVG	21
3.6.3 Análise do desempenho dos SVG	23
3.7 Soluções existentes	24
4. CASO DE ESTUDO	29
4.1 Descrição da moradia	29
4.2 Sistema de ventilação geotérmica	30
4.2.1 Geometria, materiais e instalação	30

4.2.2	Sistema de monitorização	32
5.	MODELO DE PREVISÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO GEOTÉRMICA	35
5.1	Dados climáticos médios	39
5.2	Análise de viabilidade.....	40
5.3	Dados climáticos: médios <i>versus</i> registados <i>in situ</i>	40
5.3.1	Análise do desempenho do sistema de ventilação geotérmica	43
5.3.2	Inverno.....	45
5.3.3	Primavera.....	47
5.3.4	Verão	47
5.3.5	Outono	48
5.4	Validação do modelo de cálculo.....	49
6.	ESTUDO PARAMÉTRICO	53
6.1	Comprimento do tubo	54
6.2	Velocidade do ar	56
6.3	Diâmetro da tubagem.....	57
6.4	Espessura do tubo	57
6.5	Material constituinte da tubagem.....	58
6.6	Tipo de solo	59
6.7	Tipo de traçado	60
7.	CONCLUSÕES	63
7.1	Trabalhos futuros	66
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ventilação natural devido à ação do vento [9].....	6
Figura 2.2 – Ventilação natural devido ao “efeito de chaminé” [9].....	6
Figura 2.3 – Efeito de amortecimento da temperatura interior [17].....	11
Figura 2.4 – Esquema do funcionamento da massa térmica elevada na situação de Verão [17]	11
Figura 2.5 – Esquema do funcionamento da massa térmica elevada na situação de Verão [17]	12
Figura 3.1 – Funcionamento do SVG durante o Verão e o Inverno [22]	15
Figura 3.2 – Funcionamento do sistema de recuperação de calor [25]	16
Figura 3.3 – Funcionamento de um “qanat” em conjunto com uma torre de vento [28]	19
Figura 3.4 – Esquema de funcionamento de um SVG de circuito fechado.....	24
Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um SVG de circuito aberto	25
Figura 3.6 – Tipos de configuração da tubagem [23].....	26
Figura 3.7 – Funcionamento das bombas de calor geotérmicas: a) modo de aquecimento; b) modo de arrefecimento [53]	26
Figura 4.1 – Casa modelo e pavilhão anexo da “Cool Haven”	29
Figura 4.2 – Planta da moradia e do SVG (PAVILHAO).....	31
Figura 4.3 – Instalação das tubagens no solo	31
Figura 4.4 – Posicionamento dos sensores de temperatura e humidade no solo.....	32
Figura 5.1 – Secção transversal do tubo e circuito térmico do sistema.....	35
Figura 5.2 – Balanço térmico a um volume de controlo diferencial no tubo	37
Figura 5.3 – Temperatura média mensal prevista do ar e do solo a 2 metros de profundidade e respetivas diferenças.....	39
Figura 5.4 – Temperatura média mensal do ar ambiente e do solo a 1,9 metros de profundidade e respetivas diferenças.....	40
Figura 5.5 – Temperatura média do ar ambiente registada pelo INETI nos últimos 30 anos e a registada no presente estudo e respetivas diferenças.....	41
Figura 5.6 – Temperatura média do solo a 1,9 metros de profundidade registada no Sensor A, temperatura média do solo a 2 metros de profundidade prevista [36] e respetivas diferenças.41	41
Figura 5.7 – Temperatura média do solo a 1,9 metros de profundidade registada na “Cool Haven”, temperatura média prevista do solo a 2 metros de profundidade [36], com um atraso de 2 meses e respetivas diferenças.	42
Figura 5.8 – Variação horária do COP durante os dias 25 e 26 de Fevereiro (Inverno)	45
Figura 5.9 – Variação horária do COP entre os dias 27 e 28 de Março (Primavera)	47
Figura 5.10 – Variação horária do COP entre os dias 30 de Junho e 1 de Julho (Verão)	48
Figura 5.11 – Variação horária do COP no dia 17 de Outubro (Outono).....	49

Figura 5.12 – Traçado das tubagens enterradas com os troços definidos para o cálculo da temperatura de saída do ar	50
Figura 5.13 – Gráfico de comparação entre a temperatura de saída do ar prevista pelo modelo e a medida na instalação em estudo entre os dias 19 e 20/11/2013	51
Figura 6.1 – Energia trocada nas quatro estações em função do comprimento da tubagem	55
Figura 6.2 – Energia trocada nas quatro estações em função da velocidade do ar	56
Figura 6.3 – Energia trocada nas quatro estações em função do diâmetro da tubagem	57
Figura 6.4 – Energia trocada nas quatro estações em função da espessura da tubagem	58
Figura 6.6 – Energia trocada nas quatro estações em função do tipo de solo	59
Figura 6.7 – Energia trocada nas quatro estações em função do tipo de traçado	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 – Variação mensal de alguns parâmetros relevantes para a avaliação do desempenho do SVG	43
Quadro 6.1 – Dimensões e propriedades do troço estudado.....	53
Quadro 6.2 – Parâmetros analisados e respetivos valores [57]	53
Quadro 6.3 – Energia trocada nas quatro estações em função do material do tubo	58
Quadro 6.4 –Características dos dois tipos de traçado	60

SIMBOLOGIA

A_i	Área de superfície interna do tubo	m^2
c	Capacidade térmica específica	$J/(kg.K)$
c_p	Capacidade térmica específica do ar	$J/(kg.K)$
C	Taxa (de transporte) de capacidade térmica	$W/°C$
D	Diâmetro da tubagem	m
f	Coefficiente de atrito	-
h_i	Coefficiente de convecção térmica	$W/(m^2.K)$
I	Inércia térmica	$J/(m^2.K.s^{1/2})$
k	Condutividade térmica	$W/(m.K)$
L	Comprimento do tubo	m
\dot{m}	Caudal mássico de ar	kg/s
Nu	Número de Nusselt	-
p	Perímetro do tubo	m
P	Profundidade no solo	m
Pr	Número de Prandtl	-
\dot{Q}	Potência térmica transferida no permutador	W
Re	Número de Reynolds	-
R_1	Resistência térmica à convecção no interior do tubo	K/W
R_2	Resistência térmica à condução na parede do tubo	K/W
R_3	Resistência térmica à condução do solo	K/W
r_1	Raio interno do tubo	m
r_2	Raio externo do tubo	m
r_3	Raio de influência do tubo	m
$T_{a,e}$	Temperatura do ar à entrada do permutador	$°C$
$T_{a,s}$	Temperatura do ar à saída do permutador	$°C$
T_{amp}	Amplitude térmica anual do ar ambiente	$°C$

t_{ano}	Dia do ano	dias
$T_{máx}$	Temperatura máxima do ar ambiente	°C
$T_{média}$	Temperatura ambiente média anual	°C
T_{min}	Temperatura mínima do ar ambiente	°C
t_{min}	Dia do ano da temperatura ambiente mínima	dias
T_{solo}	Temperatura do solo	°C
U_i	Coefficiente global de transmissão de calor	W/(m ² K)
\dot{V}	Caudal de ar circulante	m ³ /h
v	Velocidade média do ar dentro da tubagem	m/s
\dot{W}	Potência elétrica consumida pelo ventilador	W

Símbolos gregos

α	Difusividade térmica	m ² /s
ΔH	Perda de carga	-
ΔT_1	Diferença de temperatura entre a entrada do SVG e o solo	°C
ΔT_2	Diferença de temperatura entre a saída do SVG e o solo	°C
ΔT_{ml}	Diferença média logarítmica de temperatura	°C
ν	Viscosidade cinemática do ar	m ² /s
ρ	Massa volúmica	kg/m ³

ABREVIATURAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Coefficient of Performance
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
LSF	Light Steel Framing
NTU	Number of Transfer Units
OSB	Oriented Strand Board
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SVG	Sistemas de Ventilação Geotérmica

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

No mundo em que hoje vivemos a energia é cada vez mais um bem escasso e valioso. Devido ao aumento do padrão de vida médio da população e à criação de novas tecnologias, têm vindo a surgir novas necessidades energéticas cuja satisfação acarreta enormes custos [1] económicos e ambientais. Segundo estudos realizados recentemente, prevê-se que o aumento da procura mundial de energia atinja os 39% em 2030, face aos valores registados em 2011 [1]. O problema não está tanto no consumo de energia em si, mas sobretudo na forma como esta é obtida e no preço a que é disponibilizada. Atualmente, cerca de 87% da energia consumida a nível mundial provém de combustíveis fósseis [2]. Durante o processo de combustão são libertados gases extremamente poluentes responsáveis pelo aquecimento global do planeta, pela deterioração da qualidade do ar e pela ocorrência de chuvas ácidas.

Como se não bastassem os problemas ambientais, do ponto de vista económico esta situação é também bastante preocupante. A finitude das reservas de combustíveis fósseis, combinada com o aumento desenfreado do seu consumo, faz prever que, no futuro, a utilização e a exploração desta fonte de energia tornar-se-ão de tal forma dispendiosas que deixarão de ser viáveis.

Neste contexto de crise energética e ambiental, diversos países têm vindo a tomar medidas no sentido de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a sua dependência de combustíveis fósseis, através do aumento da sua eficiência energética e da utilização de fontes de energia renováveis.

O sector da construção desempenha um papel muito importante para alcançar esses objetivos. Esta indústria afeta o meio ambiente através do consumo de recursos naturais e da criação de poluentes e resíduos, estimando-se que seja responsável pela utilização de 50% de todas as matérias-primas extraídas da natureza [3], 40% da energia consumida a nível mundial, e por um quinto das emissões de gases com efeito de estufa realizadas pelo Homem [4].

Perante estes dados, torna-se claro que o cumprimento das metas de combate às alterações climáticas só será possível através de uma mudança de mentalidade e comportamentos no sector da construção que permitam torná-la numa atividade mais sustentável e amiga do ambiente.

Surge, então, o conceito de construção sustentável. Charles Kibert [5] definiu-a como a “criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos”. Trata-se, então, de uma visão

multidisciplinar e complexa que procura conciliar três dimensões: ambiental, social e económica. A dimensão ambiental refere-se à utilização eficiente de energia e de materiais ao longo de todo ciclo de vida do edifício, priorizando a minimização da produção de poluição, quer física quer sonora. A vertente social diz respeito à preocupação com a saúde, o bem-estar e o conforto dos ocupantes do edifício. Para tal, deve ser dada atenção ao seu conforto térmico e acústico, à iluminação e à estética, bem como aos materiais utilizados na sua construção.

Ao contrário das práticas de construção tradicionais, a construção sustentável não é guiada por considerações económicas de curto prazo. Em vez de se focar nos custos de aquisição e de construção, este sistema construtivo procura fazer um planeamento cuidadoso de todo o ciclo de vida da edificação, desde a sua construção, passando pelas fases de operação e de manutenção, até à sua demolição [5].

A sustentabilidade de uma construção começa durante a fase de projeto na escolha do método construtivo e dos materiais a utilizar. Estes causam impactos negativos no ambiente durante o seu processo de produção e o transporte, além de interferirem no comportamento energético do edifício. A sua escolha deve, portanto, ser feita de forma criteriosa, dando prioridade a materiais com grande durabilidade, recicláveis, reutilizáveis e com uma reduzida pegada ecológica.

Estes requisitos são cumpridos pelo aço galvanizado, utilizado como principal elemento estrutural no sistema construtivo conhecido por *Light Steel Framing* (estruturas leves em aço) que oferece uma série de vantagens em relação a outras técnicas de construção. Este sistema proporciona uma enorme poupança de recursos naturais e humanos, sendo, por isso, cada vez mais aceite como um método de construção sustentável e amigo do ambiente.

Apesar das diversas vantagens oferecidas por este tipo de construção, existem também alguns aspetos em que o seu desempenho não é o ideal. Devido à reduzida massa dos materiais que constituem as suas paredes exteriores, a inércia térmica das estruturas leves em aço é normalmente baixa. Tal significa que são mais influenciadas pelas flutuações de temperatura exterior e têm dificuldade em manter o seu interior a uma temperatura constante. Em edifícios com ocupação permanente, em que a temperatura interior deverá manter-se aproximadamente constante durante longos períodos de tempo, a utilização de estruturas deste tipo poderá ter como consequência o aumento considerável do consumo de energia utilizada para a sua climatização.

Por estes motivos, têm vindo a ser desenvolvidas diversas estratégias com o objetivo de aumentar a inércia térmica de edifícios com estrutura leve em aço.

Uma destas estratégias, baseia-se na utilização de “Sistemas de Ventilação Geotérmica” (SVG) que permitem aproveitar a estabilidade da temperatura do solo, bem como a energia

térmica nele acumulada – um recurso renovável –, para realizar o pré-condicionamento do ar exterior utilizado para a ventilação de edifícios.

Habitualmente, estes sistemas são utilizados como complemento de outros equipamentos de climatização, contribuindo para a melhoria do seu desempenho e para a redução do seu consumo de energia. Além de contribuírem para a climatização do ar interior, estes dispositivos promovem ainda a ventilação do edifício, necessária para a manutenção da salubridade do ar interior e para o cumprimento da taxa de renovação de ar definida no RCCTE [6].

A utilização desta tecnologia deverá reduzir as necessidades de potência térmica do edifício e do consumo de energia não-renovável. Desta forma será possível cumprir os objetivos de redução das emissões relativas ao sector da construção e satisfazer o utilizador, através da diminuição da sua fatura energética e da melhoria do seu conforto.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Fazer uma revisão do estado da arte dos SVG através de uma revisão bibliográfica;
- Estudar as potencialidades dos SVG através da monitorização de uma instalação deste tipo em funcionamento num edifício residencial em Coimbra;
- Desenvolver e validar um modelo de previsão do comportamento térmico de SVG;
- Realizar um estudo paramétrico das variáveis relevantes para o desempenho de SVG através do modelo de previsão validado.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. No segundo capítulo, denominado “Ventilação e eficiência energética em edifícios”, são descritas as formas de ventilação existentes e são analisadas as vantagens e desvantagens do sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF). No terceiro capítulo, “Sistemas de ventilação geotérmica”, é descrito o funcionamento dos SVG, é feita uma revisão dos estudos realizados sobre estes dispositivos e são apresentadas algumas das soluções existentes. No quarto capítulo, “Caso de estudo”, é feita a descrição do SVG em estudo e da moradia à qual se encontra ligado. No quinto, “Modelo de previsão do desempenho do sistema de ventilação geotérmica”, é apresentado e validado um modelo de previsão do comportamento térmico do SVG e são analisados os resultados experimentais do sistema em estudo. No sexto capítulo, com base no modelo apresentado no capítulo anterior, é realizado um estudo paramétrico do comportamento dos SVG. Por fim, no sétimo e último capítulo, são expostas as principais conclusões retiradas deste trabalho.

2. VENTILAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS

2.1 Ventilação em edifícios

A maior parte da exposição do Homem aos poluentes ambientais ocorre através da inalação de ar em ambientes fechados. Devido às atividades realizadas nestes espaços e aos materiais existentes no seu interior, o ar pode ser 2 a 5 vezes, e em alguns casos até 100 vezes, mais poluído que o ar exterior [7].

Durante as últimas décadas, o aumento do custo da energia e a maior sensibilização para a importância da eficiência energética dos edifícios levaram a que estes fossem construídos com envolventes cada vez menos permeáveis e, conseqüentemente, à diminuição da taxa de renovação do ar interior. Este facto, combinado com a crescente utilização de materiais sintéticos na construção e no mobiliário tem contribuído para a deterioração da qualidade do ar interior [8].

A ventilação destes espaços é, portanto, da maior importância uma vez que permite que o ar fresco exterior seja introduzido e circulado por todo o edifício, levando à diluição e à remoção dos poluentes existentes no seu interior. O seu principal objetivo é a criação de condições ideais, em termos de qualidade do ar e de conforto térmico, que assegurem a saúde e o conforto dos seus ocupantes.

Além do controlo da salubridade do ar, a ventilação é também necessária para regular o seu nível de humidade. A renovação do ar interior permite que o vapor de água, decorrente da ocupação do edifício, seja dele extraído, prevenindo a ocorrência de condensações e o desenvolvimento de bolores. A taxa de renovação de ar de um espaço, ou o número de vezes que o seu volume de ar é renovado por unidade de tempo, é definida em função do seu tipo de utilização e das fontes poluentes que nele poderão existir.

A ventilação de um edifício pode ser feita essencialmente de duas formas: natural e mecânica. A ventilação natural utiliza o fluxo natural do ar para movimentá-lo através do edifício, sem recurso a qualquer equipamento mecânico ou emissão de ruído. A entrada e saída do ar pode ocorrer através de qualquer abertura (fendas, janelas, portas ou chaminés) bastando que exista uma diferença de pressão entre o interior e o exterior que promova a circulação de ar. Este gradiente de pressões pode ser gerado pela ação dinâmica do vento ou pelo chamado “efeito de chaminé”.

No primeiro caso, o movimento do vento em torno do edifício cria zonas de sobrepressão na fachada a barlavento e de sucção na fachada a sotavento que promovem a entrada e saída do ar (Figura 2.1). Através de um posicionamento estratégico do edifício e das suas aberturas é possível maximizar o aproveitamento do vento para a ventilação da habitação.

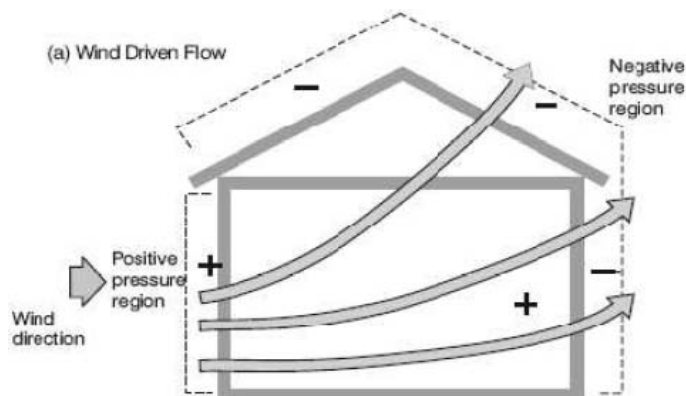


Figura 2.1 – Ventilação natural devido à ação do vento [9]

A ventilação induzida pelo “efeito de chaminé” tem origem na diferença de temperatura e, por consequência, de densidade do ar entre o exterior e o interior do edifício. Quando a temperatura interna é superior à externa, verifica-se a ascensão do ar quente no interior do edifício e a sua saída através de aberturas superiores como claraboias, chaminés ou lanternins. Este movimento ascendente reduz a pressão na base do edifício que leva à sucção do ar fresco exterior (Figura 2.2). Um fluxo inverso ocorre durante o Verão quando a temperatura externa é maior que a interna. Quanto maior for a diferença de cota (e de temperatura do ar) entre os pontos de entrada e de saída do ar, maior será a capacidade de ventilação.

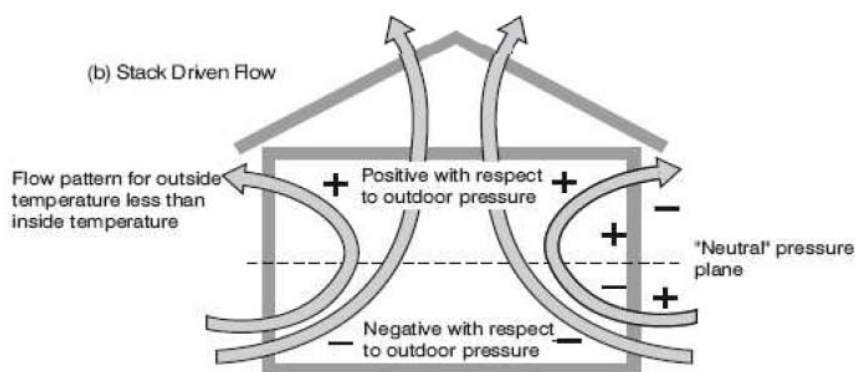


Figura 2.2 – Ventilação natural devido ao “efeito de chaminé” [9]

Além de proporcionar a renovação do ar interior, a ventilação natural pode ainda ser utilizada como técnica de arrefecimento. Durante o Verão e em climas com grandes amplitudes

térmicas diárias, a ventilação noturna permite remover o calor absorvido pelo edifício durante o dia e reduzir a temperatura máxima diurna [10].

Quando projetada de forma adequada, a ventilação natural permite a redução dos custos de operação do edifício, através da diminuição do seu consumo de energia para arrefecimento e ventilação.

No entanto, este sistema passivo apresenta também algumas desvantagens, como a falta de controlo do fluxo de ar, a sua dependência do vento e do gradiente térmico entre o exterior e o interior do edifício, e o facto de permitir a entrada de ruído e poluentes provenientes do exterior. Caso estes problemas coloquem em causa a qualidade do ar interior e o bem-estar dos ocupantes, é recomendada a utilização de sistemas de ventilação mecânica.

Nestes sistemas, a circulação do ar é forçada através de ventiladores ou exaustores que permitem regular o seu caudal, independentemente das condições de vento e de temperatura exterior. Os sistemas de ventilação mecânica permitem ainda a incorporação de filtros, que impedem a passagem de partículas nocivas para o interior do edifício, e atenuadores sonoros que reduzem o ruído proveniente do sistema de ventilação.

Apesar destas vantagens, o facto de a ventilação mecânica exigir o consumo de energia elétrica faz com que esta deva ser vista como um complemento da ventilação natural. Com base nesta premissa, foi desenvolvida a técnica de ventilação híbrida que permite a minimização do consumo de energia através da utilização de um sistema inteligente que ativa a ventilação mecânica sempre que a ventilação natural se revelar inadequada ou insuficiente para satisfazer as necessidades do edifício [11].

As técnicas de ventilação acima referidas podem revelar-se inapropriadas do ponto de vista energético quando a temperatura do ar exterior estiver demasiado afastada da temperatura ideal de conforto. As perdas (ou ganhos) de calor provocadas pela renovação do ar interior podem ser significativas, obrigando a um maior consumo de energia para retomar a temperatura interior pretendida.

Os sistemas de ventilação geotérmica (SVG) possibilitam a redução deste consumo energético através do pré-condicionamento do ar insuflado que aproxima a sua temperatura da temperatura ideal de conforto.

2.2 Estruturas leves em aço

2.2.1 Definição

Na construção metálica podem ser utilizados três tipos de elementos estruturais de aço: perfis laminados a quente, perfis de chapa soldada e perfis de chapa fina enformados a frio. Este último tipo de elemento estrutural é obtido a partir da dobragem ou quinagem de chapas de aço galvanizado de pequena espessura que lhes confere a forma pretendida.

Os perfis enformados a frio são utilizados no sistema conhecido internacionalmente como LSF cuja popularidade tem vindo a crescer na indústria da construção. Este caracteriza-se por ser um sistema construtivo industrializado, flexível e racional que oferece uma série de vantagens do ponto de vista económico, funcional e ambiental em relação às técnicas de construção convencionais [12].

Os edifícios construídos através do sistema LSF não utilizam tijolo ou cimento, sendo que o betão é apenas empregue na construção das suas fundações. Sobre estas são erguidos perfis de aço posteriormente interligados por parafusos autoperfurantes e autoroscantes que conferem resistência a toda a estrutura. Ao contrário da construção tradicional, as suas paredes, constituídas por perfis metálicos, têm uma função estrutural, pelo que não existe a necessidade de pilares ou colunas de suporte. Este conceito consiste na divisão das cargas por um grande número de elementos, cada um sujeito a um esforço reduzido, o que possibilita a utilização de perfis de chapa fina de aço [13].

Uma vez concluída a estrutura, esta é revestida por placas externas e internas, bem como materiais isolantes térmicos e acústicos. As placas exteriores, que são habitualmente aparafusadas às peças metálicas, possuem características que lhe permitem conferir rigidez à estrutura do edifício e resistir a cargas verticais e horizontais [13].

2.2.2 Origem e história

As origens deste sistema construtivo remontam aos Estados Unidos do século XIX. Durante este período, o aumento significativo da população americana criou a necessidade do aumento da produtividade na construção de novas habitações. Era essencial o desenvolvimento de um método construtivo rápido e prático que permitisse aproveitar os materiais disponíveis localmente. As grandes reservas florestais existentes na época permitiam um fácil acesso à

madeira que começou a ser utilizada como elemento estrutural em edifícios habitacionais, num processo designado por “wood framing” [15].

Mais tarde, após o final da Segunda Guerra Mundial, o crescimento da economia americana, a abundância de aço e a experiência acumulada pela indústria siderúrgica na sua utilização permitiram que este material fosse progressivamente substituindo a madeira. Durante este período, além dos Estados Unidos, também o Japão contribuiu para o desenvolvimento das construções leves em aço. Neste país, a grande destruição provocada pela guerra e a escassez de madeira necessária para a reconstrução das suas habitações levou a que a indústria japonesa desenvolvesse o fabrico de perfis leves de aço que reproduziam os formatos e tamanhos da madeira tradicional. O sucesso da aplicação do aço nas estruturas de edifícios contribuiu para a aceitação generalizada deste método de construção cuja utilização cresceu de forma constante por todo o mundo [15].

Durante os anos 80, foi dado um grande impulso para a utilização do aço na sequência do aumento significativo do preço da madeira provocado pela proibição de acesso às florestas mais antigas por parte das indústrias madeireiras [15].

Em Portugal, as estruturas leves em aço vêm sendo utilizadas desde 1995 essencialmente em substituição de perfis laminados a quente habitualmente utilizados como madres de sistemas de suporte de coberturas e fachadas. Nos últimos anos, a sua utilização em moradias residenciais unifamiliares e na reabilitação de edifícios tem vindo a aumentar significativamente, sendo cada vez maior o número de empresas nacionais com experiência na construção de estruturas leves em aço [16].

Apesar desta evolução, o sistema LSF ainda é pouco conhecido e utilizado em Portugal. A percentagem de edifícios com estruturas deste tipo é pouco significativa quando comparada, por exemplo, com os Estados Unidos, Canadá, Austrália e alguns países europeus. Nestas regiões, a maior divulgação e experiência na utilização deste sistema construtivo permitem-lhe competir com as técnicas de construção tradicionais, particularmente na área dos edifícios residenciais de baixa altura [16].

2.2.3 Vantagens e Desvantagens

São inúmeras as vantagens proporcionadas pela utilização do sistema LSF. Destas, as principais e as que mais contribuem para o seu permanente crescimento em todo o mundo são as seguintes [12] [13] [16]:

- O sistema de padronização da sua montagem permite manter a qualidade do produto final, reduzindo o tempo de execução da obra e o seu custo final, através da otimização da utilização de mão-de-obra e materiais;
- Grande versatilidade que lhe permite adaptar a qualquer projeto arquitetónico;
- Elevada eficiência estrutural, com uma excelente relação peso/resistência;
- A leveza da estrutura além de permitir uma redução do tamanho fundações, evita o risco de assentamento do edifício e as consequentes fissuras, tão habituais nas paredes de alvenaria. Esta característica torna-o também adequado para obras de reabilitação de edifícios antigos;
- As excelentes propriedades termo-acústicas dos materiais utilizados no revestimento da estrutura permitem aumentar o conforto no interior do edifício;
- Baixo consumo de energia durante as fases de construção e de operação do edifício;
- Grande facilidade de manutenção;
- As ligações aparafusadas entre perfis metálicos conferem à estrutura maior flexibilidade que lhe permite ter um excelente comportamento sísmico;
- O aço utilizado em toda a estrutura é um material de alta resistência, 100% reciclável e de grande durabilidade.

Como todos os sistemas construtivos, este também apresenta algumas desvantagens como [12] [13] [16]:

- Necessidade de mão-de-obra especializada para a sua montagem;
- Cálculo da resistência de secções e barras mais complexo que noutros tipos de elementos estruturais de aço, como perfis laminados a quente e perfis de chapa soldada;
- Abertura excessiva de vãos reduz a eficiência da estrutura perante ações sísmicas;
- Baixa resistência da estrutura metálica ao fogo exige a adoção de medidas de proteção;
- Inércia térmica do edifício é habitualmente fraca.

A fraca inércia térmica dos edifícios com estrutura leve em aço é considerada a sua principal limitação, uma vez que pode prejudicar significativamente o seu comportamento térmico e o conforto dos ocupantes.

2.3 Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício é medida pela resistência que este oferece à alteração da sua temperatura interior. Esta resistência depende da sua massa térmica, ou seja, da sua capacidade para absorver, armazenar e libertar calor.

Um edifício com grande massa térmica tem tendência a armazenar a energia recolhida por períodos mais longos, apresentando, por isso, uma inércia térmica elevada. Esta propriedade permite amortecer e retardar os picos de temperatura e diminuir as necessidades de arrefecimento e aquecimento do edifício (Figura 2.3).

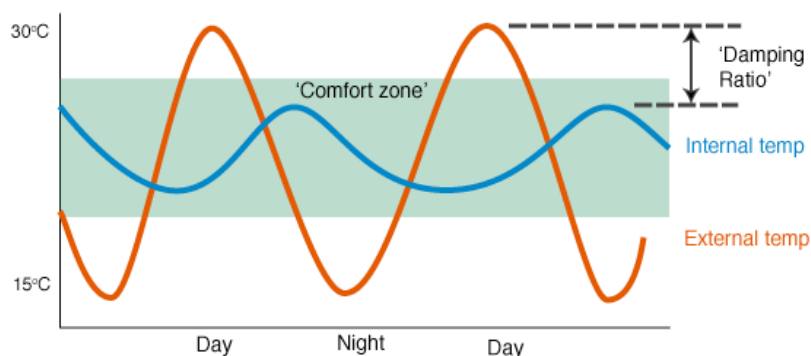


Figura 2.3 – Efeito de amortecimento da temperatura interior [17]

Em dias quentes de Verão, uma elevada massa térmica permite absorver o excesso de calor causado pela ocupação do edifício e pelos seus ganhos solares. Durante a noite, a descida natural da temperatura ambiente e a ventilação natural do edifício permitem extrair o calor armazenado e o arrefecimento do ambiente interior (Figura 2.4). Porém, em climas quentes e húmidos, não é aconselhável a construção de habitações com uma inércia térmica demasiado elevada uma vez que esta iria dificultar a remoção do calor através da ventilação noturna [17].

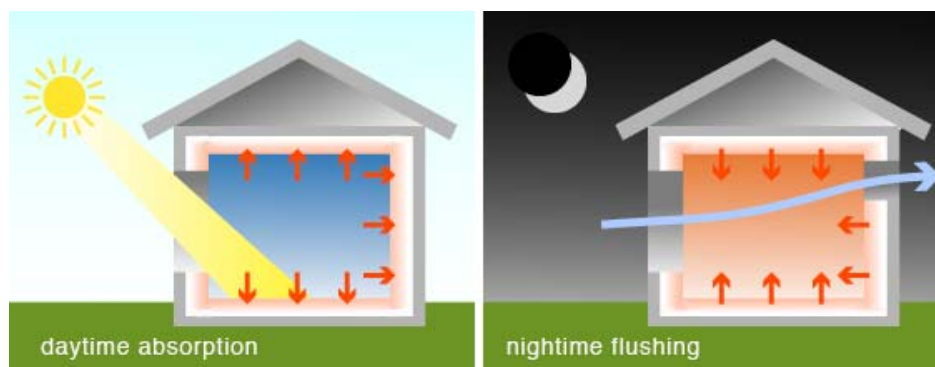


Figura 2.4 – Esquema do funcionamento da massa térmica elevada na situação de Verão [17]

Na situação de Inverno, a energia acumulada pela massa térmica do edifício no período diurno poderá ser utilizada para o seu aquecimento durante a noite, quando a temperatura exterior atinge o seu mínimo (Figura 2.5).

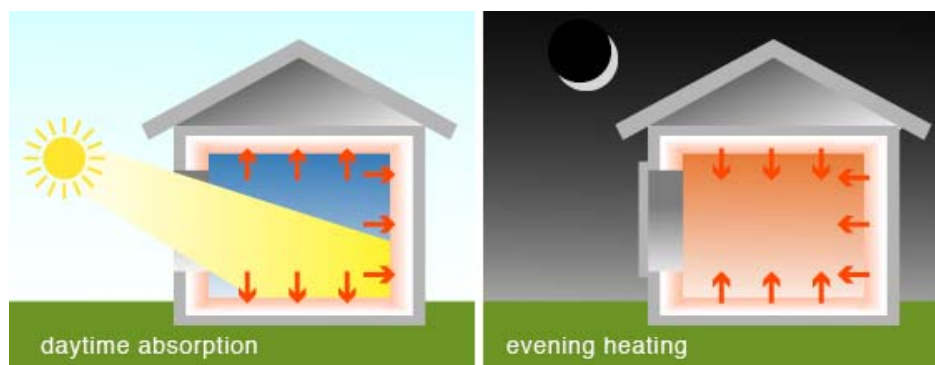


Figura 2.5 – Esquema do funcionamento da massa térmica elevada na situação de Verão [17]

Em edifícios com ocupação intermitente, uma baixa massa térmica pode, no entanto, revelar-se vantajosa. Devido à sua menor capacidade para armazenar calor, é possível aquecer ou arrefecer o ambiente interior de forma mais rápida e com menor consumo de energia. No caso dos edifícios com ocupação permanente, a falta de massa térmica poderá conduzir a um aumento substancial do gasto energético para a sua climatização [14].

Por esta razão, têm vindo a ser estudadas diversas estratégias que permitam aumentar a inércia térmica e, conseqüentemente, a eficiência energética de edifícios com reduzida massa como é o caso dos edifícios construídos através do sistema LSF. A necessidade de desenvolver tais estratégias é reforçada pelos estudos que indicam que cerca de 70% da energia consumida nos edifícios europeus é utilizada para o seu aquecimento e arrefecimento [18]. No entanto, esta percentagem é variável em função do clima em que se encontra o edifício, sendo que em Portugal este valor deve ser bastante mais reduzido.

Os SVG permitem aumentar a inércia térmica dos edifícios construídos em aço leve através do aproveitamento da grande massa térmica do solo para climatização do seu ambiente interior.

3. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO GEOTÉRMICA

3.1 Definição

O termo “Sistemas de Ventilação Geotérmica” é utilizado para designar a técnica de ventilação através de tubagens enterradas que utiliza a grande inércia térmica do solo para climatização e ventilação de edifícios. Este tipo de sistemas é também conhecido como *poço canadiano*, *poço provençal* ou *permutador de calor solo-ar*.

3.2 Energia Geotérmica

A energia geotérmica é a energia armazenada sob a forma de calor debaixo da superfície terrestre. Dependendo da profundidade de perfuração, esta pode ser dividida em energia geotérmica profunda (para profundidades superiores a 400 metros) e energia geotérmica superficial (até aos 400 metros). A primeira provém do calor gerado no interior da Terra que é habitualmente utilizado para a produção de eletricidade e calor. O aproveitamento desta forma de energia implica um investimento considerável e a construção de grandes centrais geotérmicas sobre zonas de intensa atividade magmática onde o acesso a esta fonte de calor é facilitado pela sua proximidade à superfície [19].

A energia geotérmica existente nas camadas mais superficiais da Terra tem maioritariamente origem no calor radiado pelo Sol que é absorvido e acumulado pelo solo aproximadamente até aos 4 metros de profundidade. Os sistemas de aproveitamento da energia superficial, ao contrário dos profundos, não requerem configurações geológicas especiais ou altos gradientes geotérmicos, dependendo apenas da existência de um solo escavável com boa inércia térmica. Esta propriedade, que mede a capacidade de um material conduzir e armazenar calor, é dada pela seguinte fórmula [20]:

$$I = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c} \quad (3.1)$$

em que I é a inércia térmica do material, k a condutividade térmica, ρ a massa volúmica e c a capacidade térmica específica.

Apesar da capacidade térmica específica do solo ser bastante reduzida quando comparada, por exemplo, com a da água (cerca de um quarto), esta é compensada pelo seu enorme volume de armazenamento que lhe confere uma inércia térmica elevada [20].

Devido a esta característica do solo, as oscilações da temperatura ambiente, à superfície, são amortecidas com o aumento da profundidade, permitindo que as camadas mais profundas mantenham uma temperatura aproximadamente constante durante todo o ano. Além do fenómeno de amortecimento térmico, verifica-se também um atraso temporal entre a temperatura ambiente e a do solo que, conforme a profundidade, poderá ser de vários dias a alguns meses. Estas diferenças de temperatura proporcionam uma fonte de energia renovável que pode ser aproveitada através da instalação de sistemas geotérmicos superficiais como os SVG [21].

3.3 Princípios de funcionamento

Os SVG são constituídos por um circuito de tubagens enterradas a baixa profundidade (1,5 a 2 metros) através do qual é forçada a circulação de ar proveniente da superfície. A entrada do ar é feita através de um fosso ou “torre”, contendo um sistema de pré-filtragem que impede que as partículas suspensas no ar exterior se depositem no interior das tubagens enterradas.

Ao longo deste circuito ocorrem trocas de calor entre o solo e o ar que é posteriormente conduzido até ao interior do edifício. Devido à grande inércia térmica do solo, durante o Verão, o ar ambiente estará a uma temperatura superior à do solo, verificando-se o seu arrefecimento na passagem pelas condutas. No Inverno ocorre a situação inversa, sendo a temperatura do ar à saída das tubagens superior à de entrada (Figura 3.1).

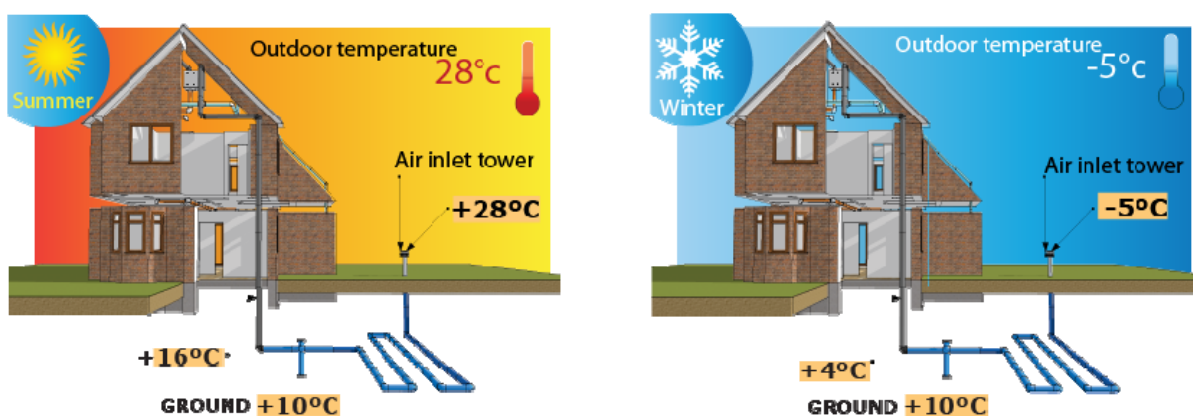


Figura 3.1 – Funcionamento do SVG durante o Verão e o Inverno [22]

Previamente à instalação dos SVG, deve ser realizada uma avaliação das propriedades térmicas e físicas do solo, da profundidade do leito rochoso e do nível freático do terreno que permita orientar o projetista no processo de dimensionamento do sistema [21].

Habitualmente, estes são dispositivos bastante simples e de baixa tecnologia que requerem apenas a instalação de um ventilador capaz de forçar a circulação do ar exterior através das condutas enterradas e a sua distribuição pelo interior do edifício. Alterando a velocidade de rotação do ventilador é possível regular o caudal de ar ventilado que deve variar consoante as necessidades de climatização e de ventilação do edifício.

Em climas frios, os SVG são normalmente acoplados a unidades de recuperação de calor de fluxos cruzados que promovem a transferência de calor e de humidade entre o ar extraído do edifício e o ar fresco exterior, sem a transmissão indesejada de odores ou microrganismos. Estes dispositivos permitem uma redução substancial da energia necessária para o aquecimento do edifício durante o Inverno e o controlo da humidade relativa do ar no seu interior. Nos meses de Verão a recuperação de calor é desnecessária, existindo por isso um “bypass” que permite que o ar exterior seja apenas filtrado e não aquecido (Figura 3.2) [25].

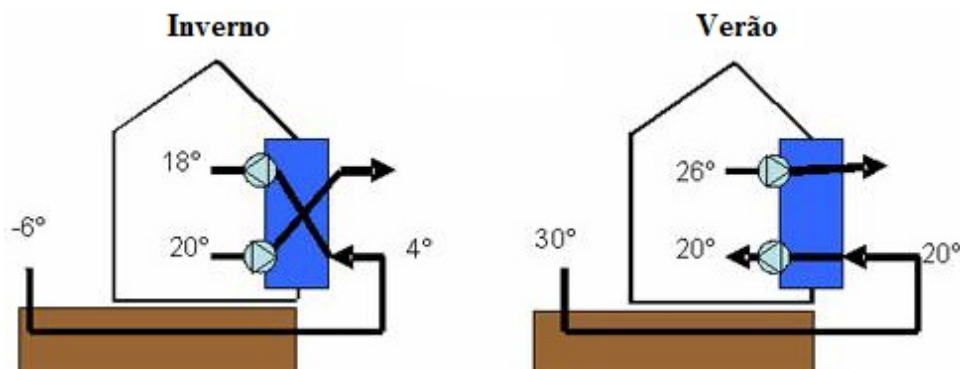


Figura 3.2 – Funcionamento do sistema de recuperação de calor [25]

A instalação de um recuperador de calor deve, no entanto, ser bem ponderada tendo em conta o seu custo, o facto de não ser utilizado durante o Verão e de o seu desempenho ser significativo apenas para temperaturas do ar exterior inferiores a 10°C [25].

3.3.1 Coeficiente de desempenho

A eficiência energética de um SVG pode ser analisada através do coeficiente de desempenho, ou “*coefficient of performance*” (COP). Esta grandeza adimensional é utilizada para avaliar a relação entre a potência térmica de aquecimento ou de arrefecimento do sistema, \dot{Q} (Watt), e a potência eléctrica consumida pelo seu ventilador \dot{W} (Watt):

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (3.2)$$

Um COP superior a 1 indica que a energia térmica obtida através do SVG é superior à energia utilizada para o seu funcionamento, num dado período. Se o COP for inferior a 1, significa que está a ser desperdiçada energia, pelo que, do ponto de vista energético, é preferível desligar o sistema de ventilação. No entanto, pode justificar-se o seu funcionamento no caso de a ventilação natural levar à introdução de poluentes e de ruído no interior do edifício.

3.4 Vantagens e desvantagens

Quando instalado corretamente, um SVG pode tornar-se numa alternativa ou num complemento válido aos sistemas de climatização convencionais. Além de reduzir os custos de aquecimento e arrefecimento do edifício, este sistema dispensa a utilização de equipamentos termodinâmicos ou de compressores e requer apenas uma pequena quantidade de energia elétrica para o funcionamento do seu ventilador. A estas vantagens acrescem ainda os baixos custos de manutenção e uma grande durabilidade que permitem considerar esta tecnologia como amiga do ambiente [21].

Apesar da capacidade de aquecimento e arrefecimento dos SVG ser inferior à dos sistemas de climatização convencionais, têm a vantagem adicional de promover a ventilação do edifício. Numa altura em que, como forma de poupança energética, as edificações tendem a ser construídas com envolventes cada vez mais estanques ao ar, os SVG oferecem a possibilidade de renovar o ar interior sem prejudicar a eficiência térmica do edifício. Tal é conseguido através do pré-aquecimento ou pré-arrefecimento do ar ventilado ao longo do circuito de tubagens enterradas. Além de reduzir as perdas energéticas, esta técnica permite ainda a melhoria da qualidade do ar interior graças à utilização de filtros que impedem a entrada de poeiras e microrganismos para o interior da habitação [23].

Apesar de todas estas vantagens, este sistema tem também alguns aspetos menos positivos. A instalação das tubagens no solo implica a movimentação de terras que poderá ser relativamente dispendiosa, consoante o tipo de solo existente e a disposição e comprimento total das tubagens [21].

Ao contrário dos sistemas de climatização convencionais, o desempenho dos SVG não é completamente previsível já que depende das condições externas do local onde está instalado, como a condutividade térmica do solo, os níveis de radiação solar, a temperatura do solo e do ar exterior e a sua humidade relativa.

Além do desempenho do sistema, também a qualidade do ar ventilado pode ser afetada pela temperatura e pela humidade relativa do ar exterior. Principalmente durante o Verão, a condensação da humidade do ar exterior, ao ser arrefecido no interior das tubagens, cria as

condições ideais para o desenvolvimento de microrganismos. De modo a prevenir esta situação, as tubagens devem ser dispostas com uma inclinação mínima de 2% por forma a permitir o escoamento por gravidade da água proveniente de condensações ou infiltrações. Em caso de necessidade pode ser instalado um sistema de bombagem para efetuar a drenagem das águas recolhidas, solução que irá aumentar o consumo total de energia [23][24].

Durante as estações intermédias, a energia utilizada para manter o sistema em funcionamento é frequentemente superior à trocada no solo. Este facto deve-se à proximidade entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do solo que reduz as trocas de calor entre estes dois meios. No entanto, alguns especialistas recomendam que o sistema se mantenha em funcionamento mínimo durante estes períodos de forma a evitar a estagnação do ar no interior das tubagens que facilita o desenvolvimento de bolores [25].

Outro potencial problema deste sistema é a infiltração de radão a partir do solo. Este gás radioativo, existente no solo em certas áreas geográficas, pode introduzir-se nos tubos enterrados e ser transportado até ao interior do edifício, colocando em risco a saúde dos seus ocupantes. Por esta razão deve ser evitada a utilização de tubagens constituídas por materiais porosos (como betão não revestido) que, para além de permitirem a infiltração de radão, são ainda suscetíveis à penetração de humidade [26].

3.5 Enquadramento histórico

Durante as últimas décadas tem vindo a aumentar o interesse e a utilização de sistemas que procuram aproveitar a grande inércia térmica do solo para a climatização e ventilação de edifícios. Apesar desta tendência ser relativamente recente, a tecnologia utilizada por estes dispositivos baseia-se em conceitos já conhecidos desde a antiguidade.

Algures no início do primeiro milénio a.C., nas zonas áridas da antiga Pérsia, foi desenvolvido um sistema de gestão de água chamado “*qanat*”. Este era constituído por um elaborado sistema de túneis de baixo declive escavados à mão que tinham como objetivo a recolha de água subterrânea proveniente das montanhas e o seu transporte, por gravidade até aos campos de cultivo. Chegavam a ter vários quilómetros de comprimento, ao longo dos quais eram cavados poços verticais que permitiam a remoção do material escavado para a superfície e ainda a ventilação do sistema de galerias. Foi nessa altura que surgiu a ideia de aproveitar o ar fresco proveniente dos túneis para o arrefecimento e ventilação de edifícios [27].

Os *qanats*, trabalhando em conjunto com uma torre de vento posicionada no topo dos edifícios, formavam um sistema de arrefecimento passivo que se baseava na formação de

zonas de baixa pressão para promover a circulação do ar e a diminuição da sua temperatura. No sistema representado na Figura 3.3, o ar quente e seco oriundo da superfície entra no *qanat* através dos poços verticais. Daí segue ao longo do sistema de túneis onde é arrefecido pelo contacto com a água e com o solo mais frio existente a esta profundidade. A torre de vento é colocada de modo a que o vento introduzido no edifício passe sobre o topo do poço do *qanat*, criando, assim, uma zona de baixa pressão que permite a sucção do ar fresco circulante nos túneis [27].

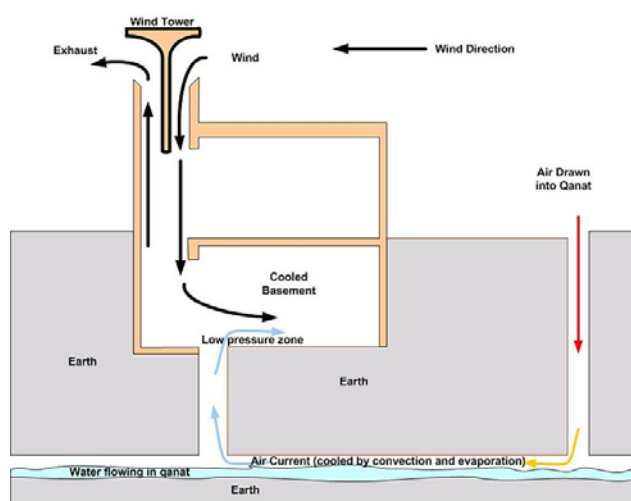


Figura 3.3 – Funcionamento de um “qanat” em conjunto com uma torre de vento [28]

Mais tarde, por volta do século I a.C., as cidades do norte do império romano começaram a usar sistemas de climatização conhecidos como hipocaustos. Estes eram constituídos por espaços vazios, existentes nas paredes e sob os pisos dos edifícios, através dos quais circulava ar fresco ou quente, consoante a temperatura desejada. O ar quente, que tinha origem em fornalhas com ligação ao pavimento, seguia por tijolos perfurados existentes nas paredes, vindo depois a sair do edifício através das chaminés. Deste modo, era possível aquecer as várias divisões da habitação sem que o fumo proveniente das fornalhas contaminasse o ar interior. No Verão, estas câmaras podiam ser utilizadas para o arrefecimento do edifício através das trocas de calor entre o pavimento e o solo fresco sob o edifício.

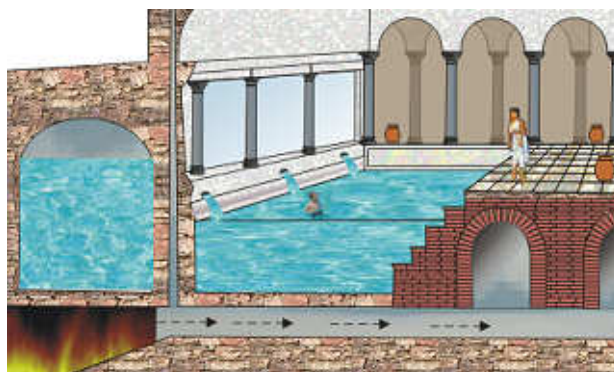


Figura 3.3 – Funcionamento de um hipocausto [29]

Ao longo dos anos têm vindo a ser criados sistemas mais desenvolvidos e complexos que permitem um melhor aproveitamento da inércia térmica do solo.

Os SVG foram alvo de alguma atenção durante as décadas de 70 e 80. No entanto, na altura não foram muito bem recebidos devido a alguns problemas relacionados com o seu baixo desempenho, o facto de exigirem um investimento inicial demasiado elevado, a propagação do ruído do ventilador até ao interior do edifício e o desenvolvimento de fungos e bactérias no interior das tubagens [26].

Nos últimos anos, devido à maior sensibilidade da população para utilização de fontes de energia renováveis, ressurgiu o interesse nos SVG. Atualmente, esta tecnologia é já bastante utilizada em algumas partes da Europa, como na Suíça, Alemanha e França, mas ainda está pouco difundida em Portugal. Os SVG são uma das tecnologias renováveis em maior crescimento a nível mundial, tendo registado um crescimento anual do número de instalações na ordem dos 10% durante os últimos dez anos [21]. A redução da permeabilidade ao ar das envolventes dos edifícios construídos atualmente e a crescente necessidade de utilização de fontes de energia alternativas, fazem prever que esta tendência se mantenha ou venha mesmo a aumentar.

3.6 Estudos realizados acerca dos sistemas de ventilação geotérmica

Uma revisão bibliográfica revelou um grande número de estudos relacionados com SVG. Estes incluem a análise do comportamento térmico do solo, o desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento térmico dos SVG e a avaliação do seu desempenho com base em resultados experimentais.

3.6.1 Análise do comportamento térmico do solo

Em 1965, Kusuda e Achenkach, após extensas medições realizadas a várias profundidades em diversos locais dos EUA, concluíram que a temperatura do solo a 2 metros de profundidade permanecia aproximadamente constante durante todo o ano [32].

Kharty e Sodha (1978) apresentaram uma análise da variação periódica da temperatura do solo com a profundidade que tem em conta a periodicidade da radiação solar e a temperatura do ar ambiente. Como resultado deste estudo foi derivada uma expressão que permite estimar a temperatura do solo em função do tempo e da profundidade [33].

Em 1981, Bharadwaj e Bansal realizaram um estudo sobre a variação diária e anual da temperatura do solo, tendo concluído que a estabilidade térmica era atingida à profundidade de 0,15 metros para variações diárias e 4 metros para variações anuais [34].

Mihalakakou, em 1992, constatou que a variação anual da temperatura do solo a uma dada profundidade podia ser descrita por uma função harmónica do tempo [35].

3.6.2 Modelos de previsão do comportamento térmico dos SVG

As trocas de calor em tubagens enterradas têm vindo a ser estudadas desde meados do século passado. Os resultados destes estudos revelaram que, dada a multiplicidade de fatores que intervêm nos fenómenos de transferência térmica, a obtenção de uma solução exata para este problema é praticamente impossível.

O solo que rodeia as tubagens é heterogéneo e a sua condutividade varia consoante os materiais que o constituem, a sua temperatura e o nível de humidade. O comportamento do ar circulante no interior das tubagens também não é constante, com propriedades como a viscosidade e densidade a variarem com a temperatura. Devido a toda esta complexidade, a obtenção de uma solução para o problema implica a adoção de um conjunto de hipóteses simplificativas [36].

Com base em algumas destas hipóteses, nas últimas três décadas foram desenvolvidos diversos modelos numéricos e analíticos com o objetivo de prever o comportamento térmico dos SVG. A maior parte destes modelos divide as tubagens em vários volumes de controlo no interior dos quais ocorrem trocas de calor entre o solo e o ar circulante. Através da definição das equações de balanço térmico para cada volume de controlo, é possível fazer a previsão da temperatura do ar à saída do sistema. Estes modelos têm como principais dados de entrada a temperatura do solo e do ar ambiente, as propriedades térmicas do solo e das tubagens, assim como a sua geometria. Os modelos unidimensionais inicialmente desenvolvidos foram

substituídos por modelos bidimensionais, durante a década de 90, e mais recentemente por modelos tridimensionais [37].

Em 1985, Goswami e Dhaliwal desenvolveram um modelo capaz de prever a temperatura do ar circulante no interior de tubagens enterradas, em qualquer ponto e qualquer instante. As trocas de calor entre o solo e o tubo foram analisadas considerando um fluxo de calor com direção radial de um cilindro semi-infinito (infinito na direção horizontal perpendicular ao fluxo de ar) formado pelo conjunto do tubo e do solo envolvente. Este modelo foi validado através de resultados experimentais [38].

Tzaferis et al., em 1992, analisaram a precisão de oito modelos diferentes na previsão do desempenho de um SVG. Os seus resultados foram comparados com dados experimentais, tendo seis dos modelos revelado uma grande aproximação aos valores medidos. Com este estudo, conseguiram demonstrar a capacidade dos modelos unidimensionais estacionários para descrever o comportamento dos SVG [39].

Em 1994, Baxter apresentou uma análise detalhada do desempenho de um SVG. Os seus resultados revelaram que um dos principais fatores que afeta o desempenho do sistema é o gradiente térmico que se forma na direção axial junto às tubagens. Isto indica que ao admitir-se uma temperatura constante do solo junto ao tubo pode-se estar a cometer um erro [40][41].

No mesmo ano, Mihalakakou apresentou um modelo numérico que descreve simultaneamente a transferência de massa e de calor no interior do tubo e no solo envolvente. Este modelo tem em conta a estratificação térmica natural do solo, a influência da utilização de tubagens em paralelo e a transferência de humidade no solo. Os resultados do modelo revelaram uma concordância satisfatória quando comparados com dados experimentais [42].

Em 1996, Krarti e Kreider apontaram algumas limitações aos modelos estacionários. Uma vez que o calor extraído das tubagens aquece o solo envolvente, a sua real capacidade de arrefecimento será inferior à dada pelo modelo estacionário, que assume uma temperatura do solo constante. Estes investigadores desenvolveram então um modelo analítico que assume que, após alguns dias de operação, o SVG atinge um estado quase estacionário periódico. Deste modo, todas as variações de temperatura são funções periódicas do tempo [43].

No ano de 2000, Hollmuller e Lachal desenvolveram e validaram um modelo numérico de elementos finitos que tem em conta a transferência de calor sensível e latente, a difusão de calor tridimensional no solo, as perdas de carga, a infiltração de água e a sua circulação ao longo do interior das tubagens [44].

No ano seguinte, De Paepe e Willems derivaram um modelo tridimensional para o estudo do desempenho de um SVG no clima belga, tendo obtido resultados que mostram que a

influência de um tubo na temperatura do solo envolvente está limitada a uma distância igual a duas vezes o seu diâmetro [45].

Em 2003, o mesmo De Paepe e Janssens desenvolveram um modelo analítico unidimensional através do qual é possível analisar a influência dos parâmetros de dimensionamento dos SVG sobre o seu desempenho termo-hidráulico. Para tal, derivaram uma relação que liga a perda de carga do ar no interior das tubagens à eficiência térmica do sistema. Esta relação foi utilizada para formular um método de dimensionamento que permite determinar as dimensões características do sistema de forma que a eficiência térmica ótima seja atingida com uma perda de carga aceitável. Utilizando este método, a escolha das dimensões características do SVG torna-se independente do solo e das condições climáticas do local de instalação. Isto permite que os projetistas escolham a configuração do SVG que lhe permite atingir o melhor desempenho [46].

Em 2012, Bhutta et al. apresentaram uma revisão sobre a aplicação da Dinâmica de Fluidos Computacional (ou CFD, “*Computational Fluid Dynamics*”) na área dos SVG, tendo concluído que esta é uma ferramenta bastante eficaz na previsão do seu comportamento [47].

3.6.3 Análise do desempenho dos SVG

Os vários estudos existentes sobre esta matéria indicam que os SVG, quando corretamente dimensionados e sob as circunstâncias certas, são capazes de proporcionar uma poupança energética assinalável, permitindo a redução da amplitude térmica diária e da potência térmica instalada.

Em 1994, Baxter apresentou uma análise detalhada do desempenho de um SVG instalado em Knoxville (EUA). Durante três semanas de Verão o COP médio horário variou entre os 1,4 e 2,69. Em três noites de Inverno, o mesmo parâmetro variou entre 1,6 e 4,2 [40][41].

Em 2000, Hollmuller e Lachal analisaram o desempenho de um SVG instalado num edifício comercial na cidade de Genebra. Deste estudo concluíram que existe uma assimetria entre o potencial de aquecimento e arrefecimento do sistema. Durante o Inverno, os SVG devem ser utilizados sobretudo para a ventilação do edifício, sendo o seu aquecimento realizado através sistemas de climatização convencionais. Além disso, nesta altura do ano os SVG entram em competição com recuperadores de calor de maior eficiência. Pelo contrário, o arrefecimento proporcionado pelos SVG durante o Verão permite-lhes, em alguns casos, substituir os sistemas de ar condicionado [44].

Segundo Pfafferot (2003), os benefícios proporcionados pela combinação de um SVG e de um sistema de recuperação de calor são bastante reduzidos, dado que o aumento da

temperatura do ar na sua passagem pelo SVG provoca a diminuição da eficiência do recuperador de calor. Deste modo, o ganho energético do conjunto é muito inferior à soma dos ganhos de cada um dos sistemas trabalhando de forma independente. No entanto, o funcionamento em série destes dois sistemas poderá ser útil durante o pico do Inverno, uma vez que o aquecimento proporcionado pelo SVG pode prevenir o congelamento da humidade do ar extraído do edifício [48].

Na Índia, em 2003, Sharan e Jadhav estudaram o desempenho de um SVG em modo de arrefecimento, durante três dias de Maio, e em modo de aquecimento, durante três dias de Janeiro. Os resultados mostraram que o sistema arrefece o ar exterior em Maio até 14°C, apresentando um COP médio igual a 3,3. Em Janeiro o aquecimento máximo atingiu também 14°C, com COP médio de 3,8 [49].

No mesmo país, em 2009, Bansal estudou o potencial de arrefecimento de um SVG durante o Inverno. O sistema proporcionou uma poupança de 38% da energia elétrica em comparação com um aquecedor elétrico para o mesmo efeito de aquecimento [50].

Em 2011, o sistema estudado por Darkwa et al. na cidade chinesa de Ningbo apresentou resultados satisfatórios para uma zona de clima quente e húmido. O sistema estudado foi capaz de fornecer 62% da carga de aquecimento durante o mês de Março, com um COP médio de 0,89, apesar das ocasionais perdas de calor para o solo envolvente. Durante este mesmo período, os níveis de humidade relativa foram reduzidos em média 10%. No mês de Julho, o sistema proporcionou 86% da carga de arrefecimento, com um COP médio de 1,76 [51].

3.7 Soluções existentes

Os SVG podem ser utilizados em dois tipos de configurações diferentes: circuito fechado (Figura 3.4) e circuito aberto (Figura 3.5).

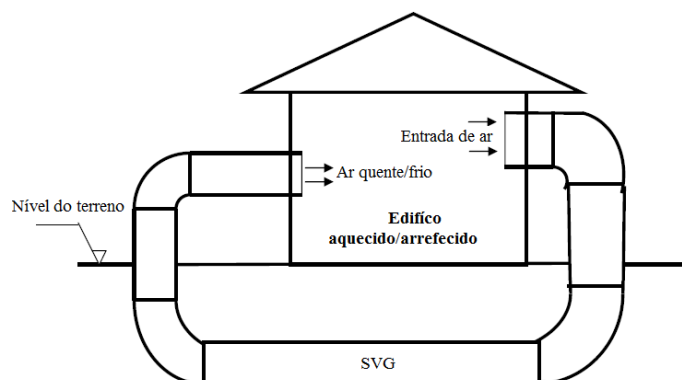


Figura 3.4 – Esquema de funcionamento de um SVG de circuito fechado

No sistema fechado, o ar interior do edifício é conduzido através da rede de tubagens enterradas, voltando a entrar no edifício a uma temperatura próxima à do solo. Durante os períodos em que se registam temperaturas do ar extremas, esta solução pode-se revelar mais eficaz do que um circuito aberto, uma vez que permite aquecer ou arrefecer o ar interior mais do que uma vez. No entanto, a utilização desta configuração tem vindo a cair em desuso dado que, ao contrário dos sistemas de circuito aberto, não permite a renovação do ar interior [24].

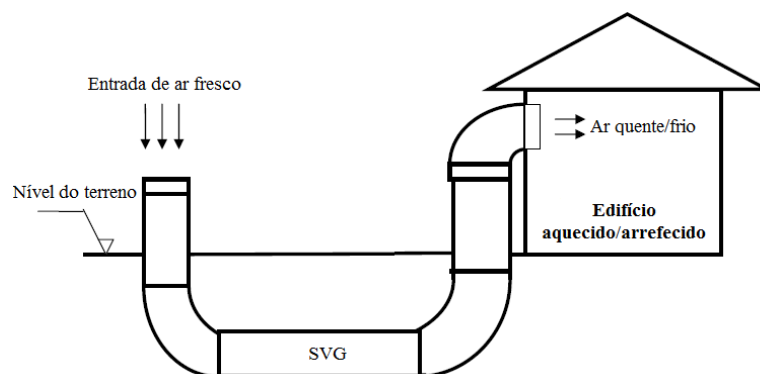


Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um SVG de circuito aberto

A combinação de um SVG de circuito aberto com um recuperador de calor permite obter níveis de eficiência próximos (em 80 a 95%) dos obtidos através de um circuito fechado e ao mesmo tempo ventilar o edifício. Por esta razão, este é o tipo de solução mais utilizada nos SVG [24].

A rede de tubagens enterradas pode ser instalada em espaços abertos, sob a laje do edifício, ou em redor das suas fundações. A primeira solução requer a disponibilidade de espaço exterior adjacente ao edifício onde os tubos possam ser enterrados. Uma vez que esta área nem sempre está disponível, pode ser utilizada uma das outras soluções. Estas duas alternativas procuram recuperar o calor perdido pelo edifício durante o Inverno, mas podem ter um efeito negativo já que expõem a laje e as fundações a temperaturas mais baixas [52]. Para além deste problema, em caso de danificação das tubagens, torna-se mais difícil a sua reparação ou substituição.

A configuração das tubagens desempenha um papel importante no desempenho do sistema, estando a sua escolha dependente do espaço disponível, do volume de escavação necessário e dos requisitos do sistema. A empresa alemã “REHAU”, especialista na instalação de SVG, apresenta três tipos de traçado diferentes (Figura 3.6).

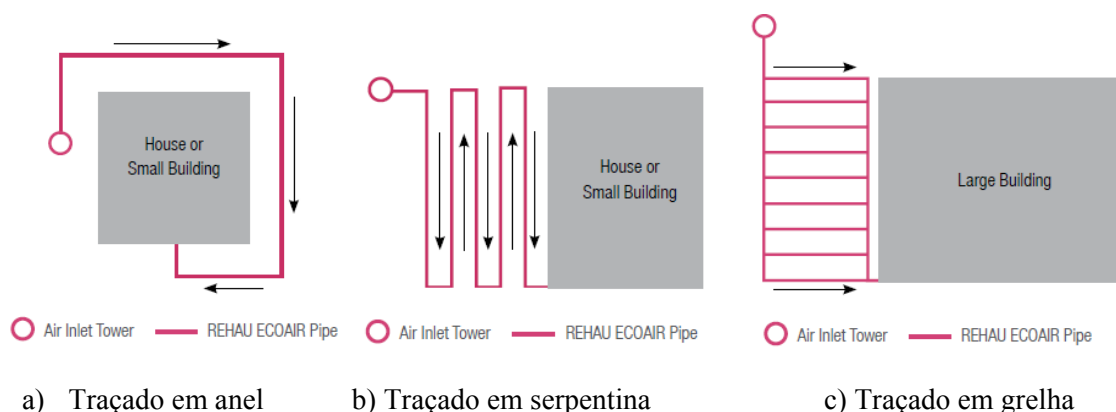


Figura 3.6 – Tipos de configuração da tubagem [23]

O traçado em anel, recomendado para sistemas de menor dimensão, é a solução mais rentável já que, além de exigir um menor número de juntas, as valas escavadas podem ser aproveitadas para a execução das fundações. O traçado em serpentina é ideal para sistemas de média dimensão que requerem um maior comprimento de tubagem. Os SVG de maior dimensão utilizam normalmente um traçado em grelha que permite a passagem de um maior volume de ar devido ao maior diâmetro das tubagens nas duas extremidades da rede. Outra vantagem está no equilíbrio de pressões estabelecido automaticamente ao longo da rede e mesmo que um dos tubos intermédios fique obstruído o funcionamento do sistema não ficará inviabilizado [23].

Além dos SVG existe um outro tipo de permutadores, conhecidos por bombas de calor geotérmicas, que possibilita o aproveitamento da energia geotérmica superficial. Nestes sistemas de circuito fechado, o fluido circulante no interior dos tubos não é o ar, mas uma mistura de água e anticongelante que extrai a energia armazenada no solo e o utiliza para o aquecimento do edifício e produção de águas quentes sanitárias nos meses mais frios (Figura 3.7-a)). Durante o Verão, o funcionamento da bomba é invertido, sendo o calor existente no interior do edifício dissipado no solo (Figura 3.7-b)).

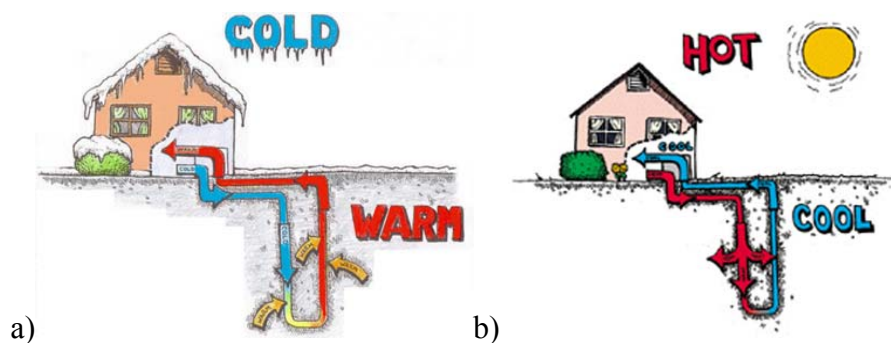


Figura 3.7 – Funcionamento das bombas de calor geotérmicas: a) modo de aquecimento; b) modo de arrefecimento [53]

Os SVG têm diversas vantagens em relação às bombas de calor geotérmicas como [24]:

- Custo inicial inferior;
- Consomem menos energia para funcionar;
- Possibilitam a ventilação do edifício, melhorando a qualidade do ar interior;
- Não utilizam compressores, CFC ou qualquer refrigerante;
- *Design* mais simples que requer menos manutenção.

Como principais desvantagens dos SVG destacam-se [24]:

- Possibilidade de desenvolvimento de microrganismos no interior das tubagens que podem deteriorar a qualidade do ar insuflado;
- Necessidade de criação de mecanismos que permitam a extração da água resultante da condensação do ar húmido no interior das tubagens;
- Menor eficiência, especialmente em períodos de temperaturas extremas, pode implicar a instalação de sistemas auxiliares;
- Ruído do ventilador.

4. CASO DE ESTUDO

O presente caso de estudo teve por base um SVG instalado numa moradia unifamiliar construída pela empresa “Cool Haven” como modelo destinado a evidenciar as potencialidades de um novo conceito de habitação. Atualmente, nesta moradia de tipologia T3 e num pavilhão anexo, funcionam os escritórios desta empresa destinados não só à sua gestão como também ao desenvolvimento de projetos de investigação. Estas edificações encontram-se situadas no parque tecnológico de Antanhol criado pela Câmara Municipal de Coimbra com o objetivo de desenvolver e modernizar o tecido empresarial da região através da criação e instalação de empresas de elevado conteúdo tecnológico.

A “Cool Haven” tem desenvolvido um projeto de investigação e experimentação de novas soluções de construção baseadas num conceito de habitação modular, flexível, resistente e adaptável às necessidades do agregado familiar. Esta conceção procura tornar o edifício autossustentável energeticamente, através da utilização de formas de energia renováveis, e melhorar as suas condições de habitabilidade. É na persecução deste objetivo que se enquadra a utilização dos SVG que permitem a renovação do ar interior e o aproveitamento da energia geotérmica superficial para a climatização de edifícios.

4.1 Descrição da moradia

A moradia de dois pisos, ilustrada na Figura 4.1, foi construída através do sistema LSF, descrito no Capítulo 2.2, que se caracteriza pela sua eficiência, versatilidade, rapidez, simplicidade e economicidade.



Figura 4.1 – Casa modelo e pavilhão anexo da “Cool Haven”

As paredes desta moradia, sejam exteriores ou interiores, são compostas por painéis de OSB e gesso cartonado, constituídas no seu interior por perfis metálicos. Entre a estrutura metálica e os painéis de revestimento foram colocadas mantas de lã de rocha para isolamento térmico e acústico do edifício. No isolamento exterior foi utilizado um sistema ETICS com 50 mm de poliestireno expandido (EPS).

No jardim desta moradia foi instalado um SVG que permite ventilar e climatizar o edifício. Foi ainda colocado um sistema complementar de ar condicionado do tipo “*split*” destinado a ser ativado sempre que a capacidade de climatização do SVG se revelar insuficiente para satisfazer as necessidades do edifício.

4.2 Sistema de ventilação geotérmica

4.2.1 Geometria, materiais e instalação

No dimensionamento do SVG pretendeu-se assegurar uma taxa máxima de renovação horária de ar de $1,6 \text{ h}^{-1}$. O edifício em estudo tem uma área útil de pavimento igual a $50,9 \text{ m}^2$ e um pé-direito médio ponderado de 2,45 m, o que representa um volume interior de 370 m^3 . Com base nestes valores, o caudal de ar que serviu de dimensionamento das tubagens enterradas foi de $600 \text{ m}^3/\text{h}$. A entrada do ar exterior realiza-se através de uma torre que contém um sistema de pré-filtragem do ar que minimiza a admissão de partículas e impurezas suspensas no ar exterior e o seu depósito no interior das tubagens enterradas. O material utilizado nos tubos foi o PVC, pois, apesar da sua condutividade térmica não ser muito alta, tem um preço relativamente baixo, além de dar garantias a nível de resistência e estanquidade.

Tendo em conta os constrangimentos locais e a maximização da eficiência do sistema, foi adotado um traçado em grelha, no qual o caudal ventilado através da tubagem de maior diâmetro ($\phi 250$) é dividido por um conjunto de 7 tubos ($\phi 110$) distanciados entre si de 1 metro, de forma que as suas áreas de influência não se sobreponham. O diâmetro dos tubos foi dimensionado de modo que a velocidade de escoamento do ar no seu interior não excedesse os 3 m/s. Antes da sua entrada no edifício, o ar proveniente das tubagens enterradas passa por um sistema de recuperação de calor de fluxos cruzados que funciona conforme foi explicado no Capítulo 3.3.

A figura seguinte apresenta um esquema da planta do edifício (a vermelho) e do SVG (a azul) instalado no seu jardim. Os pontos T, R F e P assinalam, respetivamente, a localização da torre de admissão de ar, do recuperador de calor, do fosso de drenagem e do pavilhão anexo.

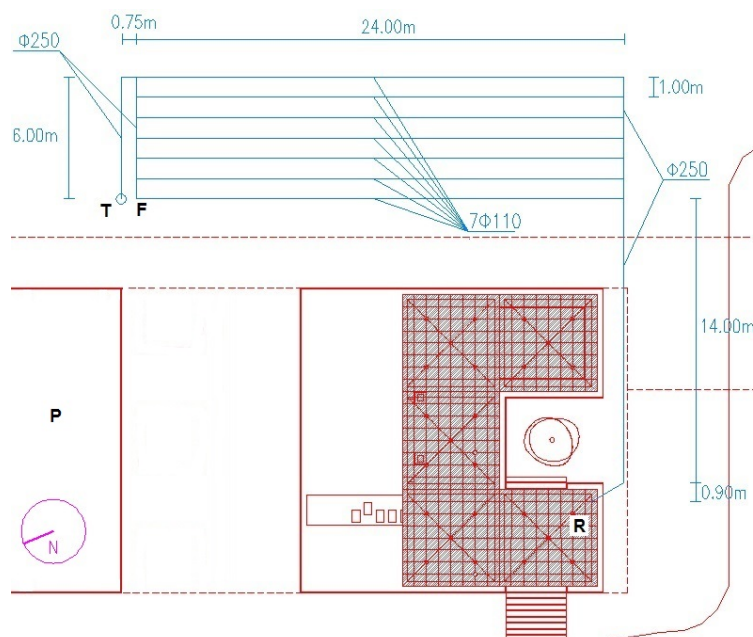


Figura 4.2 – Planta da moradia e do SVG

A profundidade mínima das tubagens é de 1,5 metros e a máxima de 2,0 metros. O sistema encontra-se implantado num planalto, de solo arenoso com alguma argila, pelo que o nível freático estará a uma profundidade suficiente para não interferir no desempenho térmico do sistema. De modo a escoar a água proveniente de condensações e infiltrações, os tubos foram colocados com uma inclinação mínima de 2% na direção do fosso de drenagem de onde é transportada por gravidade até uma linha de água. Os tubos foram envolvidos com solo fino e bem compactado de forma a maximizar as trocas de calor e minimizar a probabilidade de rotura dos tubos (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Instalação das tubagens no solo

O SVG instalado tem dois modos de funcionamento. Nos meses mais frios, dado que o aquecimento proporcionado pelo sistema é insuficiente para atingir a temperatura de conforto do ar interior (20°C), este é apenas ativado quando há necessidade de ventilar o edifício para garantir a qualidade do ar interior. Esta é monitorizada através de sensores de dióxido de carbono que ligam o SVG quando a concentração deste gás excede os limites aconselhados. Nesta situação, o aquecimento do edifício é realizado através dos sistemas de ar condicionado.

Durante o Verão, o SVG é ligado quando existe necessidade de ventilar o edifício e/ou quando a temperatura do ar interior excede os 25°C , considerada como limite da temperatura de conforto na estação de arrefecimento.

4.2.2 Sistema de monitorização

De modo a registar o comportamento térmico do solo e do SVG, foi instalado um sistema de monitorização que permite registar a temperatura do ar exterior, a temperatura do solo em 6 pontos diferentes, a temperatura do ar à entrada e saída das tubagens enterradas, o caudal de ar insuflado no edifício e a energia consumida pelo ventilador.

A temperatura do ar exterior é medida por uma estação meteorológica instalada na cobertura no pavilhão anexo à moradia, tendo sido também colocado um sensor de temperatura à entrada da tubagem enterrada para comparação com os valores registados na estação meteorológica. No solo foram enterrados sensores de temperatura e de humidade a diferentes profundidades e distâncias entre tubos conforme ilustrado na Figura 4.4. Estes sensores foram colocados aproximadamente a meio comprimento do SVG.

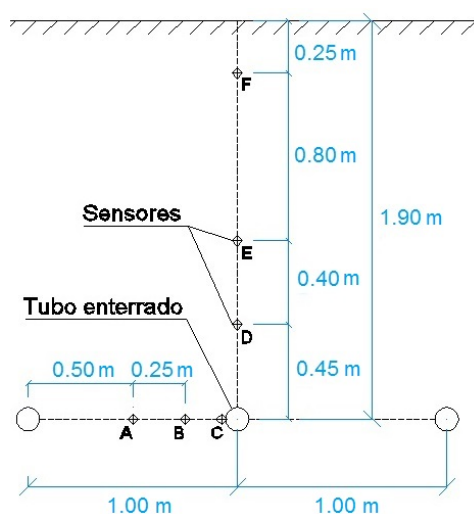


Figura 4.4 – Posicionamento dos sensores de temperatura e humidade no solo

Os sensores enterrados no solo são todos da marca “*Campbell*” (tipo PT100): cinco medem apenas temperatura (modelo 107) e um mede temperatura e humidade (modelo CS650). A temperatura do ar à entrada do SVG é medida através de um termohigrómetro da marca “*Tinytag*” colocado no interior da torre de admissão. Uma sonda PT1000 foi introduzida no interior do tubo imediatamente à saída do solo para medir a temperatura do ar antes da sua entrada no recuperador de calor da marca “*France Air*”(modelo Power box 60) cuja eficiência varia entre os 50 e 60%. O caudal de ar ventilado é medido por um caudalímetro da marca “*TROX*” série VMR de 200 mm, colocado próximo da sonda de temperatura de saída.

5. MODELO DE PREVISÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO GEOTÉRMICA

Neste capítulo é desenvolvido um modelo numérico teórico de previsão da temperatura de saída do ar e do seu potencial de aquecimento ou arrefecimento. Uma vez que os mecanismos de transferência de calor em redor do SVG são bastante complexos, foram assumidas algumas hipóteses simplificativas, incluindo:

- Regime estacionário
- Escoamento hidrodinâmico e termicamente desenvolvido;
- O solo em volta do tubo é homogéneo e a sua condutividade térmica tem um valor constante;
- O tubo não influencia a temperatura do solo que o rodeia, de modo que a temperatura da superfície do tubo é constante na direção axial.

A hipótese de regime estacionário advém do facto de este modelo derivar do inicialmente desenvolvido para o dimensionamento do permutador solo-ar. Admite-se válido para simular uma evolução temporal segundo uma sucessão de estados estacionários, com intervalos de tempo máximos de 1 hora, sendo as temperaturas do solo e do ar à entrada atualizados com os valores horários medidos.

A secção transversal do SVG utilizado no modelo e o seu circuito térmico são representados esquematicamente na Figura 5.1.

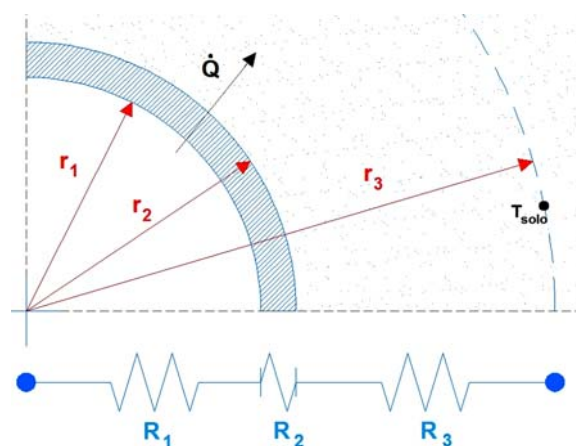


Figura 5.1 – Secção transversal do tubo e circuito térmico do sistema

Neste modelo, a transferência de calor é função de diversas resistências térmicas: por convecção, através do ar circulante (R_1), e por condução, através da espessura do tubo (R_2) e

do solo (R_3). Admitiu-se que o tubo é influenciado pelo solo até um raio (r_3) igual a 0,5 metros, que coincide com o ponto médio entre as tubagens em paralelo. A temperatura do solo neste ponto (T_{solo}) foi utilizada como condição de fronteira para calcular as trocas de calor com o ar circulante no interior do tubo.

A resistência térmica global do sistema à transmissão de calor é obtida através da soma das resistências térmicas parciais dadas pelas seguintes expressões [54]:

$$R_1 = \frac{1}{h_i A_i} \quad R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot L \cdot k_{tubo}} \quad R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot L \cdot k_{solo}} \quad (5.1)$$

A resistência térmica de convecção no interior do tubo (R_1), é função do coeficiente de convecção (h_i) e da sua área interna (A_i). A resistência térmica de condução na parede do tubo (R_2) é obtida segundo as características do tubo, raios externo (r_2) e interno (r_1), comprimento (L) e condutividade térmica (k_{tubo}). Na expressão da resistência térmica condutiva do solo (R_3), k_{solo} corresponde à condutividade térmica do solo e r_3 ao raio de influência do tubo.

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h_i) é obtido a partir da definição de número de *Nusselt* (Nu).

$$h_i = Nu \frac{k_{ar}}{D} \quad (5.2)$$

sendo k_{ar} a condutividade térmica do ar e D o diâmetro do tubo. Por sua vez, o número de *Nusselt* (Nu) é calculado através da correlação de *Gnielinsky* para escoamentos turbulentos [54], válida para $0,5 < Pr < 2000$ e $2500 < Re < 5 \times 10^6$.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.3)$$

O fator de atrito (f) foi obtido a partir da seguinte correlação desenvolvida por *Petukhov*:

$$f = \frac{1}{[0,79 * \ln(Re) - 1,64]^2} \quad Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5.4)$$

em que ν , α e v representam respetivamente a velocidade média do ar, a sua difusividade térmica e viscosidade cinemática.

Uma vez calculadas e somadas as resistências térmicas é possível determinar o coeficiente global de transmissão de calor (U_i).

$$U_i A_i = \frac{1}{\sum_{j=1,2,3} R_j} \quad (5.5)$$

Conhecido este coeficiente, a potência térmica trocada no permutador (\dot{Q}) poderá ser estimada através da seguinte equação de transferência global [54]:

$$\dot{Q} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_{ml} \quad (5.6)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad \Delta T_1 = T_{a,e} - T_s \quad \Delta T_2 = T_{a,s} - T_s \quad (5.7)$$

em que a diferença média logarítmica de temperatura (ΔT_{ml}) depende da temperatura do solo (T_s) e das temperaturas do ar à entrada ($T_{a,e}$) e saída ($T_{a,s}$) do permutador.

Por outro lado, conhecido o caudal mássico de ar (\dot{m}), o valor de \dot{Q} pode também ser obtido através da equação de balanço global:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{a,e} - T_{a,s}) \quad (5.8)$$

Com base nas Equações (5.6) e (5.8), é possível calcular a temperatura do ar à saída do SVG a partir de um balanço térmico a um volume de controlo diferencial no tubo.

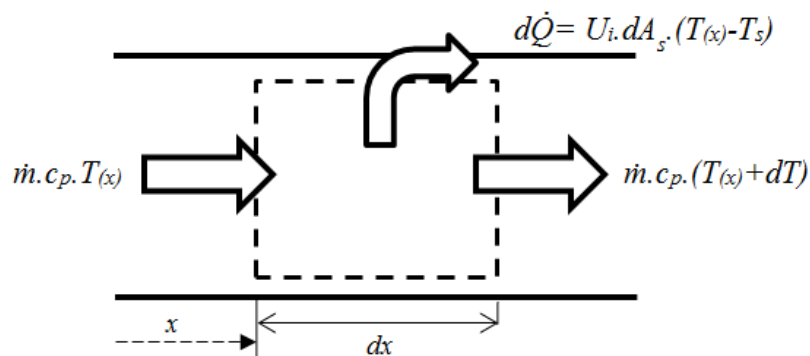


Figura 5.2 – Balanço térmico a um volume de controlo diferencial no tubo

Admitindo que o escoamento ocorre em regime permanente:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{saida}$$

$$\dot{m}.c_p.T_{(x)} = U_i.dA_s.(T_{(x)} - T_s) + \dot{m}.c_p.(T_{(x)} + dT) \quad (5.9)$$

$$(T_{(x)} = T; dA_s = p.dx; p = \pi.D_i)$$

$$- \dot{m}.c_p.dT = U_i.(T - T_s).pdx$$

Separando as variáveis e integrando:

$$\int_{T_{a,e}}^{T_{a,s}} \frac{1}{T - T_s} dT = - \frac{U_i.p}{\dot{m}.c_p} \int_0^L dx$$

$$[\ln(T - T_s)]_{T_{a,e}}^{T_{a,s}} = - \frac{U_i.p}{\dot{m}.c_p} [x]_0^L \quad (5.10)$$

$$\ln\left(\frac{T_{a,s} - T_s}{T_{a,e} - T_s}\right) = - \frac{U_i.A_i}{\dot{m}.c_p}$$

A equação obtida segundo o balanço térmico pode ser simplificada representando a capacidade de transferência NTU (número de unidades de transferência):

$$NTU = \frac{U_i.A_i}{\dot{m}.c_p} = \frac{U_i.A_i}{C} \quad (5.11)$$

Obtém-se, assim, uma expressão que permite prever a temperatura do ar à saída do SVG, a partir das temperaturas do solo e do ar à entrada, supostas constantes num período relativamente curto (tipicamente 1 hora):

$$T_{a,s} = T_s + (T_{a,e} - T_s) \times e^{-NTU} \quad (5.12)$$

5.1 Dados climáticos médios

De modo a prever o desempenho do sistema, foi necessário conhecer as temperaturas médias mensais do ar ambiente e do solo.

As primeiras foram obtidas a partir dos dados climáticos relativos à cidade de Coimbra recolhidos pelo INETI (atual LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia) durante 30 anos. O programa “EnergyPlus” permite, com base nestes dados, prever a temperatura média do solo a 2 metros de profundidade, baseando-se para tal na seguinte fórmula desenvolvida por Kusuda e Achenbach [36].

$$T_{solo}(P, t_{ano}) = T_{média} - T_{amp} \times \exp\left(-P \sqrt{\frac{\pi}{365 \times \alpha}}\right) \times \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t_{ano} - t_{min} - \frac{P}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \times \alpha}}\right)\right] \quad (5.13)$$

em que a temperatura do solo (T_{solo}) à profundidade P num determinado dia do ano (t_{ano}) é função da temperatura ambiente média anual ($T_{média}$), do dia do ano com a temperatura ambiente mínima (t_{min}), da amplitude térmica anual do ar à superfície (T_{amp}) e da difusividade térmica do solo (α).

Estes investigadores descobriram que a temperatura do solo (T_{solo}) a uma dada profundidade (P) varia de forma sinusoidal com o tempo e é influenciada pelas flutuações da temperaturas do ar à superfície. Os erros gerados por esta expressão são normalmente inferiores a $\pm 1,1^{\circ}\text{C}$, razão pela qual é frequentemente utilizada em estudos de previsão do comportamento de SVG [32][36][56]. A Figura 5.3 apresenta a temperatura média mensal do ar ambiente dos últimos 30 anos (a azul) e a temperatura média mensal do solo a 2 metros de profundidade prevista através da expressão (5.13) (a vermelho).

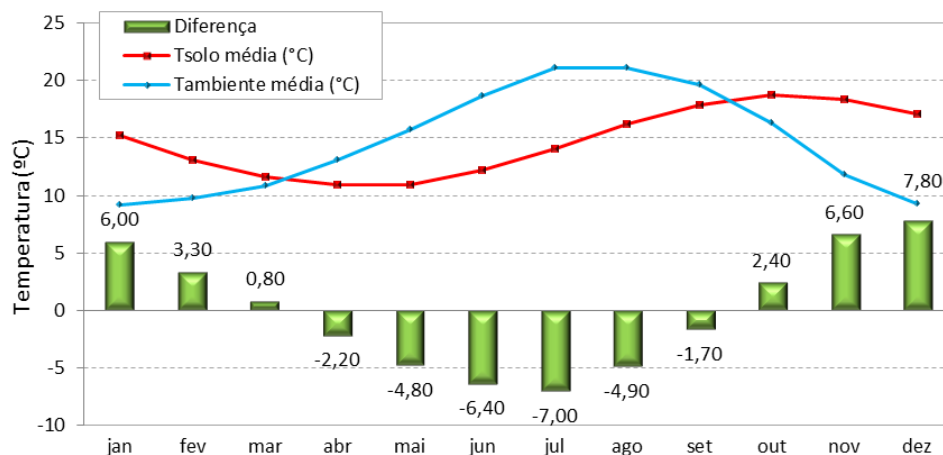


Figura 5.3 – Temperatura média mensal prevista do ar e do solo a 2 metros de profundidade e respetivas diferenças

5.2 Análise de viabilidade

Antes da instalação do SVG foi realizada uma análise expedita de viabilidade através da ponderação entre os potenciais ganhos decorrentes da sua utilização e os custos relativos à sua implantação. Dado que nesta altura ainda não estavam disponíveis dados climáticos registados no local, nesta análise foram considerados os dados teóricos apresentados na Secção 5.1.

Na previsão dos benefícios proporcionados pelo sistema foi assumido que este estaria em funcionamento 12 horas por dia durante 3 meses de Inverno e 3 meses de Verão. Nestes 6 meses, a diferença entre as temperaturas do ar e do solo (apresentadas na Figura 5.3) foi em média igual a 6,45°C (valor obtido com o módulo das diferenças). Utilizando a Equação (5.8) e admitindo um caudal de ar igual a 600 m³/h, prevê-se que o sistema deva proporcionar uma potência térmica média de 1013 W. Considerando um consumo médio do ventilador igual a 380W, prevê-se um COP médio igual a 2,66.

5.3 Dados climáticos: médios *versus* registados *in situ*

De modo a estudar o potencial do SVG foram analisados os dados recolhidos pelo sistema de monitorização durante o ano de 2013. O gráfico da Figura 5.4 apresenta as temperaturas médias do solo (Sensor A ilustrado na Figura 4.4), do ar ambiente (estação meteorológica) e as respetivas diferenças registadas em cada mês.

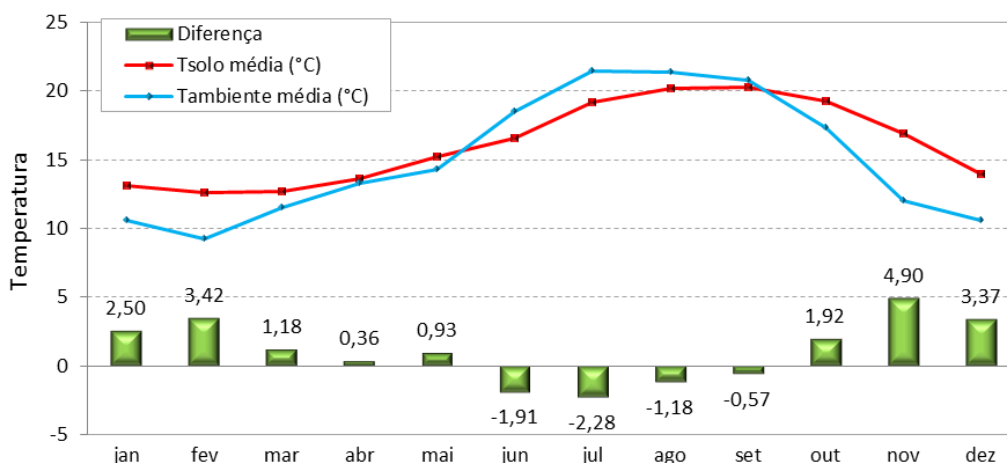


Figura 5.4 – Temperatura média mensal do ar ambiente e do solo a 1,9 metros de profundidade e respetivas diferenças

Numa primeira análise do gráfico verifica-se que a amplitude térmica do solo é menos acentuada que a do ar ambiente, confirmando o fenómeno de amortecimento resultante da

grande inércia térmica do solo, descrito no Capítulo 3.2. Também se constata a existência de um atraso temporal de aproximadamente um mês entre a temperatura ambiente e a do solo.

O gráfico da Figura 5.4 pode ser comparado com o da Figura 5.3 no qual se encontram representadas as previsões que serviram de base à análise de viabilidade do sistema. O gráfico da figura seguinte permite comparar a temperatura média do ar ambiente registada pelo INETI nos últimos 30 anos e a registada no presente estudo.

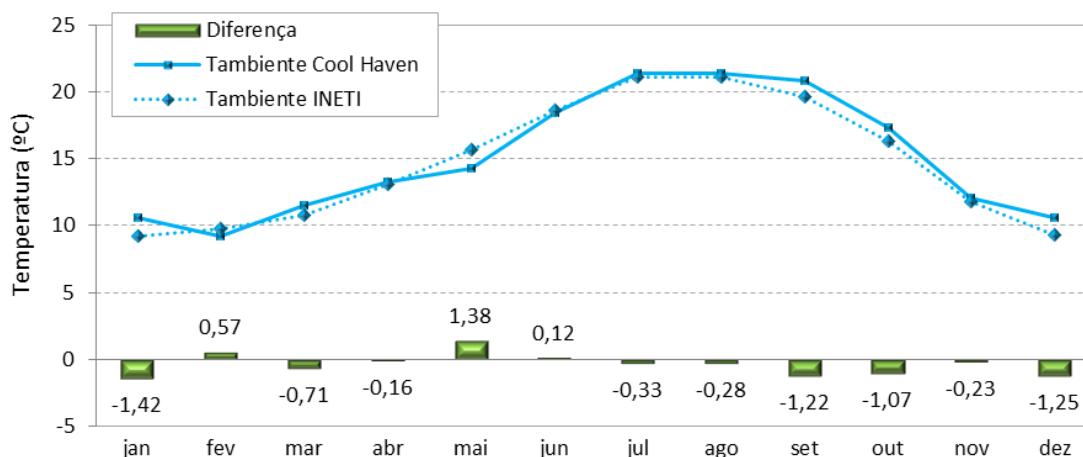


Figura 5.5 – Temperatura média do ar ambiente registada pelo INETI nos últimos 30 anos e a registada no presente estudo e respetivas diferenças.

Como se pode observar, a temperatura ambiente registada neste estudo ($T_{média} = 15,1^{\circ}\text{C}$) assemelha-se à dos últimos 30 anos da cidade de Coimbra ($T_{média} = 15,2^{\circ}\text{C}$). Assim sendo, as temperaturas médias do solo previstas pela Equação (5.13) deveriam aproximar-se às registadas na “Cool Haven”. No entanto, o gráfico seguinte permite observar que há uma diferença considerável entre estas duas temperaturas.

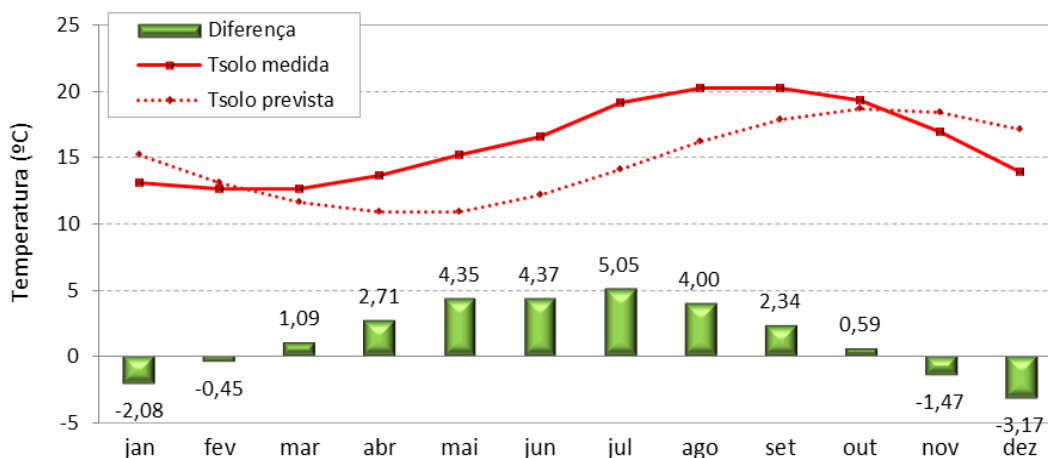


Figura 5.6 – Temperatura média do solo a 1,9 metros de profundidade registada no Sensor A, temperatura média do solo a 2 metros de profundidade prevista [36] e respetivas diferenças.

A comparação das curvas permite observar um desfaseamento entre a temperatura do solo prevista e a registada de aproximadamente dois meses. Ao procurar interpretar estes resultados, foi analisada a fórmula de previsão da temperatura do solo: Equação (5.13). A forma da curva é determinada pela variáveis $T_{média}$, T_{amp} , P e α . O posicionamento desta curva no eixo horizontal é definido pelo t_{min} , ou seja, o dia do ano em que se regista a temperatura mínima. Esta pode ocorrer em qualquer um dos dias de Inverno, levando à translação da curva num sentido ou noutro. O gráfico seguinte permite observar que, se atrasarmos 2 meses a temperatura do solo prevista (equivalente a subtrair 60 dias a t_{min}), as curvas ficam praticamente sobrepostas. Tal indica que o erro de previsão não foi devido à temperatura ambiente ($T_{média}$ e T_{amp}) nem ao valor da difusividade térmica do solo utilizada (α), mas ao momento da ocorrência da temperatura ambiente mínima (t_{min}), que tem um impacto enorme nos resultados obtidos.

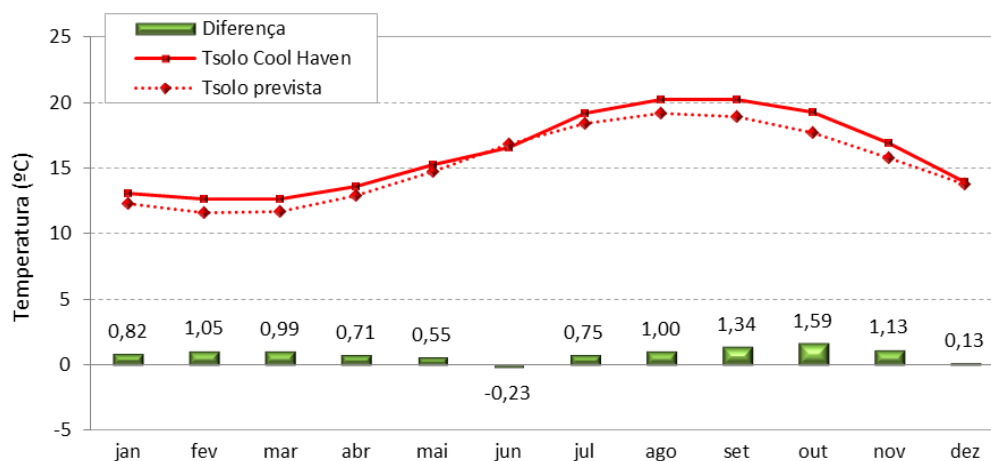


Figura 5.7 – Temperatura média do solo a 1,9 metros de profundidade registada na “Cool Haven”, temperatura média prevista do solo a 2 metros de profundidade [36], com um atraso de 2 meses e respetivas diferenças.

Esta análise permite constatar que a fórmula de Kusuda e Achenbach [36] é bastante sensível à variação da temperatura mínima anual e pode produzir erros bem superiores aos encontrados na bibliografia. Sendo esta a fórmula mais utilizada na previsão da temperatura do solo e do comportamento dos SVG, é possível verificar a dificuldade na previsão fiável destes valores e consequentemente na realização de uma análise de viabilidade realista. A incerteza associada à temperatura do solo e também à temperatura ambiente faz com que exista sempre um risco associado à instalação destes sistemas, não existindo garantias absolutas quanto ao seu futuro desempenho.

5.3.1 Análise do desempenho do sistema de ventilação geotérmica

Nesta secção será analisado o desempenho do SVG em estudo durante o ano de 2013. Deve ser tido em conta que este não esteve ligado de forma contínua, uma vez que, funcionando o edifício como escritórios, o sistema era sobretudo ativado durante o período diurno. Por esta razão, a análise que a seguir se apresenta teve por base apenas a informação registada pelo sistema de monitorização durante os períodos de funcionamento do SVG.

Na avaliação do seu desempenho foi considerado o consumo energético do ventilador, o caudal de ar ventilado e as temperaturas do ar à entrada e saída do SVG. O caudal de ar insuflado só começou a ser registado a partir do dia 20 de Fevereiro de 2013, pelo que, antes dessa data, não foi analisado o desempenho do sistema. O registo do consumo energético do ventilador foi apenas iniciado no dia 14/05, tendo-se admitido que, no período anterior a esta data, sempre que o caudal ventilado excedia os 160m³/h eram consumidos 380Wh de energia elétrica. Este valor coincide com a média dos consumos registados durante o resto do ano.

Deve ainda mencionar-se que entre os dias 21/08 e 16/10 o termohigrómetro colocado à entrada do SVG não registou novos dados, pelo que se assumiu que a temperatura do ar à entrada no SVG coincidia com a medida pela estação meteorológica.

O quadro seguinte apresenta a variação mensal de alguns parâmetros relevantes para a avaliação do desempenho do SVG, nomeadamente: da diferença entre a temperatura média do solo e temperatura média ambiente, do COP médio, do balanço energético, do número de horas de funcionamento do sistema e da potência equivalente.

Quadro 5.1 – Variação mensal de alguns parâmetros relevantes para a avaliação do desempenho do SVG

Mês	T _{solo} , média – T _{amb} , média (°C)	COP _{médio}	Balanço energético (kWh)	Tempo de funcionamento (horas)	Potência equivalente (W)
Janeiro	2,50	-	-	-	-
Fevereiro	3,42	0,96	-3,10	200	-15,60
Março	1,18	0,43	-80,30	364	-220,61
Abril	0,36	0,67	-11,17	86	-129,89
Maio	0,93	0,56	-24,42	145	-168,39
Junho	-1,91	0,86	-12,41	205	-60,53
Julho	-2,28	1,29	42,47	378	112,37
Agosto	-1,18	1,46	36,44	203	179,52
Setembro	-0,57	1,68	43,38	159	272,85
Outubro	1,92	0,60	-21,72	155	-140,16
Novembro	4,90	1,04	2,12	93	22,80
Dezembro	3,37	0,58	-3,55	25	-141,81

A primeira coluna apresenta a diferença entre temperatura média ambiente e a temperatura média do solo. A coluna “COP” apresenta a média mensal do coeficiente de desempenho, ou seja a razão entre a energia térmica fornecida pelo SVG e a energia elétrica consumida pelo ventilador. Como se pode observar neste quadro, ao mês com maiores diferenças de temperatura não corresponde necessariamente o maior COP. Tal deve-se ao facto de o COP ter sido analisado apenas para os períodos de funcionamento do SVG e o cálculo da primeira coluna incluir todas as temperaturas médias horárias de cada mês.

Relativamente ao balanço energético e à potência equivalente, estes foram calculados através das seguintes fórmulas:

$$\text{Balanço energético (kWh)} = \sum (\dot{Q} - \dot{W}) \times 1h / 1000 \quad (5.14)$$

$$\text{Potência equivalente (W)} = \frac{\sum (\dot{Q} - \dot{W}) \times 1h}{\Delta t} \quad (5.15)$$

em que Δt é o número de horas de funcionamento do sistema.

Da análise destes parâmetros verifica-se que o funcionamento do SVG só foi favorável, do ponto de vista energético, durante os meses de Julho, Agosto, Setembro e Novembro quando o COP foi superior a um e o balanço energético e a potência equivalente foram positivos. Concluindo-se assim que a eficiência deste sistema é superior na estação de arrefecimento.

Analisando o desempenho global durante estes 11 meses, obtém-se um COP médio e uma potência equivalente média iguais a 0,92 e -26,31 W, respetivamente. Neste período, a diferença entre a energia total trocada no permutador e a consumida pelo sistema de ventilação foi de -32,25 kWh. Estes resultados permitem demonstrar a necessidade e a importância do controlo do funcionamento do SVG para otimização do mesmo, evitando-se assim consumos energéticos desnecessários. Pode-se assim confirmar que durante este período o sistema ainda não estava devidamente configurado, em particular na estação de aquecimento.

Foi também calculada a eficiência (ε) do permutador através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{T_{ar,entrada} - T_{ar,saida}}{T_{ar,entrada} - T_{solo}}, \quad \varepsilon=0 \rightarrow T_{ar,entrada} = T_{ar,saida}, \quad \varepsilon=1 \rightarrow T_{ar,saida} = T_{solo} \quad (5.16)$$

No cálculo da eficiência média foram excluídos os períodos em que este parâmetro saía do intervalo esperado ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), tendo-se obtido um valor igual a 79%, que indica uma boa eficiência do SVG.

De modo a compreender as variações de desempenho do SVG ao longo dos vários meses do ano serão de seguida analisados quatro períodos típicos de funcionamento: Inverno, Primavera, Verão e Outono.

5.3.2 Inverno

Para estudar o comportamento do SVG durante o Inverno foram selecionados dois dias durante os quais o sistema esteve em funcionamento contínuo (dia e noite), sendo este um bom exemplo da deficiente configuração do sistema de controlo do SVG, neste período inicial do seu funcionamento. O gráfico seguinte apresenta a variação do coeficiente de desempenho (COP), da temperatura do solo e das temperaturas do ar à entrada e saída do sistema entre os dias 25 e 26 de Fevereiro.

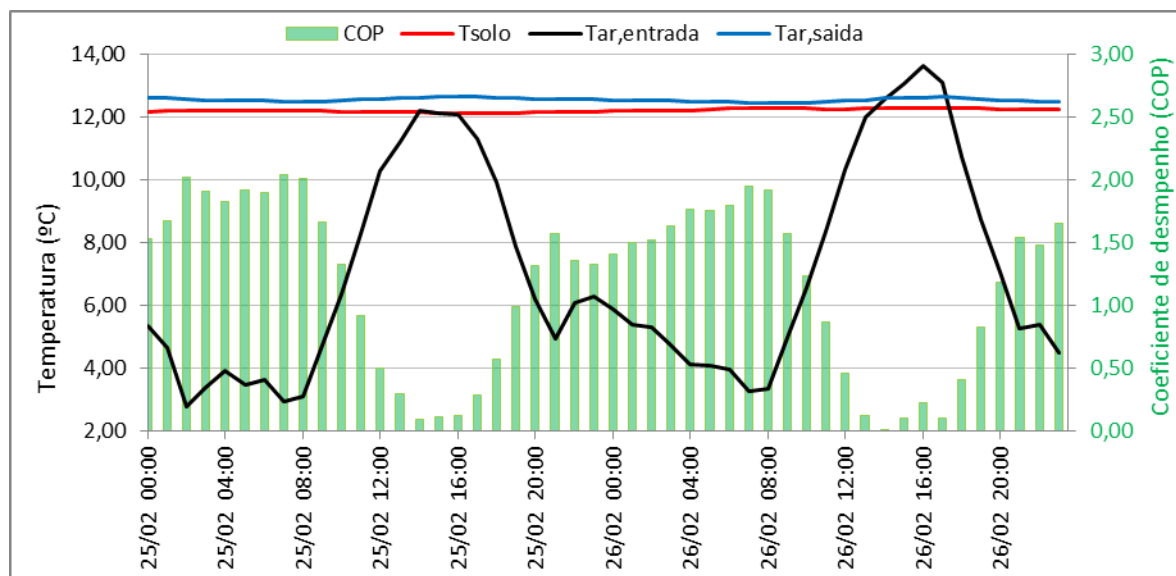


Figura 5.8 – Variação horária do COP durante os dias 25 e 26 de Fevereiro (Inverno)

Uma primeira observação deste gráfico faz ressaltar que a temperatura do solo é sempre inferior à temperatura ideal de conforto (20°C). Esta situação verificou-se durante todo o Inverno pelo que, durante esta estação, o aquecimento do edifício deve ser realizado sobretudo através dos aparelhos de ar condicionado, cabendo ao SVG reduzir as perdas de calor relacionadas com a renovação do ar interior, através do pré-aquecimento do ar insuflado.

Analisando o funcionamento do permutador verifica-se que este tem um comportamento diferenciado durante o período diurno e noturno. Durante o dia, quando a temperatura do ar à entrada do SVG atinge os seus valores máximos (12,2°C às 14h do dia 25 e 13,6°C às 16h do 26) é mínima a diferença entre esta e a temperatura do solo. No período noturno, devido ao arrefecimento do ar exterior, ocorre um aumento da diferença entre a temperatura do solo e a temperatura de entrada do ar. Nestas circunstâncias, o COP do sistema durante a noite é superior ao registado no período diurno.

Constata-se assim que o perfil de desempenho do sistema não se coaduna com o modo de ocupação do edifício (escritórios) que é utilizado apenas durante o dia, sendo mais favorável na estação de aquecimento caso a ocupação fosse do tipo residencial (maioritariamente à noite). Deste modo se explica que, apesar das diferenças entre a temperatura média do solo e a temperatura média ambiente serem elevadas durante o Inverno, o COP médio seja inferior a 1. Pode-se observar, como exemplo no Quadro 5.1, o mês de Fevereiro em que, para uma diferença igual a 3,42°C, foi registado um COP de apenas 0,96.

No gráfico da Figura 5.8 pode-se também observar a existência de um período em que a temperatura exterior excede a do solo. Nesta situação, não se justifica o funcionamento do sistema uma vez que a temperatura do ar à sua saída é ainda mais baixa que a temperatura exterior, pelo que seria preferível renovar o ar interior do edifício através da ventilação natural.

De notar ainda que a temperatura do ar à saída do sistema foi sempre superior à temperatura do solo. Tal facto vai contra o que seria de esperar pois, sendo a temperatura de entrada do ar inferior à do solo, a temperatura do ar à saída do SVG não deverá ser superior à registada no solo. Esta situação verificou-se não só nos dois dias ilustrados pelo gráfico como também em grande parte dos períodos de aquecimento registados. Foi estudada hipótese deste problema ser causado pelos sensores de temperatura, o que levou a que fosse revisto o seu funcionamento. Constatou-se que os sensores do solo a 1,9 metros de profundidade (A, B e C) apresentavam valores aproximadamente iguais e que o sensor de temperatura de saída, depois de testado com recurso a um termopar, funcionava corretamente. Uma vez que os sensores de temperatura do solo estão enterrados sensivelmente a meio do comprimento das tubagens, existe a possibilidade de, entre este ponto e o local de medição do ar à saída, haver um aumento da temperatura do solo que provoque este sobreaquecimento. Porém, nas últimas medições efetuadas esta anomalia deixou de ocorrer, suspeitando-se que estivesse relacionada com o dispositivo de recuperação de calor do ar extraído do edifício, em particular com o “*by pass*”.

5.3.3 Primavera

Durante a Primavera (Março, Abril e Maio), a diferença entre as temperaturas médias do solo e do ar exterior são relativamente baixas, como se pode observar no Quadro 5.1. No gráfico da figura seguinte é apresentado o comportamento do SVG em dois dias de Primavera (27 e 28 de Março), durante os quais o sistema esteve em funcionamento contínuo.

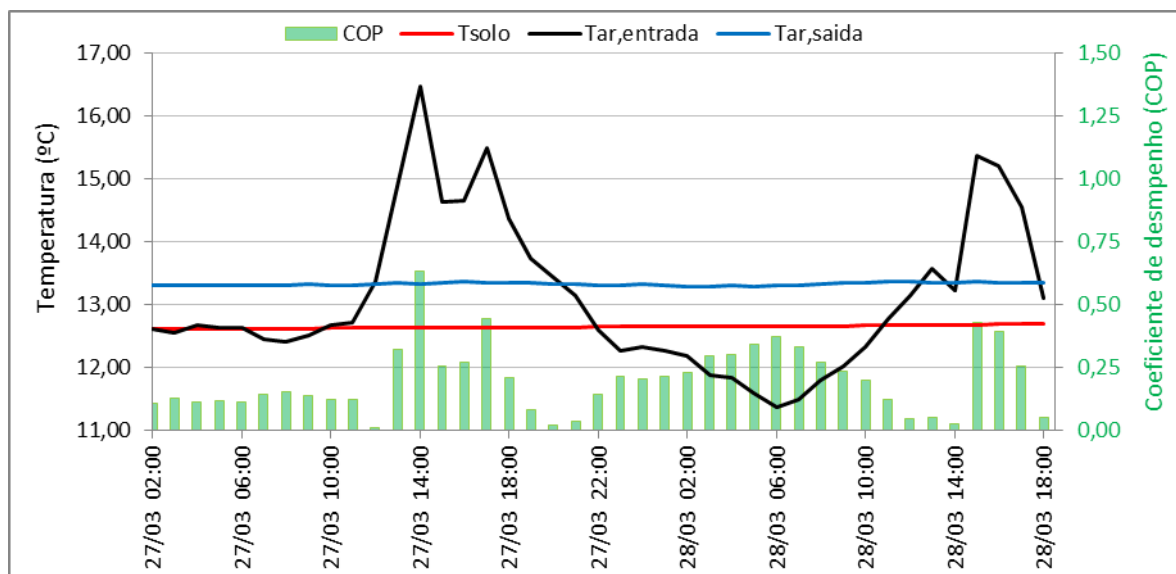


Figura 5.9 – Variação horária do COP entre os dias 27 e 28 de Março (Primavera)

Verifica-se que o sistema apresenta um baixo desempenho durante este período, com um COP médio de 0,2. Este valor é consequência da baixa amplitude térmica diária (5°C) e da reduzida diferença entre a temperatura média do solo e do ar à entrada do SVG (0,45°C), espectável nesta estação de transição entre a estação de aquecimento e a de arrefecimento, originando um baixo desempenho do sistema.

5.3.4 Verão

O gráfico seguinte apresenta o funcionamento do SVG em dois dias de Verão: 30 de Junho e 1 de Julho, onde o sistema funcionou 24 horas por dia.

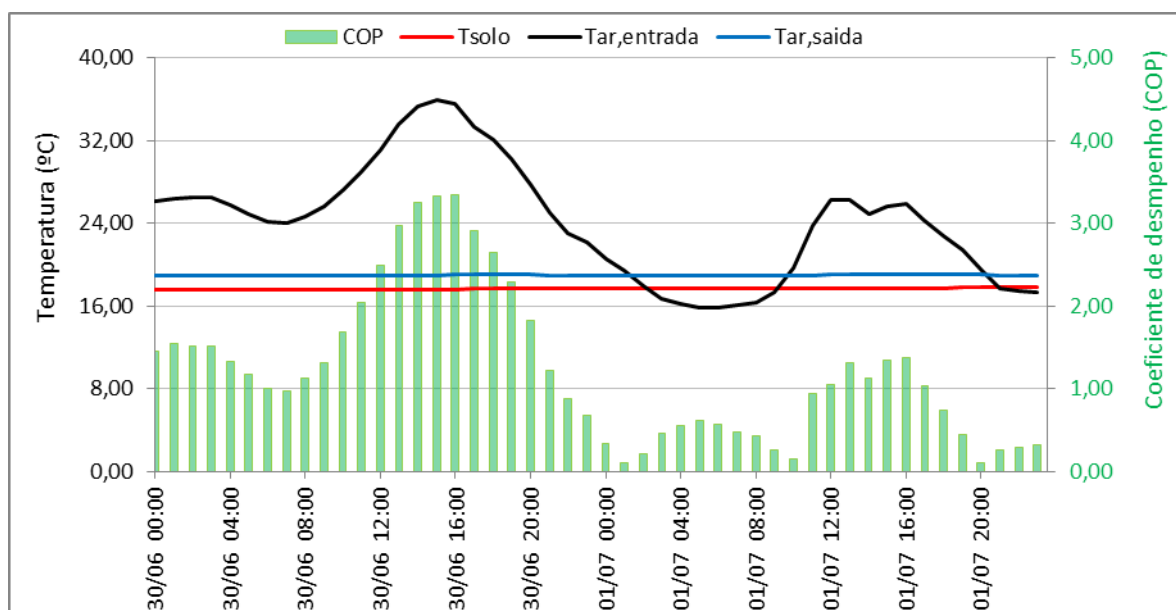


Figura 5.10 – Variação horária do COP entre os dias 30 de Junho e 1 de Julho (Verão)

Como se pode observar, a amplitude térmica nestes dois dias foi bastante elevada (20°C), refletindo-se num COP médio superior a 1 (1,23) que justifica o funcionamento do SVG. No período diurno a elevada temperatura exterior permitiu que o sistema atingisse um COP bastante elevado (3,3). Durante a noite, o arrefecimento do ar ambiente conduziu ao decréscimo do desempenho do SVG, chegando mesmo a verificar-se um período de aquecimento do ar exterior. Nestas condições, seria preferível arrefecer o edifício através de ventilação natural.

Ao contrário do que ocorre no Inverno, o período de maior potencial de desempenho do SVG coincide com o de ocupação do edifício (neste caso escritórios). Por esta razão se explica que, apesar das diferenças térmicas entre o ar exterior e o solo serem superiores durante o Inverno, o COP mais alto seja registado no Verão. No caso de um edifício residencial, em que o período de ocupação ocorre predominantemente durante a noite, poderá verificar-se uma inversão destes valores, ou seja, um COP superior no Inverno e um COP inferior no Verão.

5.3.5 Outono

A estação de Outono revelou-se uma época atípica em que o Verão se estendeu pelo mês de Setembro, com a temperatura exterior a atingir os 33°C em alguns dias e um COP máximo de 5,03 que explicam o facto de, apesar da diferença entre a temperatura média do solo e do ar ambiente ser bastante reduzida neste mês (-0,57°C) este ser o período do ano em que o sistema apresentou melhor desempenho (COP= 1,68).

Também o mês de Novembro, pelo facto de ter apresentado temperaturas baixas, próximas das do Inverno ($T_{amb,média}=12,03^{\circ}\text{C}$), não pode ser considerado como representativo da estação de Outono.

Por estas razões, nesta análise serão consideradas as temperaturas registadas durante o mês de Outubro, apesar dos períodos de funcionamento contínuo do sistema serem relativamente curtos. O gráfico seguinte apresenta a variação do desempenho do sistema num período de 12 horas do dia 17 de Outubro.

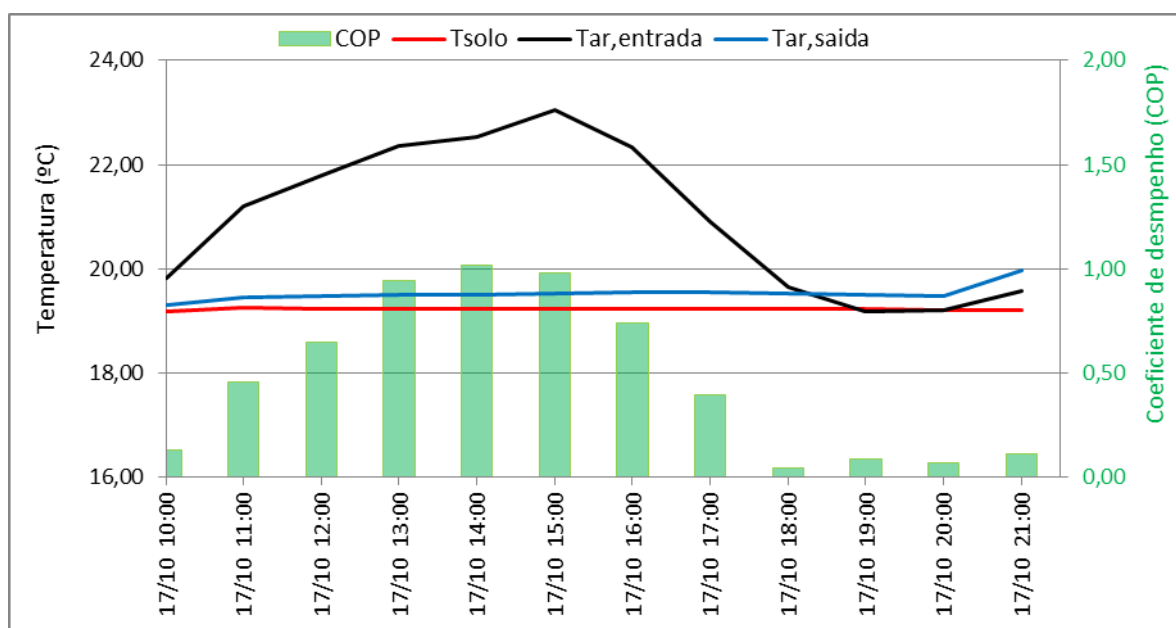


Figura 5.11 – Variação horária do COP no dia 17 de Outubro (Outono)

Tal como sucedeu durante a Primavera, as diferenças entre as temperaturas médias do solo e a ambiente não são suficientes para justificar o funcionamento contínuo do sistema, que registou um COP médio de 0,5 durante o período em estudo (Figura 5.11). Para além disso, a temperatura do ar à entrada do SVG encontra-se dentro do intervalo de conforto ($20\text{-}25^{\circ}\text{C}$) no período de ocupação do edifício, pelo que o seu arrefecimento é desnecessário.

5.4 Validação do modelo de cálculo

Neste subcapítulo, o modelo de cálculo de previsão da temperatura do ar à saída do SVG, apresentado no início do Capítulo 5, é validado por comparação com resultados experimentais. Como já foi explicado, a previsão do modelo é realizada com base na temperatura do solo, no caudal de ar ventilado, nas características das tubagens, no tipo de solo e na temperatura do ar à entrada do sistema.

Apesar do solo que envolve as tubagens ser heterogéneo e a sua condutividade térmica variar no tempo e no espaço, foram assumidas as seguintes hipóteses:

- Temperatura não perturbada do solo (T_{solo} na Figura 5.1, pág.35) é constante na direção axial e igual ao valor registado pelo sensor A;
- Condutividade térmica do solo constante e igual a 1,2 W/(m.K);

A condutividade térmica utilizada foi obtida através de iterações de modo a minimizar o erro do modelo. O seu valor encontra-se no intervalo definido para areia húmida (0,25 a 2 W/(m.K)) e argila saturada (0,6 a 2,5 W/(m.K)), o que indica que o solo tem um teor de água algo elevado [57].

Uma vez que foi adotado um traçado em grelha, o caudal de ar ventilado e a sua velocidade não irão ser os mesmos ao longo de todo o comprimento das tubagens. Deste modo, o cálculo da temperatura de saída tem que ser feito por troços. O esquema da Figura 5.12 apresenta os troços definidos para este cálculo.

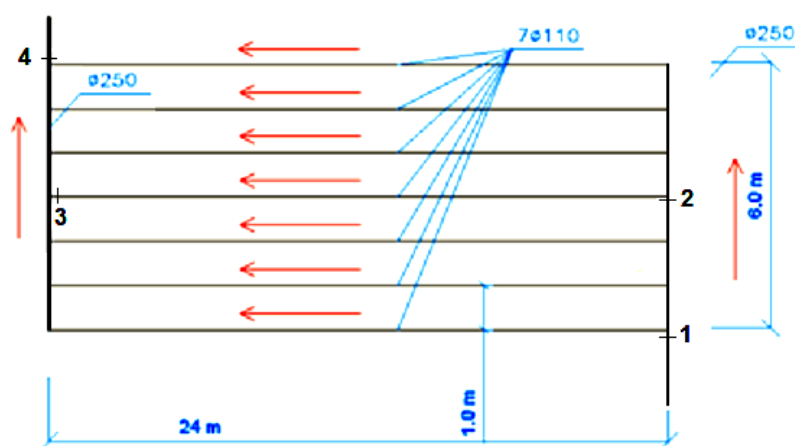


Figura 5.12 – Traçado das tubagens enterradas com os troços definidos para o cálculo da temperatura de saída do ar

Considerou-se que o caudal de ar (\dot{V}) circulante na conduta de admissão (até ao ponto 1) era igualmente distribuído pelos 7 tubos paralelos, de menor diâmetro. Deste modo, admitiu-se que entre os pontos 2 e 3 o caudal seria igual a $\dot{V}/7$ e nos troços 1-2 e 3-4 circulava aproximadamente metade do caudal total. Na conduta de insuflação (do ponto 4 até ao interior da casa), o caudal volta a ser igual a \dot{V} .

Utilizando a temperatura do ar à saída do primeiro troço como temperatura de entrada do segundo troço, e assim sucessivamente, foi possível obter uma previsão da temperatura do ar à saída do SVG.

Os dados experimentais utilizados para a validação do modelo foram recolhidos entre os dias 19/11/2013 e 20/11/2013. Esta escolha deve-se ao facto de, neste período, o sistema ter funcionado durante 29 horas consecutivas e de acordo com o esperado. Ao contrário do que se passava anteriormente em situação de aquecimento, a temperatura de saída do ar registada neste período foi inferior à temperatura do solo, tornando estes resultados mais fiáveis. De seguida, é apresentado um gráfico que compara a temperatura de saída do ar prevista pelo modelo com a medida na instalação em estudo.

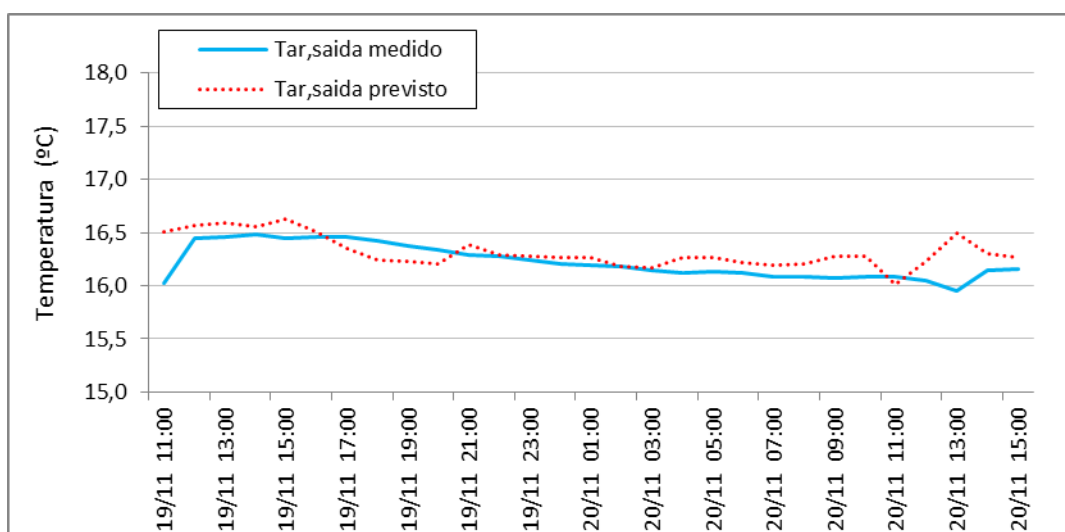


Figura 5.13 – Gráfico de comparação entre a temperatura de saída do ar prevista pelo modelo e a medida na instalação em estudo entre os dias 19 e 20/11/2013

A previsão realizada pelo modelo aproxima-se bastante dos resultados experimentais, com erro padrão igual a apenas 0,18°C, que indica que o modelo é válido para a previsão da temperatura do ar à saída do SVG.

Apesar de durante grande parte do ano os valores medidos da temperatura de saída do ar não terem sido os esperados, nomeadamente em situação de aquecimento, o modelo conseguiu nos restantes períodos de medições fazer previsões com um erro padrão bastante satisfatório igual a 0,80°C.

6. ESTUDO PARAMÉTRICO

No dimensionamento de um SVG deve ser levado em conta não só o local onde este será implantado e as características do edifício ao qual será ligado, como também o efeito que os parâmetros de dimensionamento vão ter no seu comportamento térmico. Este é um processo rigoroso e bastante complexo que envolve a otimização de uma série de variáveis intervenientes no funcionamento do dispositivo. Um melhor conhecimento acerca da influência de cada parâmetro permitirá a realização de um dimensionamento mais eficiente e económico.

Através da utilização do modelo de cálculo apresentado no Capítulo 5 é possível analisar a sensibilidade do desempenho do permutador à variação de cada um dos parâmetros. O estudo paramétrico teve por base um troço do permutador com as seguintes dimensões e propriedades:

Quadro 6.1 – Dimensões e propriedades do troço estudado

Comprimento do tubo, L (m)	24,0
Diâmetro, D (mm)	110,0
Espessura, e (mm)	2,7
Condutividade térmica do tubo, k_{PVC} (W/(m.K))	0,17
Condutividade térmica do solo, k_{solo} (W/(m.K))	1,2

Admitiu-se ainda um caudal de ar ventilado igual ao caudal de dimensionamento (600/7 tubos = 85,71 m³/h) que circula a uma velocidade de 2,77 m/s. Os valores apresentados irão ser alterados ao longo deste estudo, consoante o parâmetro que se pretende estudar.

De seguida apresentam-se os parâmetros analisados e os respetivos valores utilizados na simulação. A “*bold*” estão assinalados os valores que coincidem com os do troço do SVG instalado, que foi objeto de estudo.

Quadro 6.2 – Parâmetros analisados e respetivos valores [57]

Comprimento (m)	10	20	24	30	40	50	60	70
Velocidade (m/s)	1,00	2,00	2,77	3,00	4,00	5,00		
Diâmetro (m)	0,10	0,11	0,15	0,20	0,25	0,30		
Espessura (mm)	2,0	2,7	5,0	7,5	10,0			

Material	PVC		Betão		Aço	
Condutividade térmica (W/(m.K))	0,17		0,5		43	
Tipo de solo	Areia/Argila seca	Areia/Argila húmida	Areia húmida/Argila seca	Solo "Cool Haven"	Areia/Argila saturada	Areia saturada
Condutividade térmica (W/(m.K))	0,15	0,5	1,0	1,2	2,0	3,0
Configuração da tubagem	Forma de anel/serpentina			Forma de grelha		

As simulações do desempenho do SVG foram realizadas tendo por base as temperaturas do solo (sensor A) e do ar à entrada do sistema apresentadas nos gráficos das Figuras Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11, referentes às quatro estações do ano. Uma vez que no período de Outono o sistema esteve em funcionamento contínuo durante apenas 11 horas (10:00 às 21:00), nas restantes estações irão ser analisadas as temperaturas registadas neste mesmo período. No Inverno foi estudado o dia 25 de Fevereiro e no Verão o dia 1 de Julho.

A influência de cada parâmetro no desempenho do SVG será quantificada através do somatório da energia trocada no permutador durante o período em estudo:

$$Q = \sum_i (\Delta t_i \cdot \dot{Q}_i) \quad (6.1)$$

em que Δt é o período de funcionamento e \dot{Q} é obtido através da equação (5.6), onde a temperatura de saída é prevista através da fórmula (5.12).

6.1 Comprimento do tubo

O comprimento do tubo influi no tempo de contacto entre o ar fresco proveniente do exterior e a superfície interna da tubagem. O gráfico seguinte apresenta a energia trocada no permutador (Q) em função do comprimento total da tubagem (L). A linha vertical a tracejado assinala o comprimento do troço do SVG em estudo ($L=24$ m).

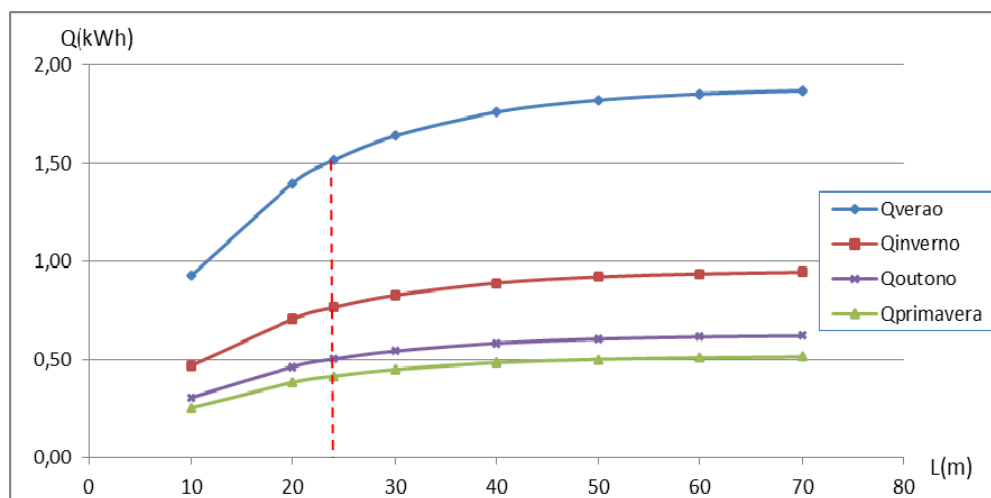


Figura 6.1 – Energia trocada nas quatro estações em função do comprimento da tubagem

Como se pode verificar, o aumento do comprimento do troço estudado ($L=24\text{m}$) produziria um acréscimo nas trocas energéticas entre o ar e solo, porém não muito significativo.

Os resultados previstos pelo modelo indicam que, quanto maior for a extensão do tubo, maiores serão as trocas de calor realizadas ao longo o seu percurso. Devido ao maior tempo de permanência do ar no interior da tubagem enterrada, ele será mais aquecido durante o Inverno e mais arrefecido no Verão.

No entanto, verifica-se que, a partir dos 40 metros de extensão, o acréscimo de energia proporcionado por cada metro de tubagem adicionada baixa significativamente. Tal significa que o investimento em SVG de maior comprimento não justifica os custos adicionais associados à sua instalação.

Tal como foi observado no ponto 5.3.1, a energia trocada nas estações de Outono e de Primavera é bastante reduzida quando comparada com o período de Inverno e, principalmente, com o de Verão. Este facto deve-se à pequena diferença entre a temperatura do solo e do ar exterior que condiciona o desempenho do SVG naquelas estações. A diferença entre as curvas de Verão e de Inverno justifica-se face ao período analisado neste estudo ser diurno que, como se viu anteriormente, favorece o desempenho do SVG no Verão e penaliza-o durante o Inverno.

Uma vez que a disposição relativa das quatro curvas depende apenas das diferenças entre a temperatura do solo e do ar exterior registadas no período em estudo, esta será idêntica para os restantes parâmetros analisados.

6.2 Velocidade do ar

A velocidade do ar no interior da tubagem deve ser tal que permita o aproveitamento máximo do potencial de arrefecimento e aquecimento do solo, sem colocar em causa o cumprimento da taxa de renovação de ar necessária para a ventilação do edifício. O gráfico da Figura 6.2 mostra a variação da quantidade de energia trocada no SVG em função da sua velocidade de circulação (v). A linha vertical a tracejado assinala a velocidade de circulação do ar no troço em estudo do SVG ($v=2,77$ m/s).

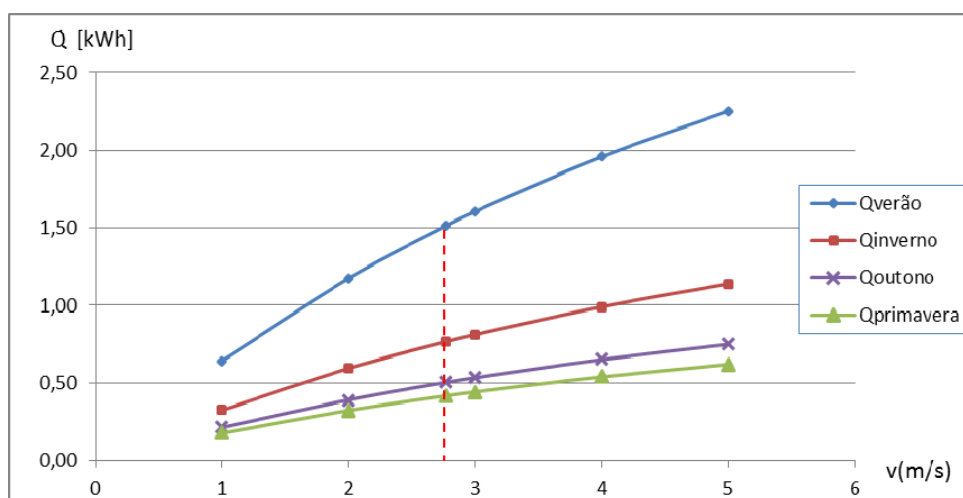


Figura 6.2 – Energia trocada nas quatro estações em função da velocidade do ar

O gráfico demonstra que a energia trocada no SVG é proporcional à velocidade de circulação do ar. No entanto o aumento da velocidade, ao aumentar a potência térmica trocada por convecção, conduz ao aumento da perda de carga com o quadrado da velocidade, como se pode observar na seguinte expressão:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (6.2)$$

em que a perda de carga (ΔH) depende do coeficiente de atrito (f), do comprimento do tubo (L), da velocidade (v) e da aceleração da gravidade (g).

Deste modo, é necessário ter em consideração que, para um mesmo caudal, o aumento da perda de carga implica o aumento da energia consumida pelo ventilador, levando à diminuição do coeficiente de desempenho do SVG.

6.3 Diâmetro da tubagem

A Figura 6.3 ilustra a variação dos ganhos energéticos em função do diâmetro interno da tubagem. A linha vertical a tracejado assinala o diâmetro da tubagem utilizado no troço do SVG em estudo ($D=0,11$ m).

A utilização de um raio maior permite o aumento da área de contacto entre o tubo e o ar circulante, assim como a redução da velocidade de circulação do ar. Apesar destes dois aspetos serem benéficos para o desempenho do permutador, constata-se que esta alteração conduz à diminuição das trocas de energia entre o ar proveniente do exterior e o solo. Este facto tem origem na diminuição do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo que se sobrepõe ao efeito do aumento da área de contacto e do tempo de permanência do ar no interior das tubagens.

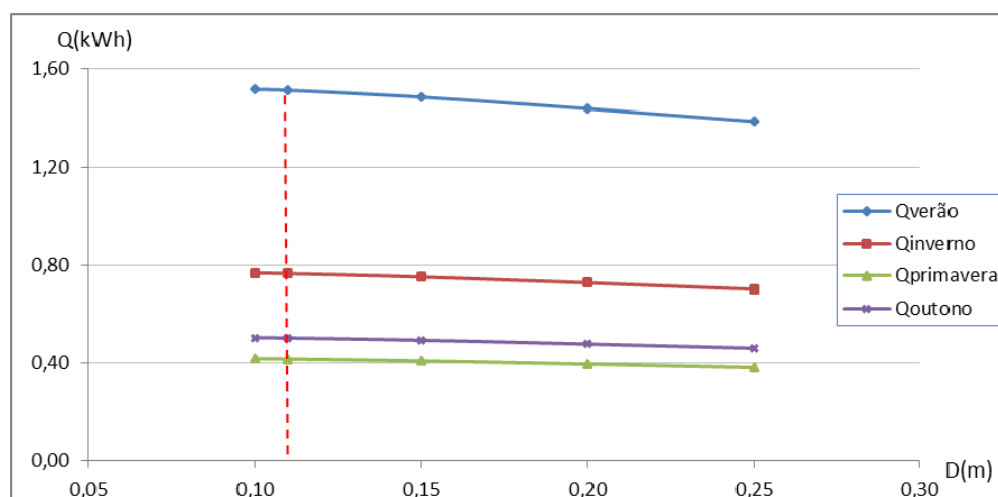


Figura 6.3 – Energia trocada nas quatro estações em função do diâmetro da tubagem

6.4 Espessura do tubo

A parede do tubo deve ser suficientemente espessa para resistir às forças que lhe são aplicadas, mas não tanto que dificulte a transmissão de calor entre o solo e o ar. Foi calculada a energia permutada para quatro valores de espessura diferentes, cujos resultados são apresentados na Figura 6.4. A linha vertical a tracejado assinala a espessura do tubo utilizado no troço do SVG em estudo ($e=2,7$ mm).

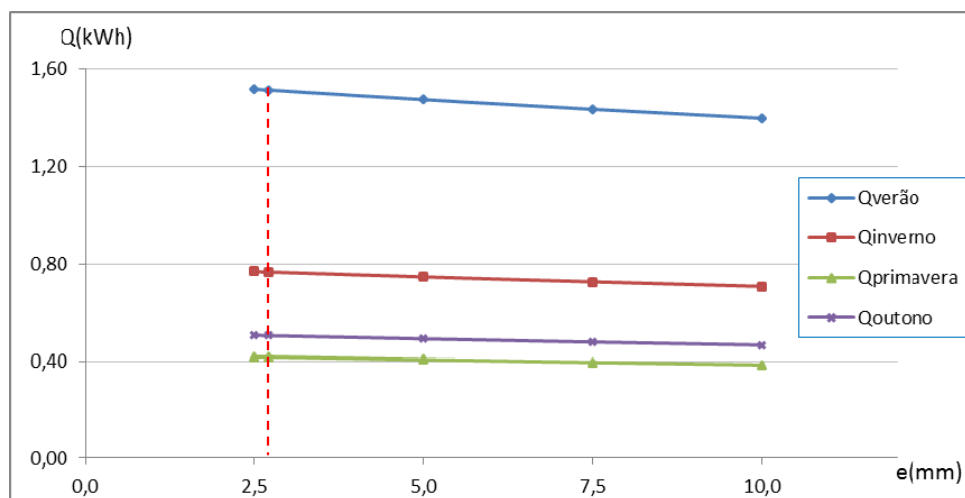


Figura 6.4 – Energia trocada nas quatro estações em função da espessura da tubagem

Como seria de esperar, uma parede do tubo mais espessa terá um efeito desfavorável no desempenho do permutador, uma vez que haverá maior resistência à condução de calor. No entanto, o aumento da espessura da parede da conduta não produz efeitos relevantes na energia trocada no SVG, já que esta dimensão é bastante reduzida quando comparada com as restantes envolvidas no funcionamento do sistema.

6.5 Material constituinte da tubagem

O tipo de material que constitui o tubo interfere na sua resistência mecânica, durabilidade e condutibilidade térmica (k). De forma a compreender quais os materiais que, do ponto de vista energético, são mais indicados para ser utilizados nas tubagens, foram analisados os potenciais ganhos térmicos obtidos utilizando três tipos de materiais diferentes: PVC, betão e aço.

Quadro 6.3 – Energia trocada nas quatro estações em função do material do tubo

Estações	Material		
	PVC ($k=0,17$ W/(m.K))	Betão ($k=0,5$ W/(m.K))	Aço ($k=43$ W/(m.K))
Verão	0,77 kWh	0,79 kWh	0,80 kWh
Inverno	1,52 kWh	1,55 kWh	1,57 kWh
Primavera	0,42 kWh	0,43 kWh	0,43 kWh
Outono	0,50 kWh	0,52 kWh	0,52 kWh

Da análise do quadro anterior verifica-se que os ganhos energéticos proporcionados por um material mais condutor e dispendioso, como o aço, não justificam a sua utilização. Devido à baixa espessura da parede do tubo utilizado ($e = 2,7$ mm), a sua resistência térmica e a sua influência no desempenho do permutador são praticamente desprezáveis. Nestas condições, a utilização de tubagens de PVC surge como a melhor opção em termos de custo-benefício, uma vez que conseguem reunir vantagens como um baixo custo de aquisição, boa resistência mecânica, facilidade de aplicação e uma resistência térmica reduzida.

6.6 Tipo de solo

A Figura 6.5 ilustra a variação da energia trocada no SVG em função do tipo de solo em que este está inserido e da respetiva condutividade térmica, k . A linha vertical a tracejado assinala a condutividade prevista para o solo que rodeia o SVG em estudo ($k = 1,2$ W/(m.K)).

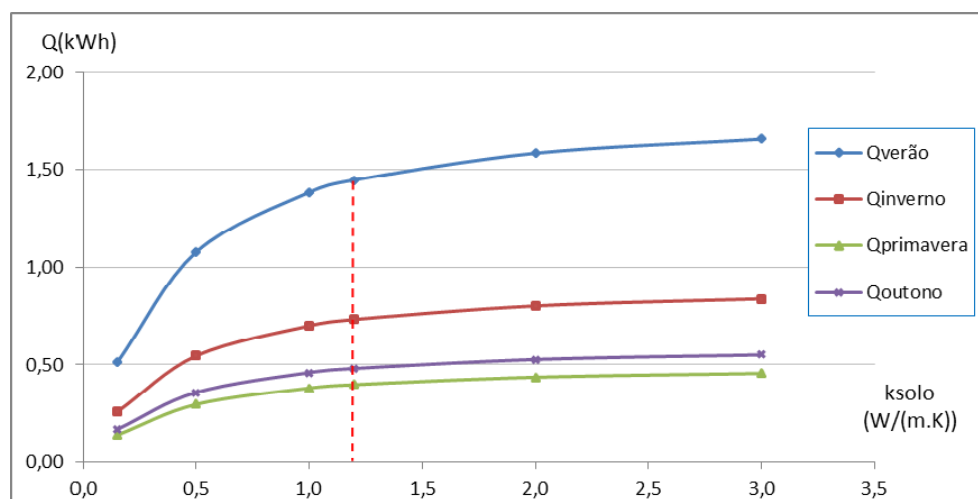


Figura 6.5 – Energia trocada nas quatro estações em função do tipo de solo

Como se pode verificar, esta propriedade tem um impacto significativo no desempenho do permutador. Devido à grande condutividade térmica da água, o aumento do nível de humidade do solo aumenta consideravelmente as trocas de calor entre este e o ar circulante no interior dos tubos enterrados. O gráfico da Figura 6.5 permite ainda concluir que, para elevados níveis de água no solo, o efeito do aumento da sua humidade no desempenho do permutador é bastante reduzido.

No que se refere à composição mineralógica do solo, os ganhos térmicos são superiores no caso de solos arenosos, quando comparados com os valores obtidos para solos argilosos.

Além de influenciar as trocas de calor com as tubagens enterradas, a condutividade térmica do solo determina também a sua temperatura. Segundo a fórmula já apresentada no Capítulo 3.2 ($I = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c}$) a inércia térmica do solo é proporcional à sua condutividade térmica. Deste modo, quanto maior a condutividade térmica do solo, maior será a diferença entre a sua temperatura e a do ar ambiente, e conseqüentemente, a energia trocada no SVG será superior.

Como se pode observar no gráfico, o solo onde se encontra instalado o SVG apresenta propriedades térmicas satisfatórias ($k = 1,2 \text{ W/(m.K)}$), pelo que a sua substituição não justifica os possíveis ganhos energéticos que possam ocorrer.

6.7 Tipo de traçado

Outro parâmetro importante para o dimensionamento do SVG é o tipo de traçado utilizado. Este influencia o caudal e a velocidade de circulação do ar no interior das condutas e, conseqüentemente, o desempenho do permutador.

A disposição das tubagens pode ser feita em série (anel ou serpentina) ou em paralelo (grelha). De modo a compreender qual dos dois traçados permite a obtenção de maiores ganhos térmicos, foi feita a comparação entre o traçado em paralelo adotado no caso em estudo e uma possível configuração em série. No primeiro caso, o caudal de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ de ar é dividido igualmente por sete tubagens de 110 mm de diâmetro dispostas em paralelo. No segundo, este caudal concentra-se somente num único tubo cujo diâmetro foi obtido admitindo uma perda de carga igual à da solução em paralelo.

Quadro 6.4 – Características dos dois tipos de traçado

Traçado	Comprimento (m)	Caudal (m^3/h)	Diâmetro (m)	Perda de Carga (m/m)
Série	24	600	0,215	0,098
Paralelo	24	$600/7 = 85,71$	0,105	0,098

A Figura 6.6 apresenta a energia obtida adotando cada um dos traçados. Verifica-se que a utilização de um *layout* em paralelo permite uma melhoria substancial do desempenho do permutador, quando comparado com o traçado em série. A divisão do caudal de $600 \text{ m}^3/\text{h}$ por sete tubagens em paralelo permite diminuir a velocidade de circulação do ar que conduz ao aumento as suas trocas de calor com o solo.

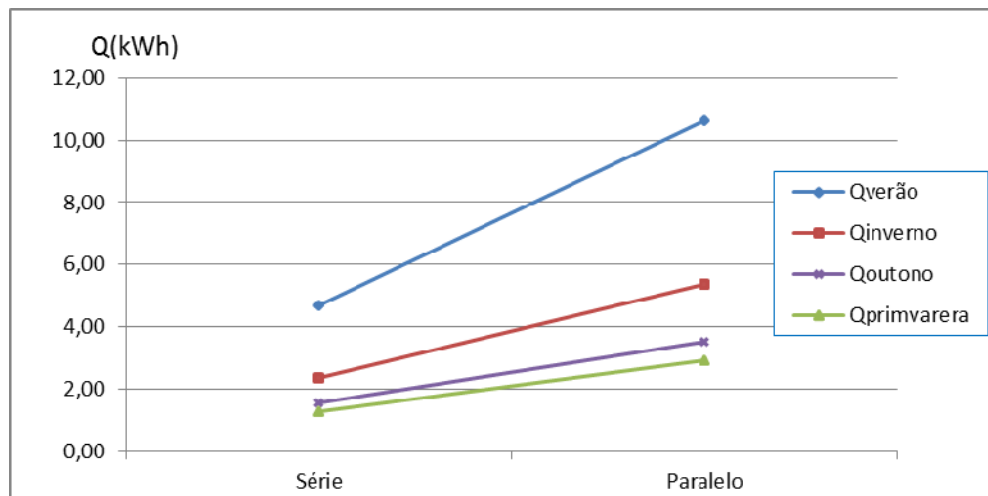


Figura 6.6 – Energia trocada nas quatro estações em função do tipo de traçado

7. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi desenvolvido e validado com sucesso um modelo de previsão do comportamento térmico de um SVG, posteriormente utilizado para a realização de um estudo paramétrico das variáveis relevantes para o desempenho destes dispositivos.

Foi estudado o potencial da utilização dos SVG através da análise do desempenho de um dispositivo deste tipo instalado numa moradia localizada na cidade de Coimbra. Inicialmente esta informação foi organizada de forma a estudar o comportamento do sistema ao longo de cada mês. Posteriormente, após terem sido detetados perfis de funcionamento semelhantes em alguns meses, estes foram organizados e analisados em função das estações do ano a que pertenciam. A avaliação do comportamento do SVG nos períodos estudados foi realizada através do seu coeficiente de desempenho (COP) que é dado pelo quociente entre a capacidade de aquecimento ou arrefecimento do sistema e o trabalho realizado pelo seu ventilador.

Foi possível constatar que o funcionamento contínuo do permutador ao longo do ano é desfavorável do ponto de vista energético, uma vez que a energia consumida pelo ventilador (\dot{W}) foi superior à trocada com o solo (\dot{Q}). Esta diferença foi de 32,25 kWh, tendo-se registado um $COP_{\text{médio}} = 0,92$. O desempenho do sistema revelou-se bastante inferior ao previsto na análise de viabilidade ($COP_{\text{médio}} = 2,66$). Para este resultado contribui o facto de a diferença entre a temperatura do solo e do ar ambiente registada ter sido inferior à prevista e de a programação do SVG não estar convenientemente otimizada.

Apesar destes resultados não poderem ser considerados satisfatórios, o sistema apresentou uma eficiência média de 79%, pelo que o seu desempenho foi sobretudo condicionado pelas temperaturas do solo e do ar ambiente.

A análise do funcionamento do SVG ao longo do ano permitiu observar o seguinte:

- Nas estações intermédias (Primavera e Outono), a proximidade entre a temperatura do solo e a ambiente condicionaram o desempenho do sistema, pelo que o seu funcionamento durante estes períodos deve ser minimizado.
- O funcionamento do SVG durante o Verão permitiu aumentar o conforto no interior do edifício e reduzir o seu consumo energético. O COP médio registado neste período foi igual a 1,21, mesmo sem a inclusão do mês de Setembro apesar deste ter apresentado temperaturas típicas de Verão ($COP_{\text{médio}} = 1,68$).
- A avaliação do comportamento do SVG durante os meses de Inverno foi prejudicada pela inexistência de registos durante os meses de Janeiro e pelas poucas horas de

funcionamento do sistema em Dezembro. O COP médio no Inverno foi de apenas 0,81, contudo o desempenho registado pelo sistema nos dias mais frios e durante os períodos noturnos demonstrou que o seu funcionamento poderá ser também útil nesta altura do ano.

- No Inverno, devido à baixa temperatura do solo, o aquecimento do edifício deve ser realizado através de aparelhos de ar condicionado, sendo o SVG ativado quando há necessidade de ventilar o edifício. Pelo contrário, durante o Verão o desempenho do sistema permite arrefecer e, simultaneamente, ventilar o edifício, podendo em certas situações substituir os sistemas de climatização convencionais.
- Deve-se ter em conta na análise destes dados, o facto de o SVG se encontrar instalado num edifício ocupado sobretudo durante o período diurno. Desta forma, durante o Verão, a ocupação do edifício coincide com o período de maior diferença entre a temperatura do solo e do ar exterior, levando a que o COP do sistema seja mais elevado nesta época. O contrário se passa nos meses de Inverno em que o maior potencial de aquecimento do SVG ocorre durante a noite, período em que o edifício se encontra desocupado.
- Se extrapolarmos estas observações para o caso de um edifício de habitação, é previsível que ocorra um melhor aproveitamento do sistema durante o Inverno, verificando-se o contrário nos meses de Verão.

A revisão do estado da arte permitiu constatar que o desempenho dos SVG é bastante variável consoante as condições climáticas locais e o período de funcionamento estudado. Os resultados obtidos neste trabalho podem ser considerados aceitáveis quando comparados com os registados nas investigações atrás referidas. Foi observado que, destes estudos, aqueles que obtiveram valores de COP mais elevados foram realizados em locais com grandes amplitudes térmicas, quer diárias, quer anuais. Ora sendo o clima Português caracterizado por flutuações de temperatura relativamente moderadas, as diferenças de temperatura entre o solo e o ar ambiente tornam-se diminutas. Este facto pode ajudar explicar o modesto desempenho do SVG analisado neste trabalho. Outras explicações possíveis podem relacionar-se com a pouca profundidade das tubagens ou as fracas propriedades térmicas do solo que não possibilitam a existência de grandes diferenças térmicas entre o ar exterior e o solo que envolve o permutador.

A comparação dos resultados obtidos com os previstos pela análise de viabilidade permitiu constatar a dificuldade da previsão temperatura do solo e, conseqüentemente o desempenho do SVG. Por esta razão, existe sempre um risco associado à instalação destes dispositivos, não existindo garantias absolutas quanto ao seu futuro desempenho.

Este estudo permitiu confirmar que não existe um SVG padrão aplicável a todas as situações. Cada contexto de instalação é único e o desempenho do sistema depende de uma série de

variáveis específicas locais como as condições climáticas, as propriedades do solo e as características do edifício ao qual se encontra ligado.

O estudo paramétrico permitiu quantificar a relevância de alguns parâmetros envolvidos no funcionamento do permutador. O tipo de traçado revelou ser o parâmetro que mais influencia as trocas de calor, tendo-se concluído que a adoção de um traçado em grelha, em detrimento de um traçado tipo anel ou serpentina, resulta num aumento substancial dos potenciais ganhos térmicos do dispositivo. A diminuição da velocidade do ar proporcionada pela divisão do caudal de ar insuflado conduziu ao aumento da energia trocada no solo.

A condutividade térmica do solo é também um fator bastante relevante que depende dos materiais que o constituem e principalmente do seu nível de humidade. Este parâmetro é característico do local de instalação do SVG, podendo, em caso de necessidade, ser substituído. No entanto, esta solução é indesejável uma vez que levaria ao aumento do custo global da obra.

Outro parâmetro igualmente importante é o comprimento total da tubagem. Ele interfere no volume de escavação necessário para a instalação do permutador assim como na sua quantidade total de energia trocada. Contudo, na simulação realizada para o estudo deste parâmetro, verificou-se que a sua interferência nas trocas de calor torna-se praticamente desprezável para extensões superiores a 40 metros.

A velocidade de circulação do ar mostrou ter também algum peso no comportamento térmico do dispositivo. Ao contrário do que seria de esperar, a variação do diâmetro utilizado nas tubagens em pouco altera a quantidade de calor trocado no permutador. A explicação para este fenómeno reside na interação entre a velocidade de circulação do ar e o coeficiente de transferência de calor por convecção.

As simulações paramétricas revelaram ainda que, devido à reduzida espessura das paredes dos tubos, a sua influência no desempenho do permutador é praticamente nula, sendo a seleção do material das tubagens pouco relevante para o desempenho do SVG.

Este estudo revelou que os SVG podem ter efeitos positivos no comportamento térmico e na eficiência energética dos edifícios, quando configurados corretamente e instalados em climas de grande amplitude térmica. No entanto, são sistemas muito sensíveis a determinados parâmetros que requerem um dimensionamento e uma utilização cuidada de forma a maximizar todo o seu potencial.

7.1 Trabalhos futuros

Neste trabalho verificou-se que, apesar do COP médio do sistema ao longo do ano ser inferior a 1 (0,92), houve períodos durante os quais o seu funcionamento contribuiu positivamente para o bom comportamento térmico do edifício. Por esta razão, considera-se que em trabalhos futuros seria interessante a programação do sistema de forma que este se ativasse automaticamente nestes períodos. A programação do SVG deveria ainda incluir uma outra condição que tivesse em conta as necessidades de ventilação do edifício e a temperatura de conforto desejada para o seu interior. No entanto, esta solução poderia conduzir a grandes períodos de inatividade do sistema, principalmente em edifícios de ocupação parcial que podem estar desocupados nas fases de maior potencial do SVG. Por esta razão, o sistema deveria ainda ser programado de modo a incluir pequenos períodos de funcionamento destinados a impedir a estagnação do ar no interior das tubagens.

Nesta dissertação foi utilizado um modelo simplificado para prever a transferência de calor em tubagens enterradas. Na sequência deste trabalho propõe-se a realização de um estudo que utilize ferramentas de cálculo baseadas em elementos finitos e CFD que permita analisar o escoamento não só em regime estacionário, como na presente dissertação, mas também em regime transiente. Deste modo, seria possível comparar os resultados da solução analítica que aqui se apresenta, permitindo uma verificação adicional e uma eventual calibração da mesma. Como etapa intermédia, seria interessante desenvolver e aplicar um modelo numérico simples em diferenças finitas e formulação transiente, que permitisse prever a distribuição de temperatura ao longo da tubagem do permutador e, simultaneamente, a sua evolução temporal.

Relativamente à previsão da temperatura do solo através da fórmula de Kusuda, dada a variabilidade da ocorrência do dia mais frio do ano (t_{\min}), considera-se que seria interessante verificar a influência da substituição desta variável por outra que tivesse em conta, não o dia, mas o mês mais frio do ano.

Outro aspeto que valeria a pena estudar, seria a influência da profundidade das tubagens no funcionamento do SVG. Em termos teóricos, seria de esperar um maior desfasamento entre a temperatura à superfície e a temperatura do solo, que conduziria ao aumento do desempenho do sistema.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BP (2012).

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/STAGING/global_assets/downloads/O/2012_2030_energy_outlook_booklet.pdf

[2] BP (2012).

http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf

[3] Accenture (2012). <http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Sustainable-Energy-All-Opportunities-Construction-Industry.pdf#zoom=50>

[4] World Business Council on Sustainable Development (2009).

<http://www.wbcsd.org/transformingthemarketeeb.aspx>.

[5] Portal da Habitação (2013).

<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/habitacao/construcao/construcaosustentavel.html>

[6] Decreto-Lei n.º 80/2006 (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE).

[7] Environmental Protection Agency (2013).

<http://www.epa.gov/region1/communities/indoorair.html> (página internet oficial), USA.

[8] Matos, J. et al (2010). “Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Um Guia Técnico”. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

[9] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (2013).

<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV5161%20Aula%2011%20-%20Ventila%C3%A7%C3%A3o.pdf>

[10] Gonçalves, H. e Graça, J. (2004). “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”, INETI, Lisboa.

[11] Ferreira, M. (2004). “Caudais de Ventilação Recomendados para Edifícios Residenciais”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

[12] Veríssimo, H. (2008). “Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio de Acordo com o Eurocódigo 3”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

[13] Futureng (2013). <http://www.futureng.pt/futureng>

- [14] Santos, P. et al (2012). “Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings”. ECCS, Brussels.
- [15] Battistella, F. (2011). “Light Steel Framing: Uso da Estrutura de Aço como Tecnologia Construtiva”. Monografia de Bacharelato, Universidade de Santa Catarina, Joinville.
- [16] Gomes, C. (2007). “Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares em *Light Steel Framing*”, Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- [17] Greenspec@ (2013). <http://www.greenspec.co.uk/thermal-mass.php>. Greenspec (página internet oficial), London.
- [18] Gilbert, J. e Koster, U. (2010). “New Thermal Mass Solution for Low Inertia Buildings”. Dupont Energain PCM Guidebook, DuPont de Nemours, Luxembourg.
- [19] Hähnlein, S. et al. (2013). “Sustainability and Policy for the Thermal Use of Shallow Geothermal Energy”. *Energy Policy*, Vol. 59, Issue C, pp. 914-25.
- [20] Rees, G. (1999). “The Remote Sensing Data Book”. Cambridge University Press, Cambridge.
- [21] Bisioniya, T. et al (2012). “Experimental and Analytical Studies of Earth–air Heat Exchanger (EAHE) Systems in India: A Review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp. 238-246.
- [22] Cvc Direct (2013). <http://www.cvcdirect.co.uk/geothermal-heat-exchanger.html>.
- [23] Rehau (2013). <http://www.concept-bio.eu/ground-coupled-heat-exchanger.php>.
- [24] Ozgener, L. (2011). “A Review on the Experimental and Analytical Analysis of Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) Systems in Turkey”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, Issue 9, pp. 4483-90.
- [25] Concept Bio (2013). <http://www.concept-bio.eu/ground-coupled-heat-exchanger.php>.
- [26] Ascione, F. et al (2011). “Earth-to-air Heat Exchangers for Italian Climates”. *Renewable Energy*, Vol.36, Issue 8, pp. 2177-88.
- [27] Saadatian, O. et al (2011). “Review of Windcatcher Technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, Issue 3, pp. 1477-95.
- [28] Wikipedia (2013). <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Wind-Tower-and-Qanat-Cooling-1.jpg>
- [29] Litoral alentejano (2013). <http://www.litoral-alentejano.com/mirobriga/termas5.jpg>

- [30] Thevenard, D. (2007). “Bibliographic Search on the Potential of Earth Tubes”. Numerical Logics Inc., Waterloo
- [31] Thiers, S. e Peuportier, B. (2008). “Thermal and Environmental Assessment of a Passive Building Equipped with an Earth-to-air Heat Exchanger in France”. *Science Direct*, Vol.82, Issue 9, pp. 820-931.
- [32] Kusuda, T. e Achenkach, P. (1965). “Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States”. *ASHRAE Transactions*, Vol.71.
- [33] Kharty, A. e Sodha, M. (1978). “Periodic Variation in Ground Temperature with Depth”. *Solar Energy*, Vol.20, pp. 425-27.
- [34] Bharadwaj, S. e Bansal, N. (1981). “Temperature Distribution Inside Ground for Various Surface Conditions”. *Building and Environment*, Vol.16, Issue 3, pp. 183-92.
- [35] Mihalakakou, G. et al. (1992). “On the Application of the Energy Balance Equation to Predict Ground Temperature Profiles”. *Solar Energy*, Vol.60, Issue 3, pp. 181-90.
- [36] Lee, E. (2008). “Development, Verification, and Implementation of a Horizontal Buried Pipe Ground Heat Transfer Model in Energyplus”. Dissertação de Mestrado, Oklahoma State University, Oklahoma.
- [37] Zhang, J. e Haghghat, F. (2005). “Simulation of Earth-to-air Heat Exchangers in Hybrid Ventilation Systems”. *Proceedings of the 9th International Building Simulation Conference*, Montreal.
- [38] Goswami, D. e Dhaliwal, A. (1985). “Heat Transfer Analysis in Enviromental Control Using an Underground Air Tunnel”. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.107, pp. 141-45.
- [39] Tzaferis, A. et al. (1992). “Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-to-Air Heat Exchangers”. *Energy and Buildings*, Vol.18, Issue 1, pp. 35-43.
- [40] Baxter, D. (1994). “Energy Exchange and Related Temperature of an Earth-tube Heat Exchanger in Heating Mode”. *Trans ASAE*, Vol.35, Issue 1, pp. 275-85.
- [41] Baxter, D. (1994). “Energy Exchange and Related Temperature of an Earth-tube Heat Exchanger in Cooling Mode”. *Trans ASAE*, Vol.37, Issue 1, pp. 257-67.
- [42] Mihalakakou, G et al. (1994). “Modelling the Thermal Performance of Earth-to-air Heat Exchangers”. *Solar Energy*, Vol.53, Issue 3, pp. 301-305.
- [43] Krarti, M. e Kreider, J. (1996). “Analytical Model for Heat Transfer in an Underground Air Tunnel”. *Energy Conversion*, Vol.37, Issue 10, pp. 1561-74.

- [44] Hollmuller, P. e Lachal, B. (2000). “Cooling and Preheating with Buried Pipe Systems: Monitoring, Simulation and Economic Aspects”. *Energy Buildings*, Vol.33, pp. 509-18.
- [45] De Paepe, M. e Willems, A. (2001). “3D Unstructured Modelling Technique for Ground-coupled Air Heat Exchanger”. *Clima 2000/Napoli World Congress*, Napoli, pp. 15-8.
- [46] De Paepe, M. e Janssens, A. (2003). “Thermo-hydraulic Design of Earth-air Heat Exchangers”. *Energy Buildings*, Vol.35, pp. 389-97.
- [47] Bhutta, A. et al. (2012). “CFD Applications in Various Heat Exchangers Design: a Review”. *Applied Thermal Engineering*, Vol.32, pp. 1-12.
- [48] Pfaferott, J. (2003). “Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency”. *Science Direct*, Vol.35, pp. 971-83.
- [49] Sharan, G. e Jadhav, R. (2003) “Performance of single pass earth-tube heat exchanger: An experimental study”, Gujarat Energy Development Agency (GEDA), Ministry of Agriculture, New Delhi
- [50] Bansal, V. et al. (2009) "Performance Analysis of Earth-pipe-air Heat Exchanger for Winter Heating", *Energy and Buildings*, Vol.45, Issue 11, pp. 1151-54
- [51] Darkwa, J. et al. (2011). “Theoretical and Practical Evaluation of an Earth-tube (E-tube) Ventilation System”. *Energy Buildings*, Vol.43, pp. 728-36.
- [52] Thevenard, D. (2011). “Earth Tube Ventilation Systems - Applicability in the Canadian Climate”. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa
- [53] Best water & air (2013). <http://www.bestwaterair.com/pages/how.html>
- [54] Çengel, Y. (2011). “Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 4th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York
- [55] Rosa, N. (2013). “Metodologias de Dimensionamento de Permutadores Geotérmicos para Sistemas Bombas de Calor”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [56] Al-Ajmi, F. (2006). “The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate”. *Science Direct*, Vol.41, pp. 235-44.
- [57] The Engineering Toolbox (2013). http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.