



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo do Potencial de Aproveitamento de Energia Geotérmica em Portugal Continental

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

João André Monteiro Martins Leitão

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim da Costa (DEM-FCTUC)

Professor Doutor Alcides José Castilho Pereira (DCT-FCTUC)

Júri

Presidente Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2014

À minha esposa, filho, pais e irmã.

Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento aos meus orientadores, Professor Doutor José Costa e Professor Doutor Alcides Pereira, pela oportunidade de realização desta dissertação, por toda a disponibilidade e ajuda que permitiram o aprofundamento do conhecimento e o desenvolvimento deste trabalho.

Um especial agradecimento à Dra. Elsa Ramalho, por toda a disponibilidade, incentivo e partilha de informação.

À Filipa por todo o apoio, motivação e ânimo, principalmente nesta última fase.

Aos meus pais pela oportunidade que me deram, pela constante preocupação e apoio incondicional ao longo destes anos académicos, aliás como sempre.

A todos os meus amigos, que colaboraram por diversas formas e também pelo companheirismo.

Resumo

O aquecimento global, associado à elevada dependência nos combustíveis fósseis e ao crescente consumo energético, provocou situações dramáticas e impactes ambientais, bem como impactes socio-económicos. No sentido de inverter este cenário surgiram as energias renováveis para produção de energia eléctrica e para reduzir a dependência do petróleo, do carvão, etc., os quais são altamente poluentes e estão nos limites das suas reservas.

Neste contexto surge o estudo da Energia Geotérmica. Esta energia, que se encontra no subsolo, tem-se afirmado como uma das alternativas, mas com fraco crescimento, quando comparado com outras energias renováveis. O aproveitamento da energia geotérmica, quer seja de alta entalpia, para produção de energia eléctrica, de baixa entalpia para usos directos ou de muito baixa entalpia para climatização de edifícios, torna-se solução evidente, eficaz e rentável face a energias renováveis como a solar ou a eólica, uma vez que pode ser utilizada em continuidade. A energia geotérmica é já bastante usada mundialmente, mas ainda requer incentivos para um maior desenvolvimento em muitos países. No nosso país, apenas na ilha de S. Miguel nos Açores há produção de electricidade de forma significativa através da energia geotérmica, e no Continente basicamente apenas há aproveitamentos dos pólos termais para efeitos de climatização. Este estado insípido de Portugal na utilização da Energia Geotérmica, exige um grande impulso, principalmente a Energia Geotérmica de Baixa Entalpia e de Muito Baixa Entalpia, para que possam ter um papel de destaque no contributo para o mix energético nacional.

Com esta dissertação pretende-se contribuir para a divulgação da Energia Geotérmica de Baixa Entalpia e de Muito Baixa Entalpia como alternativa sólida às energias primárias para produção de energia eléctrica, aquecimento e climatização de edifícios.

Palavras-chave: Energia Geotérmica, Entalpia, Recursos Geotérmicos, Geotermia Superficial, Bombas de Calor Geotérmicas.

Abstract

The Earth global warming, associated with the high dependence on fossil fuels and the ever growing energy consumption, caused dramatic situations and environmental impacts, as well as socio-economic impacts. To reverse this scenario, the use of renewable energy for production must be considered in order to reduce the dependence on oil, coal, etc, which are highly polluting and are within the limits of its reserves.

In this context, the study of Geothermal Energy emerges. This energy contained in the Earth underground has established itself as one of the alternatives, but with a feeble growth up to now, when compared with other renewable energy. The use of geothermal energy, whether it be High-Enthalpy, for production of electrical energy, Low-Enthalpy, for direct uses, or Very Low Enthalpy, for buildings air conditioning, becomes an obvious, efficient and cost effective solution, compared to renewable energy such as solar or wind, since it can be used in continuity. Geothermal energy is already widely used worldwide, but it still requires incentives for greater development in many countries. In Portugal, there is electricity production only in the S. Miguel Island in the Azores, and in the Continent there is only exploitation of thermal poles. This insipid state of Portugal in concerning the use of geothermal energy requires a big boost, especially Energy Low and Very Low Enthalpy Geothermal, so that they can have a major role in contributing to the national energy mix.

This dissertation aims at contributing for spreading the Geothermal Energy of Low and Very Low Enthalpy as a solid alternative to the primary energies for the production of electricity, heating and cooling of buildings.

Keywords Geothermal Energy, Enthalpy, Geothermal Resources, Shallow Geothermal, Ground Source Heat Pumps.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Siglas	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. ORIGEM DA ENERGIA GEOTÉRMICA	5
3. ENERGIA GEOTÉRMICA E HISTÓRIA DO SEU APROVEITAMENTO	12
3.1. Tipos de Energia Geotérmica	13
3.2. Alta Entalpia	16
3.2.1. Centrais Geotérmicas	17
3.2.2. Sistemas Geotérmicos Estimulados	21
3.3. Baixa Entalpia	22
3.4. Muito Baixa Entalpia ou Superficial	23
3.4.1. Usos Directos	24
3.4.2. Bombas de Calor Geotérmicas	25
3.4.3. Armazenamento Subterrâneo de Energia Térmica	32
4. ENERGIA GEOTÉRMICA NO MUNDO	35
4.1. Energia geotérmica Na Europa	37
4.2. Energia Geotérmica em Portugal	39
4.2.1. O caso de Portugal Continental	40
4.2.2. Aproveitamentos e Potencial existentes	40
4.2.3. Alguns Projectos em Portugal	46
5. ENQUADRAMENTO LEGAL NACIONAL DA ENERGIA GEOTÉRMICA	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1: Células Convectivas do Manto. (INETI, 2007).....	9
Fig. 2.2: Padrão mundial das placas tectónicas, cristas e fossas oceânicas, zonas de subducção e centrais geotérmicas (Dickson e Fanelli, 2004).....	10
Fig. 2.3: Fluxo de calor no Mundo. (IPCC, 2009).	11
Fig. 3.1: Utilizações da energia geotérmica. (Martins Carvalho e Carvalho, 2004).	15
Fig. 3.2: Gráfico do comportamento de Temperaturas vs Profundidades. (Madureira e Antunes, 2012).	23
Fig. 3.3: Aplicações directas da Energia Geotérmica no Mundo em percentagem do consumo total de energia. Adaptado de Lund (2010).	24
Fig. 3.4: Exemplo de sistema aberto. Fonte: EGEC.	29
Fig. 3.5: Exemplo de sistemas fechados horizontais. Fonte: EGEC.	30
Fig. 3.6: Exemplo de sistema vertical fechado. Fonte: EGEC.	30
Fig. 3.7: Esquema de captação vertical através de estacas de fundação. (Cruz, 2013).	31
Fig. 3.8: Funcionamento ATES. (IFTECH, 2006).	33
Fig. 3.9: Funcionamento BTES. (IFTECH, 2006).	34
Fig. 4.1: Uso Global da Energia Geotérmica em 2010. Fonte: GRC.....	35
Fig. 4.2: Gradiente geotérmico médio em Portugal. (Ramalho, 2014).	41
Fig. 4.3: Distribuição por temperaturas das ocorrências termais. (IGM, 1998).....	42
Fig. 4.4: Distribuição das águas termais tendo em conta o quimismo. (IGM, 1998).	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Produção de calor [J/(kg.s)] a partir da Radioactividade. Adaptado de Glassley (2010).	6
Tabela 3.1: Energia Geotérmica de acordo com a temperatura.	14
Tabela 3.2: Evolução da capacidade geotérmica total instalada a nível mundial desde 1980 até 2010, com previsão para 2015 (Chamorro et al., 2012).	18
Tabela 3.3: Centrais Geotérmicas em 2010 (Chamorro et al., 2012).	19
Tabela 4.1: Objectivos inscritos na Declaração de Ferrara, com excepção à capacidade instalada. (Antics et al., 2013).	38
Tabela 4.2: Emergências termais, temperatura máxima registada e características químicas da água. (Lourenço e Cruz, 2005).	43

SIGLAS

ADENE – Agência para a Energia
APG – Associação Portuguesa de Geólogos
ATES – Aquifer Thermal Energy Storage
BCG – Bombas de Calor Geotérmicas
BTES – Borehole Thermal Energy Storage
CE – Comunidade Europeia
COP – Coefficient of Performance
DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia
EER – Energy Efficiency Ratio
EGEC – European Geothermal Energy Council
EGS – Enhanced Geothermal Systems
FER – Fontes de Energia Renovável
GEE – Gases de Efeito de Estufa
GRC – Geothermal Resources Council
HDR – Hot Dry Rock
IEA – International Energy Agency
IGM – Instituto Geológico e Mineiro
INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia
PNAER – Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis
PPGS – Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial
SPF – Seasonal Performance Factor
UE – União Europeia
UTES – Underground Thermal Energy Storage

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23/04/2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, a Energia Geotérmica é a energia armazenada sob a forma de calor no interior da Terra (CE, 2009).

1.1. Enquadramento

Um dos maiores desafios actuais da Humanidade prende-se na necessidade do abastecimento energético.

A utilização exagerada e, em grande medida, irresponsável das fontes de energia primárias e dos combustíveis fósseis, os quais apresentam níveis preocupantes de escassez, bem como as elevadas emissões gasosas resultantes desta utilização, tem trazido consequências negativas no ambiente que se repercutem ao nível social e económico e tem levado o Mundo a viver situações catastróficas.

Segundo o relatório estatístico BP Statistical Review of World Energy, o consumo energético mundial no ano 2013 foi de 12730,4 Mtep. Cerca de 87 % foi proveniente de fontes não renováveis, sendo 33 % oriundo do petróleo. Aproximadamente 13 % do consumo deriva das energias renováveis e 6,7 % provêm da energia hídrica. Em Portugal 28 % do total consumido provém das energias renováveis, sendo 13 % proveniente da energia hídrica (BP, 2014).

Com o crescimento populacional mundial verificado, o consumo energético tem aumentado de forma incontrolável. A utilização de combustíveis fósseis para fazer face à necessidade energética “exigida” para o bem estar pessoal, como aquecimento, climatização, águas quentes domésticas, iluminação, confecção de alimentos e outras aplicações, as quais requerem cada vez mais disponibilidade energética em edifícios, quer públicos ou privados, tem que ser reduzida.

Actualmente, o uso/procura do calor é responsável por cerca de 80% do consumo de energia em habitações e em edifícios de serviços para aquecimento e produção

de águas quentes notando-se um crescimento considerável na utilização da climatização para arrefecimento (Sarbu e Sebarchievici, 2014).

O uso racional de energia nas utilizações particulares ou públicas exige estratégias de planeamento e utilização da energia para um desenvolvimento sustentável. A utilização de energia em edifícios é passível de sofrer mudanças implementando medidas de eficiência energética, para que a produção e consumo da energia e as emissões dos gases de efeito de estufa (GEE) sejam reduzidas.

De forma a alcançar esta eficiência e atingir as metas propostas e impostas no protocolo de Kyoto para a redução da utilização dos combustíveis fósseis e energias primárias, com redução das emissões de CO₂ e outros GEE produzidos por estas fontes, temos que recorrer, cada vez mais, às energias renováveis, reduzindo a necessidade e a intensidade no uso que fazemos dos combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão.

Posteriormente, a Comissão Europeia (CE) propôs normas que impõem novas metas. Entre elas, a UE 20-20-20, que estabelece objetivos a serem atingidos em 2020: *i*) uma redução de 20 % das emissões de gases de efeito de estufa, relativamente a níveis de 1990; *ii*) uma melhoria de 20 % na eficiência energética; *iii*) um aumento, para 20 %, da cota de consumo energético produzido a partir de Fontes de Energia Renovável (FER) (UE, 2012).

Em Janeiro de 2014, a CE propôs um quadro de novas políticas, com metas a serem atingidas em 2030 (UE, 2014). Estas passam pela redução da emissão dos GEE em 40 %, relativamente a níveis de 1990, aumento da eficiência energética em 30 % e melhoramento da cota de consumo energético produzido a partir de FER para 27 %, entre outros. Estas políticas têm como intenção continuar o trabalho que está a ser realizado com a UE 20-20-20, continuando o progresso no desenvolvimento de um sistema energético competitivo, seguro e económico para os consumidores, reduzindo a importação de energia, fomentando as energias renováveis e criando novas oportunidades de desenvolvimento e emprego para a sociedade.

Assim, como atrás já referido, Energia Geotérmica (*GEO* – Terra; *TÉRMICA* – Calor) é, basicamente, a energia que provém do interior da Terra em forma de calor. Apenas uma parte residual deste calor, armazenado no interior da Terra, é aproveitado pelo Homem, uma vez que a distribuição do calor é muito heterogénea, sendo mais abundante, ou estando mais explorável, numas regiões do que noutras. A disponibilidade do recurso

geotérmico, o estado de desenvolvimento de um país, as tecnologias disponíveis e a “vontade” governamental e institucional são fortes condicionantes ao aproveitamento da Energia Geotérmica.

Citando Glassley (2010), “a Energia Geotérmica é omnipresente, abundante e inesgotável. Alimenta o movimento dos continentes em toda a superfície do planeta, derrete rochas que irrompem como vulcões, e fornece a energia que sustenta a vida nas profundezas do oceano. Está presente há mais de 4.500 milhões de anos e estará presente milhares de milhões de anos no futuro. Esta flui através da terra constantemente, 24 horas por dia, 7 dias por semana, faça chuva ou sol, era após era.”. Ou seja, pode ser utilizada em continuidade. A energia geotérmica caracteriza-se ainda por ser limpa (produz poucos gases que contribuem para o efeito de estufa e é pouco impactante no meio ambiente) (Chamorro et al., 2014).

Esta energia resulta do calor interno da Terra devido a fenómenos vulcânicos recentes, à emissão de radiação dos isótopos naturais presentes nas rochas e à elevação do manto. Pode ser recuperada directamente através de um fluido gasoso ou líquido ou, na ausência deste, através da injeção de água a elevada pressão em maciços rochosos profundos.

À medida que a energia geotérmica se torna mais competitiva relativamente aos combustíveis fósseis, e com os benefícios ambientais associados aos recursos renováveis, o desenvolvimento da Geotermia nas suas variantes será cada vez maior.

1.2. Objectivos

O presente estudo propõe-se fazer uma divulgação da Energia Geotérmica como fonte de energia renovável eficaz, eficiente e rentável, entre outras energias renováveis. São igualmente objectivos:

- Fazer descrição sucinta de algumas tecnologias que permitam aproveitar o potencial da Energia Geotérmica;
- Abordar, sucintamente, o estado da energia geotérmica no Mundo, na Europa e em Portugal;

- Proceder ao enquadramento legal da energia geotérmica de baixa entalpia em Portugal.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, onde se procura sintetizar o estudo realizado, fazendo um enquadramento geral da Energia Geotérmica, com destaque para a Energia Geotérmica de Baixa Entalpia e Superficial. Neste primeiro capítulo, é feito um enquadramento do estudo, bem como os objectivos deste. No segundo capítulo é feita uma breve descrição da origem da energia geotérmica. No terceiro capítulo é abordada sucintamente a história dos aproveitamentos geotérmicos, sendo identificados e descritos os tipos de energia geotérmica e algumas tecnologias para proceder ao seu aproveitamento. No quarto capítulo descreve-se o estado da energia geotérmica no Mundo e na Europa. No quinto capítulo aborda-se o estado da energia geotérmica em Portugal, bem como alguns projectos já realizados bem como outros em andamento. No sexto capítulo faz-se o enquadramento legal do sector em Portugal, apontando-se algumas estratégias para promoção da energia geotérmica. Por último, o sétimo capítulo inclui as considerações finais ao estudo realizado.

2. ORIGEM DA ENERGIA GEOTÉRMICA

A acreção do material (poeiras, partículas do tamanho de grãos de areia e outros objectos que foram colidindo) quando se deu a formação da Terra, levou ao aumento da temperatura do planeta. À medida que este crescia, as pressões do interior também aumentavam, comprimindo os minerais de sílica e outros materiais, que contribuíram para que a temperatura interior do planeta crescesse. Elementos radioactivos tiveram e têm também um papel crucial para manter o calor interior terrestre. Como a Terra não é um sistema estático, mas sim dinâmico, o calor existente está em constante renovação e transferência. Este calor tem origem na desintegração de isótopos radioactivos (principalmente ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K), no calor libertado há 4.500 milhões de anos na formação da Terra, nos movimentos diferenciais entre o núcleo e o manto e na cristalização do núcleo externo (Trillo e Angulo, 2008; Dickson e Fanelli, 2004).

Durante a acreção, a Terra formou-se em camadas, redistribuindo os metais presentes e estratificando a densidade do planeta. Actualmente o núcleo interno é sólido, uma vez que este se encontra a uma grande pressão. O núcleo externo é líquido, devido às menores pressões.

O manto, que rodeia o núcleo, tem uma espessura de cerca de 2.890 km. É composto por silicatos, óxidos e outros materiais de alta densidade como magnésio, titânio e alumínio (elementos com baixo raio atómico), sendo que, por esta razão, há poucos elementos que contenham isótopos radioactivos, tais como K, U ou o Th (Glassley, 2010).

A crosta pode ser oceânica (que se encontra sob os oceanos), com uma espessura entre os 6 e os 10 km, e continental, com uma espessura de 30 a 60 km. Como a crosta oceânica é formada em resultado da existência das células de convecção do manto (o magma formado no manto é expelido pelas cristas oceânicas e solidifica como crosta oceânica), esta é igualmente pouco abundante em elementos radioactivos. Por outro lado, a crosta continental é rica em minerais de menor densidade constituídos por átomos com raio atómico maior, minerais estes que facilmente acomodam K, U, Th e Rb. Como tal, sendo a crosta continental rica em elementos radioactivos, 60% do calor existente nos continentes

advém do decaimento radioactivo destes elementos. Estes isótopos, em particular, proporcionam uma contínua fonte de energia (Glassley, 2010).

A Tabela 2.1 apresenta a produção de calor pela Radioactividade, tendo em conta os isótopos K, U e o Th e a sua localização no interior da Terra. Assim, o calor no interior da Terra é continuamente produzido a partir do decaimento radioactivo de isótopos como Urânio, Tório e Potássio, que, assim, proporcionam uma contínua fonte de energia.

Tabela 2.1: Produção de calor [J/(kg.s)] a partir da Radioactividade. Adaptado de Glassley (2010).

	K	U	Th
Crosta continental superior	$9,29 \times 10^{-11}$	$2,45 \times 10^{-10}$	$2,77 \times 10^{-10}$
Crosta continental média	$4,38 \times 10^{-11}$	$9,82 \times 10^{-11}$	$6,63 \times 10^{-11}$
Crosta oceânica	$1,46 \times 10^{-11}$	$4,91 \times 10^{-11}$	$2,39 \times 10^{-11}$
Manto	$3,98 \times 10^{-14}$	$4,91 \times 10^{-13}$	$2,65 \times 10^{-13}$

Embora o elemento ^{23}Al já não esteja presente no planeta, durante a formação da Terra era abundante e contribuiu grandemente para o aumento interno da temperatura.

A radioactividade existente no interior da Terra sustenta a actividade vulcânica e esta tem significativo potencial de aproveitamento geotérmico, uma vez que é nas zonas vulcânicas que se encontram os reservatórios geotérmicos com temperaturas mais elevadas e a menores profundidades.

O decaimento radioactivo ocorre por um dos seguintes mecanismos (Glassley, 2010):

- decaimento- α (emissão de um núcleo de hélio);
- decaimento- β (ocorre quando um neutrão se transforma num próton com emissão de um antineutrino e de um electrão);
- decaimento- β' (ocorre quando um próton se transforma num neutrão com a emissão de um neutrino e de um positrão);
- decaimento- γ (ocorre quando um raio gama é emitido);
- captura de electrões, quando um electrão interior é capturado por um núcleo.

O calor interno da Terra tem duas origens: cerca de 40 % deriva do calor remanescente do momento de formação da Terra e os restantes 60 % (embora este valor seja considerado duvidoso na documentação consultada pois pode variar grandemente em virtude da variabilidade litológica) são provenientes do decaimento radioactivo dos isótopos de longa duração (Glassley, 2010; Ehrlich, 2013).

As zonas graníticas têm elevado potencial geotérmico, uma vez que o granito possui elementos químicos naturais (K, U, Th, de entre outros) em concentrações elevadas.

O fluxo do calor para a superfície e a sua implícita renovação são mantidos por diversos processos: condução, convecção e radiação, embora este último seja pouco significativo para a geotermia, uma vez que pouco contribui para o fluxo de calor.

O fluxo de calor médio da Terra é de cerca de 87 mW/m² e, uma vez que a Terra tem uma área de superfície de cerca de 5,1×10⁸ km², este fluxo de calor é equivalente a uma produção total de energia térmica de 4,4×10¹³ W (Glassley, 2010).

O calor não permanece estático onde é gerado, movendo-se de uma região quente para uma região ou corpo mais frio. Esta movimentação resulta de processos termodinâmicos. Os mecanismos de transferência de calor são a radiação, a condução e a convecção.

- **Radiação**

É reconhecido que a energia, sob a forma de calor, é constantemente irradiada da superfície da Terra para o espaço e que parte dessa energia corresponde à energia solar que foi absorvida pelo solo e é novamente irradiada como radiação infravermelha. A maioria dos materiais da Terra são relativamente opacos à radiação infravermelha, de modo que o papel primordial da radiação é através de emissão de radiação infravermelha na superfície da Terra (Glassley, 2010). Por esta razão, a radiação contribui relativamente pouco em termos de energia no interior da Terra, sendo um mecanismo que pode ser desprezado no contexto da Geotermia.

- **Condução**

A condução térmica é um processo difusivo que, basicamente, é a transmissão de calor através do contacto físico directo e ocorre via transferência de energia entre átomos e electrões de um material. Macroscopicamente, ocorre quando dois corpos, com

temperaturas diferentes, entram em contacto um com o outro (Glassley, 2010) e pode ter lugar em sólidos, líquidos e gases. Nos gases e nos líquidos, a condução resulta das colisões e da difusão das moléculas nos seus movimentos aleatórios. No caso dos sólidos, deriva das vibrações moleculares e da energia transportada pela rede de electrões. Este processo é frequentemente definido como uma mudança na frequência de vibração de átomos em que o material é termicamente perturbado.

A condução de calor é condicionada pela geometria, pelas propriedades e pelos gradientes de temperatura a que o material está submetido. A taxa de transferência de calor por condução (\dot{Q}_{cond}) em J/s, através de uma camada plana, é dada pela Lei de Fourier:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

sendo a propriedade k [W/(m.K) ou W/(m.°C)], a condutividade térmica do material, A [m²] a área da superfície onde ocorre transferência de calor por condução e dT/dx [K/m ou °C/m] o potencial térmico, ou seja, o gradiente de temperatura ao longo da direcção x [m].

Segundo Glassley (2010), embora a condutividade térmica tenha uma forte influência sobre as propriedades térmicas de um local geotérmico, a quantidade de calor disponível é um reflexo de um outro processo de transferência de calor, a convecção. Este mecanismo é o principal meio de transferência de calor na Terra.

- **Convecção**

O processo de convecção refere-se à transferência de energia que ocorre entre uma superfície e um fluido (líquido ou gás) em movimento que se encontram a temperaturas diferentes. É um processo que envolve os efeitos combinados de condução e do movimento do fluido e, quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento do fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é realizada apenas por condução (Glassley, 2010; Carvalho, 2013).

A taxa de transferência de calor por convecção é expressa pela Lei de Newton do arrefecimento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

em que h [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] é o coeficiente de transferência de calor por convecção; A [m^2] é a área de superfície onde ocorre a transferência de calor por convecção; T_s [$^\circ C$ ou K] é a temperatura da superfície; e T_∞ [$^\circ C$ ou K] refere-se à temperatura do fluido que se encontra na vizinhança da superfície.

O coeficiente de transmissão de calor por convecção, h , ao contrário da condutividade térmica, é um parâmetro experimental que depende das variáveis que influenciam a convecção: geometria da superfície, velocidade e natureza do escoamento do fluido (laminar ou turbulento) e propriedades do fluido (viscosidade dinâmica, μ , condutividade térmica, k , densidade, ρ e calor específico, c_p) (Carvalho, 2013).

A mudança de fase de um fluido é também considerada como processo convectivo devido ao movimento induzido durante o processo, como é o caso da ascensão convectiva do manto (Fig. 2.1).

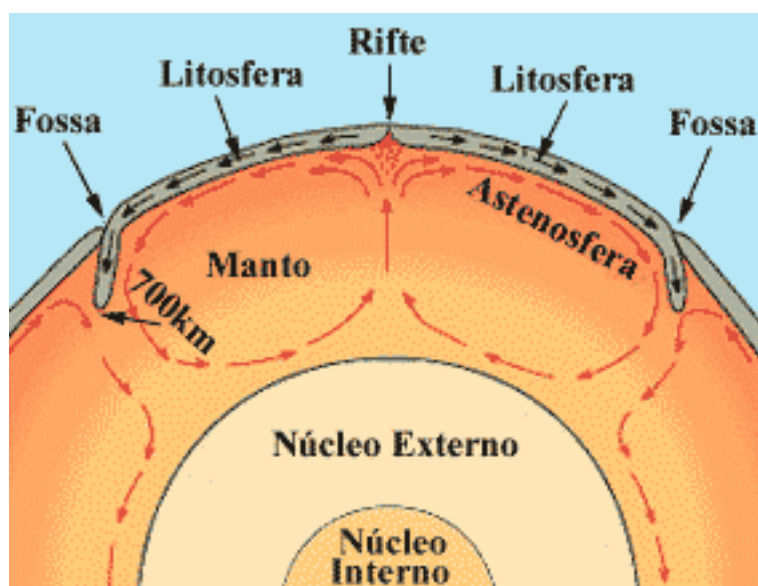


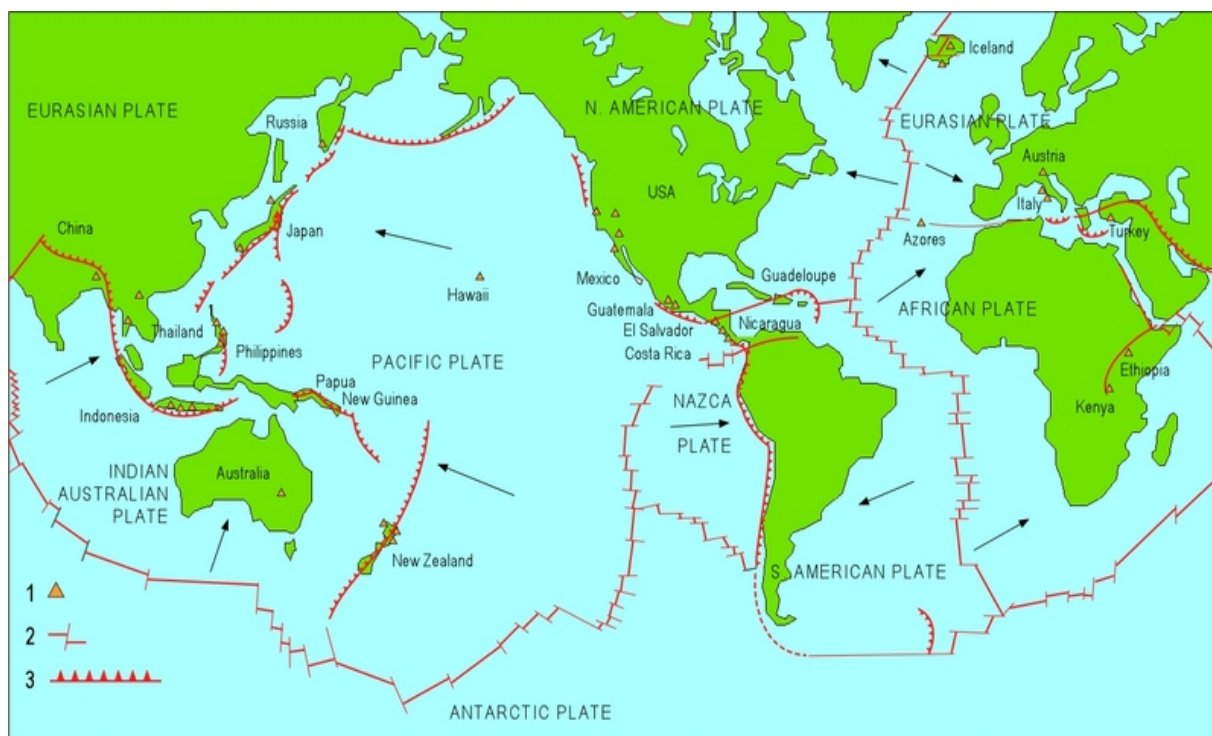
Fig. 2.1: Células Convectivas do Manto. (INETI, 2007).

Assim, pode-se considerar que a transferência de calor no subsolo ocorre numa mistura dos processos de transferência de calor condução e convecção, sendo que em rochas sólidas sem poros, a transferência de calor ocorre unicamente por condução.

Por vezes o magma atinge a superfície passando a lava. Porém, a maior parte das vezes o magma permanece sob a crosta, aquecendo as águas (águas das chuvas infiltradas nas terra) e as rochas adjacentes. Alguma desta água que se infiltrou na Terra volta à superfície como geysers ou nascentes de água quente, sendo que a maior parte fica retida em rochas porosas e fissuras. Este armazenamento de água quente é chamado de reservatório geotérmico.

O fluxo de calor do interior terrestre devido aos movimentos das placas tectónicas pode estar localizado próximo da superfície, onde a circulação convectiva do manto tem um papel determinante em trazer este calor para a superfície.

Na Fig. 2.2 vemos que grande parte das centrais geotérmicas se encontram localizadas próximo das zonas de subducção ou de divergência de placas.



Legenda: 1) Centrais geotérmicas; 2) Dorsais oceânicas atravessadas por falhas transformantes; 3) Zonas de subducção

Fig. 2.2: Padrão mundial das placas tectónicas, cristas e fossas oceânicas, zonas de subducção e centrais geotérmicas (Dickson e Fanelli, 2004).

O mapa da Fig. 2.3 mostra a capacidade instalada de energia geotérmica mundial com dados de 2009, demonstrando igualmente a localização das fronteiras das

placas tectónicas e das zonas com maior fluxo de calor. Estas coincidem com as fronteiras das placas tectónicas, zonas estas que possuem o melhor potencial geotérmico.

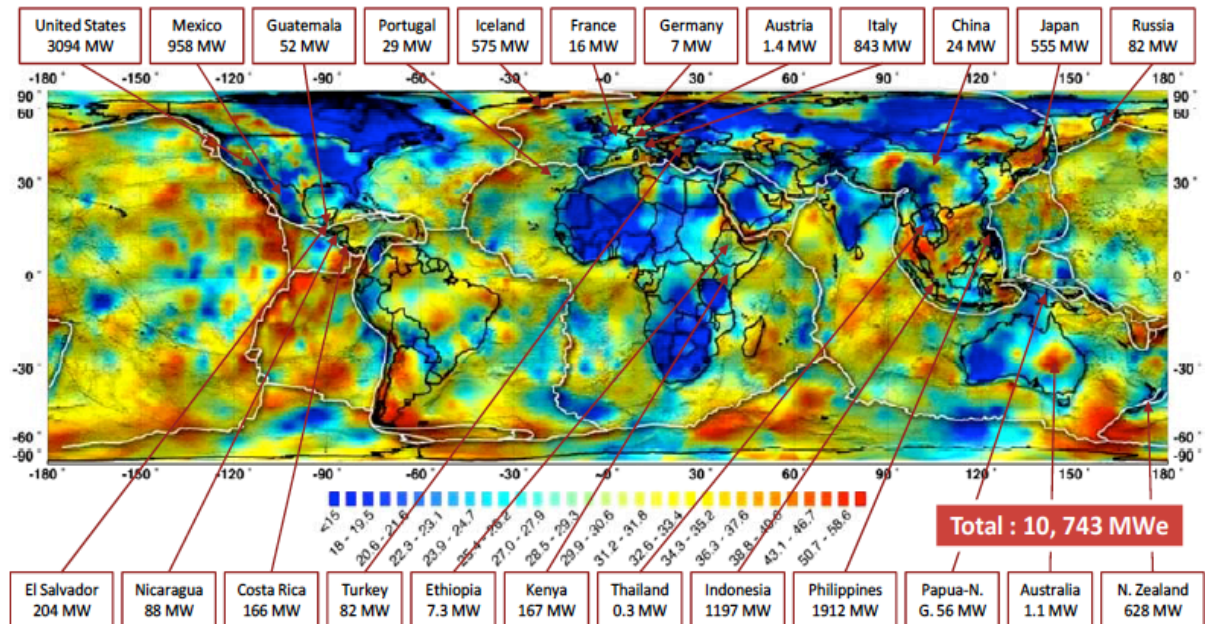


Fig. 2.3: Fluxo de calor no Mundo. (IPCC, 2009).

3. ENERGIA GEOTÉRMICA E HISTÓRIA DO SEU APROVEITAMENTO

A energia geotérmica é utilizada desde a Antiguidade, principalmente na balneoterapia e no dia-a-dia para a confecção de alimentos, lavar roupa, tomar banho, entre outros, pelos Romanos e pelos Otomanos, e para aquecimento urbano, pelos Franceses durante a idade média, e na extracção de componentes de borato em Larderello, Itália (Lund, 2001). No entanto, só nos séculos XVI e XVII, durante as escavações das primeiras minas, a umas centenas de metros de profundidade, é que o Homem deduziu, apenas por sensação física, que a temperatura da Terra aumentava com a profundidade. Apenas no século XX, em 1904, o calor oriundo do interior da Terra foi utilizado numa primeira tentativa de demonstrar a possibilidade de gerar electricidade, embora sem sucesso. Em 1911 foi produzida uma quantidade significativa quando foi construída uma central eléctrica em Larderello, Itália (Dickson e Fanelli, 2004; Erlich, 2013). O sucesso deste ensaio provocou um enorme interesse a nível mundial, principalmente no meio industrial, com investidores a quererem explorar este novo mercado. Este êxito fez com que outros países começassem a investir nesta tecnologia e o primeiro furo geotérmico foi desenvolvido em Beppu, no Japão em 1919 (Ramos, 2014).

Desde então, o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento da Energia Geotérmica tem sido contínuo e notável. Fruto deste desenvolvimento, a produção de energia eléctrica tem sido feita a temperaturas cada vez menores; graças aos Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS), a produção de electricidade pode ser feita em qualquer região, teoricamente. Graças às potencialidades da Energia Geotérmica, à autonomia energética e ao facto de as condições climáticas não serem factor condicionante na produção de energia eléctrica, face a outras renováveis, as centrais geotérmicas podem estar operacionais cerca de 95 % do tempo (Goelec, 2013b). Quer isto dizer que a produção de electricidade via centrais geotérmicas pode ser mais rentável do que recorrendo a outras fontes renováveis como por exemplo o vento (devido à sua intermitência) e o preço desta electricidade nunca variará tanto como acontece, por exemplo com a electricidade produzida nas centrais termoeléctricas, uma vez que o

combustível é gratuito (calor terrestre), ao contrário do que acontece com o preço do petróleo ou do gás natural.

A utilização directa da Energia Geotérmica também é possível, correspondendo à maior fatia de utilização de Energia Geotérmica. Esta utilização pode ser feita a título particular ou industrial, passando pelos aproveitamentos termais (sector turístico), como a balneoterapia, a climatização urbana e habitacional, a climatização industrial (e.g., hospitais), a utilização em processos industriais como secagem de produtos agrícolas, piscicultura, estufas agrícolas para desenvolver legumes e/ou frutos fora de época, aquecimento de piscinas, etc.

Assim, a gama alargada de utilizações possíveis da Energia Geotérmica faz com que esta seja uma das energias renováveis mais fiável, mais competitiva e mais versátil face aos combustíveis fósseis e a outras renováveis na produção de energia, seja térmica ou eléctrica.

Até 2000, a capacidade eléctrica produzida a partir da Energia Geotérmica aumentou anualmente a uma taxa de cerca de 8,5 % e o uso global de energia geotérmica aumentou a uma taxa semelhante devido à procura de recursos alternativos, capazes de suprir as necessidades energéticas mundiais (Erlich, 2013).

Espera-se que os países utilizadores de energia geotérmica sejam cerca de 46 em 2015, contra 24 em 2010, aumentando a capacidade geotérmica total instalada para 19 GW (Bertani, 2012), o que realça o enorme potencial de crescimento de utilização dos recursos geotérmicos existentes.

3.1. Tipos de Energia Geotérmica

Os recursos geotérmicos foram classificados tendo em consideração vários critérios, por forma a melhor fazer uma melhor correspondência recurso-utilização. A entalpia e a temperatura dos fluidos geotérmicos são dois desses critérios. Outro parâmetro importante é o gradiente geotérmico que é a taxa de variação da temperatura com a profundidade. A temperatura, à medida que progredimos em profundidade, não é constante, podendo variar significativamente em função do fluxo de calor existente e da condutividade térmica das rochas. Assim, em média, a temperatura aumenta em profundidade cerca de 25 a 30 °C/km (Ehrlich, 2013), sendo este gradiente naturalmente

superior em zonas vulcânicas. Estas zonas podem ser consideradas como as melhores áreas geotérmicas e a Energia Geotérmica é um bom recurso para a produção de electricidade. Um bom exemplo é a Islândia que tem as necessidades em energia eléctrica (não inteiramente) supridas a partir da transformação da energia geotérmica.

Consoante a temperatura do seu fluido geotérmico, ou seja, da sua entalpia – a quantidade de energia térmica contida num fluido ou objecto, passível de ser aproveitada (J/Kg ou kcal/kg) –, pode dividir-se a Energia Geotérmica em três categorias (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Energia Geotérmica de acordo com a temperatura.

Energia Geotérmica	Temperatura
Alta Entalpia	> 150 °C
Baixa entalpia	20 a 150 °C
Muito Baixa Entalpia	< 30 °C

Assim, e considerando que as temperaturas variam sobremaneira condicionando o proveito que se pode retirar da energia geotérmica, Lindal (1973) desenvolveu um diagrama que permite “associar” o recurso existente à aplicação pretendida, considerando a temperatura do recurso. O Diagrama de Lindal reproduzido na Fig. 3.1 demonstra que a exploração da energia geotérmica pode ser efectuada em cascata (por forma a melhor rentabilizar a sua utilização), de acordo com a temperatura do fluido geotérmico (Martins Carvalho e Carvalho, 2004), podendo a produção de energia eléctrica ser feita a partir dos 80 a 100 °C. Actualmente, é possível proceder à produção de energia eléctrica a partir de temperaturas mais baixas, embora este processo esteja ainda em investigação e desenvolvimento por forma a torná-lo mais eficiente e rentável. Talvez por esta razão haja pouca documentação a este respeito.

Basicamente, o aproveitamento e a utilização da energia geotérmica pode ser feita por:

1. Bombas de calor geotérmicas (BCG) – aproveitam as diferenças de temperatura entre o solo e o ambiente, fornecendo calor e/ou frio ($T < 30$ °C); são utilizadas no aquecimento e climatização de edifícios.

2. Utilização directa – reservatórios geotérmicos de temperaturas baixas a moderadas (20°C -150°C), que podem ser aproveitados directamente para fornecer calor

para a indústria, aquecimento ambiente, termas e outros aproveitamentos comerciais;

3. Centrais Geotérmicas – aproveitamento directo de fluidos geotérmicos em centrais a altas temperaturas ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), para accionar uma turbina e produzir energia eléctrica.

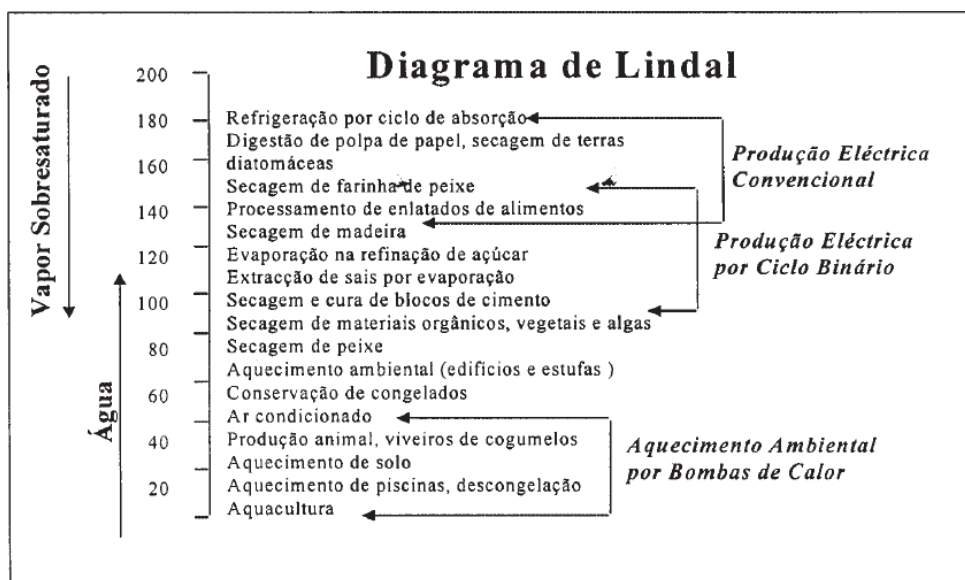


Fig. 3.1: Utilizações da energia geotérmica. (Martins Carvalho e Carvalho, 2004).

Relativamente às tecnologias é essencial considerar dois tipos de tecnologia, para o dimensionamento dos sistemas de aproveitamento da Energia Geotérmica e, assim, fazer o melhor aproveitamento dos recursos existentes: a Tecnologia de Superfície e a Tecnologia do Reservatório. A primeira diz respeito aos processos de transformação e/ou uso directo do calor transportado pelo fluido geotérmico do reservatório para a superfície através dos furos (directo na maior parte dos sistemas, secundário no caso de um fluido binário nas rochas do reservatório). No que respeita à Tecnologia do Reservatório, são abrangidos todos os aspectos que permitem a descoberta e caracterização dos reservatórios geotérmicos, assim como a captação e o transporte do calor para a superfície. Esta tecnologia pode condicionar fortemente um projecto geotérmico, devido aos aspectos económicos, principalmente se se tratar de projectos de Alta Entalpia (Rocha, 2011).

Com a tecnologia actual, teoricamente pode-se fazer aproveitamento da Energia Geotérmica de Baixa Entalpia e de Muito Baixa Entalpia praticamente em qualquer parte do globo, uma vez que o aproveitamento destas pode ser feito essencialmente por uso directo ou recorrendo à instalação de BCG.

3.2. Alta Entalpia

O aproveitamento da energia geotérmica de alta entalpia está limitado à existência do recurso (localização, profundidade e custos de exploração) pelo que são as zonas vulcanicamente activas que dispõem de mais recursos de alta entalpia, daí a produção de electricidade ser, ainda, mínima a nível mundial, comparando com a utilização da energia geotérmica de baixa entalpia ou de muito baixa entalpia.

Segundo Chamorro et al. (2012), os reservatórios hidrotermais de alta temperatura são uma pequena parte de uma imensa fonte de energia armazenada sob a crosta terrestre. De salientar que os reservatórios hidrotermais de temperaturas moderadas são bem mais abundantes e, de forma a aproveitar estes recursos, as centrais geotérmicas do tipo Ciclo Binário serão os que mais irão contribuir, nos tempos mais próximos, para a produção de energia eléctrica a partir da energia geotérmica. A médio-longo prazo, o avanço da tecnologia dos sistemas geotérmicos estimulados (sistemas que permitem, a partir da perfuração e da injeção de água a grande profundidade, melhorar ou criar reservatórios geotérmicos artificialmente praticamente em qualquer parte do mundo) e de toda a tecnologia envolvente irá permitir que, cada vez mais, se recorra aos reservatórios do tipo Hot Dry Rock (HDR).

A energia geotérmica de alta entalpia é tipicamente aproveitada através de centrais geotérmicas para produção de energia eléctrica, aproveitando fluidos geotérmicos, normalmente com temperaturas superiores a 150 °C, para accionar turbinas e transformar a energia mecânica em eléctrica. A energia eléctrica produzida a partir de recursos geotérmicos representa menos de 0,5 % da necessidade mundial de electricidade. Ainda assim, as tecnologias emergentes para exploração destes recursos poderão significar um aumento significativo na contribuição da energia geotérmica para produção de electricidade (Chamorro et al., 2012), uma vez que já se pode produzir electricidade a partir de recursos geotérmicos com temperaturas inferiores a 150 °C, o que vai permitir uma maior abrangência territorial.

De forma a fazer uma melhor caracterização da Energia Geotérmica para produção de energia eléctrica, a electricidade produzida é um melhor indicador do que a capacidade instalada, isto porque o factor de capacidade das centrais geotérmicas é tipicamente maior que o de outras centrais. O factor de capacidade (FC) de uma central geotérmica pode ser calculado por:

$$F_c = \frac{E_{útil}}{E_{total}} \times 100\% \quad (3)$$

sendo $E_{útil}$ a energia real produzida pela central, num dado período de tempo, e E_{total} a energia que poderia ser produzida em plena capacidade nominal durante o mesmo período. O FC de uma central geotérmica pode atingir os 90 % (que significa que 90 % do tempo que a central labora há produção de energia e que apenas em 10 % do tempo há produção de quantidades residuais de energia), sendo que, em média, o FC das centrais geotérmicas se encontra à volta dos 73 %, contra os 30 % das centrais eólicas, por exemplo (Erlich, 2013; Chamorro et al., 2012).

3.2.1. Centrais Geotérmicas

A capacidade geotérmica instalada tem vindo a aumentar mundialmente ao longo dos anos. Nota-se um incremento significativo relativamente constante (com excepção verificada no período de 2005-2010), devendo-se, principalmente, à forte aposta efectuada no desenvolvimento e aproveitamento das energias renováveis (Chamorro et al., 2012). A Tabela 3.2 e o gráfico da Fig. 3.1 mostram a evolução referida, prevendo-se um aumento recorde para o período 2010-2015.

Basicamente existem três tipos de centrais geotérmicas (de Vapor Seco, de Flash e de Ciclo Binário) e a sua escolha depende directamente do fluido geotérmico existente: do seu estado (líquido ou gasoso), temperatura, disponibilidade, de questões económicas como a disponibilidade de investimento e custo da tecnologia.

A Tabela 3.3 mostra o número de centrais, bem como a contribuição da capacidade instalada em MW em 2010. Actualmente o número de centrais geotérmicas no mundo é semelhante ao de 2010, havendo diversos projectos para instalação de novas centrais.

Tabela 3.2: Evolução da capacidade geotérmica total instalada a nível mundial desde 1980 até 2010, com previsão para 2015 (Chamorro et al., 2012).

Ano	Capacidade instalada (MW)	Aumento relativamente aos 5 anos anteriores (MW)
1980	3887,0	
1985	4764,0	877,0
1990	5831,1	1067,1
1995	6866,1	1035,0
2000	7972,9	1106,8
2005	8932,6	959,7
2010	10897,0	1964,4
2015 (Previsão)	18500,0	7603,0

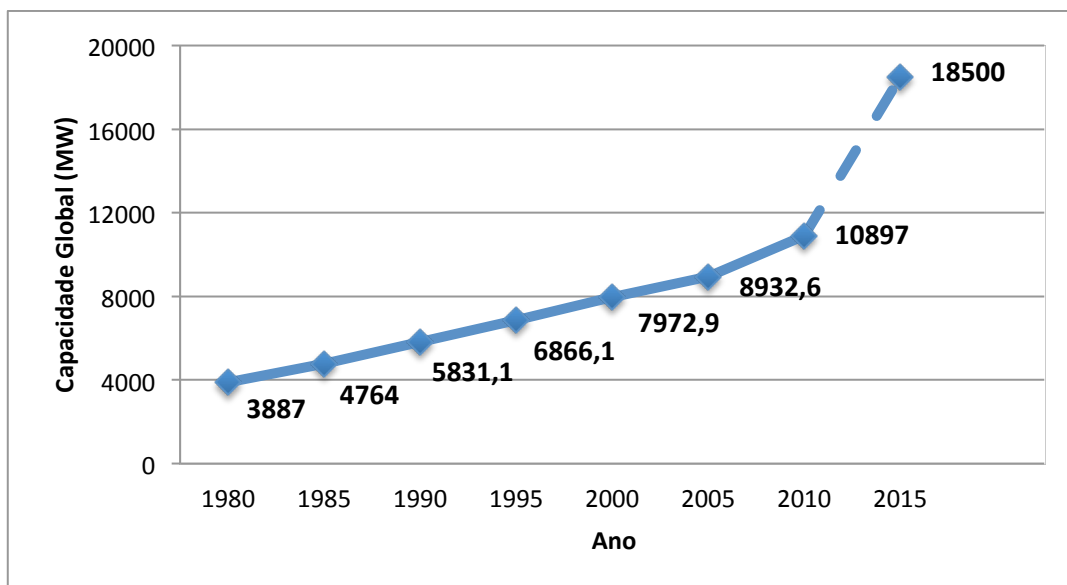


Fig. 3.1: Evolução da capacidade geotérmica total a nível mundial instalada desde 1980 até 2010 com previsão para 2015 (Chamorro et al., 2012).

Tabela 3.3: Centrais Geotérmicas em 2010 (Chamorro et al., 2012).

Tipo de Central	Quantidade	Capacidade instalada (MW)	% capacidade instalada total
Vapor Seco	61	2822,0	25,9
Flash	209	6734,3	61,8
Outras (maioritariamente Sistema Binário)	266	1341,5	12,3
Total	536	10897,8	100,0

3.2.1.1. Centrais Geotérmicas de Vapor Seco (*Dry Steam*)

As centrais geotérmicas do tipo Vapor Seco (*Dry Steam*) usam temperaturas elevadas ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) e os reservatórios geotérmicos são hidrotermais com predominância do estado de vapor, sendo as mais eficientes (Chamorro et al., 2012). São necessários três importantes componentes nestas centrais: um filtro de sucção, um separador centrífugo para remover pequenas partículas sólidas e um desumidificador. Isto porque embora a central de vapor seco apenas necessite de vapor para movimentar as turbinas, este tem que passar por alguns procedimentos (Ramos, 2014).

3.2.1.2. Centrais Geotérmicas de Vapor Flash (*Flash Steam*)

Para as centrais geotérmicas do tipo de Vapor Flash (*Flash Steam*) os reservatórios geotérmicos são hidrotermais com predominância de estado líquido. Estas, aumentam a eficiência energética devido às temperaturas destes reservatórios ($> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), que, normalmente, são superiores às verificadas nos reservatórios geotérmicos hidrotermais com predominância de estado gasoso. As centrais *flash* podem ser de flash simples ou flash duplo, ambas utilizando uma mistura de vapor e líquido, proveniente dos reservatórios geotérmicos. Esta mistura é direccionada até à superfície através dos furos de produção, sendo depois encaminhada para um separador, onde se dá a separação do líquido do vapor. O vapor move a turbina e acciona um gerador que converte a energia mecânica em electricidade. Depois, o vapor sai da turbina e entra num condensador. O condensado

resultante, em conjunto com o líquido inicialmente separado, é posteriormente injectado no reservatório geotérmico. As centrais de duplo flash produzem até mais 17 a 25 % que as simples flash, possibilitando melhor relação performance/economia (Ramos, 2014; Chamorro et al., 2012).

3.2.1.3. Centrais Geotérmicas de Ciclo Binário

As centrais geotérmicas de Ciclo Binário – de Ciclo de Rankine ou de Ciclo de Kalina – operam quando a água do reservatório geotérmico apresenta uma temperatura inferior a 150 °C (Chamorro et al., 2012); usualmente com temperaturas entre 100 °C e 180 °C, podendo funcionar com temperaturas a partir de 80 °C (Goelec, 2013a).

Num sistema binário, o calor da água do reservatório é transferido para um fluido de trabalho o qual tem uma temperatura de ebulição inferior, podendo, assim, vaporizar-se com menos “calor geotérmico” e accionar a turbina mais rapidamente. Todo o fluido geotérmico usado é re-injectado e o fluido de trabalho, depois de arrefecido (e condensado), está pronto para repetir o processo (Goelec, 2013a).

3.2.1.3.1. Central Geotérmica de Ciclo Orgânico de Rankine

A maior parte das centrais geotérmicas de Ciclo Binário utilizam o sistema de Ciclo Orgânico de Rankine para converter a energia térmica em energia eléctrica. Este é um ciclo termodinâmico que utiliza um fluido orgânico como fluido de trabalho para produzir electricidade. Os fluidos de trabalho nos Ciclos Orgânicos de Rankine são seleccionados seguindo critérios minuciosos, sendo a sua pressão de ebulição, juntamente com a temperatura do reservatório geotérmico, importantes factores e parâmetros para dimensionamento e concepção do ciclo.

As centrais mais avançadas usam o Ciclo Orgânico de Rankine de dois ciclos, com duas pressões para aumentar a sua eficiência (Ramos, 2014).

3.2.1.3.2. Central Geotérmica de Ciclo de Kalina

A principal diferença e característica neste tipo de centrais é que o Ciclo de Kalina utiliza como fluido de trabalho uma mistura de amónia e água e a temperatura de evaporação da mistura varia com a concentração de amónia. No entanto, quando passa através do evaporador, a temperatura do fluido de trabalho pode ser adaptada à temperatura do fluido geotérmico.

Outra característica importante deste ciclo é que, com a separação da mistura, a percentagem de amónia e de água pode ser alterada e, ao mesmo tempo, as temperaturas de condensação e de evaporação podem também ser alteradas. Todas estas acções são realizadas por forma a obter um melhoramento na eficiência do ciclo (Ramos, 2014).

3.2.2. Sistemas Geotérmicos Estimulados

A Energia Geotérmica tem potencial para contribuir significativamente para o mix energético europeu (e mundial) através do desenvolvimento e aplicação de tecnologias recentes e avançadas (Goelec, 2013a). Em zonas onde o gradiente geotérmico possa ser anormalmente elevado e a grandes profundidades, pode ser feita a implementação da tecnologia dos EGS em recursos geotérmicos HDR, que permitem a recuperação de energia térmica em regiões que tradicionalmente não teriam potencial geotérmico. A utilização destes sistemas – EGS – permite melhorar ou criar reservatórios geotérmicos artificialmente em, praticamente, quase todo o mundo, criando grande potencial de aproveitamento da Energia Geotérmica.

A implementação dos sistemas EGS envolve (Goelec, 2013a):

- Utilização das fracturas naturais em rochas profundas existentes;
- Aumento da permeabilidade através de estimulação;
- Instalação de vários poços;
- Forçar a água a circular pelos sistemas de fracturas com permeabilidade melhorada, por bombagem e elevação do reservatório, para produção de energia através do calor extraído.

Então, é utilizada uma central com ciclo orgânico de Rankine ou com ciclo de Kalina para produção de energia eléctrica. O fluido geotérmico proveniente do reservatório, aquece um fluido de trabalho secundário através de um permutador de calor. Este fluido entra em ebulição e, na forma de vapor, acciona a turbina e dá-se o início da produção de energia eléctrica (Ramos, 2014).

Alguns projectos já foram efectuados no âmbito dos sistemas geotérmicos estimulados, com destaque para o caso de Soultz-Sous-Forêts. Este é um dos projectos mais interessantes na Europa e que foi iniciado na década de oitenta século XX e inaugurado em 2008. Trata-se de um projecto amplamente documentado, informação esta reunida durante as diversas fases de projecto e de produção. Este foi um projecto, que ao longo das suas etapas contou com um investimento de cerca de 80 milhões de euros, tendo sido 35 milhões financiados pela UE.

Para além das centrais geotérmicas descritas, outros sistemas são possíveis implementar, por forma a maximizar a sua eficiência, tais como sistemas de ciclo combinado e sistemas híbridos em conjunto com combustíveis fósseis e outras energias renováveis.

3.3. Baixa Entalpia

A energia geotérmica de baixa entalpia varia de acordo com a temperatura do fluido geotérmico, entre os 20 e os 150 °C, e a sua ocorrência está relacionada com a existência de acidentes tectónicos recentes, como por exemplo falhas, ou zonas de gradiente geotérmico mais elevado. É maioritariamente utilizada de forma directa.

Devido aos recentes avanços tecnológicos, a energia geotérmica de baixa entalpia tem vindo a ser utilizada para produção de energia eléctrica, mas maioritariamente com carácter experimental devido à baixa eficiência na transformação de energia térmica em energia eléctrica. Ainda assim, o uso e o aproveitamento de recursos geotérmicos de baixa entalpia em aplicações directas é economicamente viável e pode contribuir significativamente para o mix energético de um país ou uma região.

3.4. Muito Baixa Entalpia ou Superficial

A energia geotérmica de muito baixa entalpia ou superficial encontra-se tipicamente até 400 m de profundidade com temperaturas dos 0 a 30 °C, de acordo com as condições climáticas do local e a profundidade do furo de captação (Sanner, 2011).

Desde os 15-20 m e até cerca de 200 m de profundidade, a temperatura do subsolo é praticamente constante durante todo o ano, aspecto verificado na maioria dos países europeus. A pouco mais de 50 m de profundidade os valores rondam os 10 °C a 15 °C (Madureira e Antunes, 2012; Cruz, 2013).

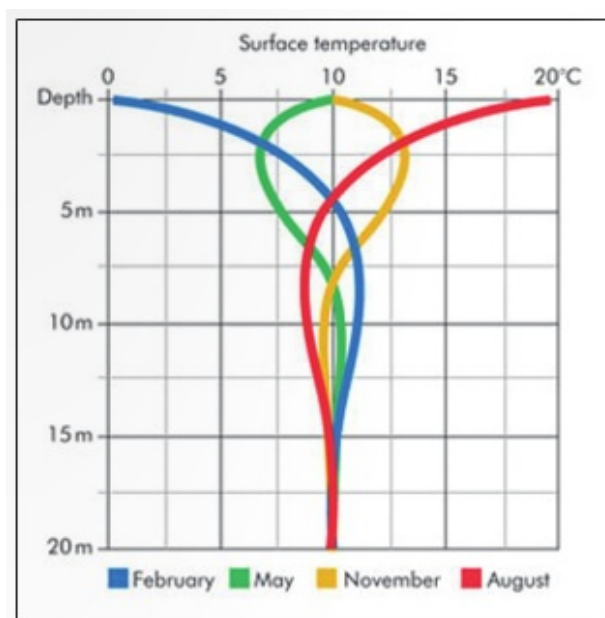


Fig. 3.2: Gráfico do comportamento de Temperaturas vs Profundidades. (Madureira e Antunes, 2012).

Estas temperaturas podem ser utilizadas para aumentar a eficiência energética na climatização de edifícios, uma vez que podem ser aproveitadas e potenciadas com aplicação de Bombas de Calor Geotérmicas. A Fig. 3.2 ilustra a variação típica da temperatura do solo ao longo do ano até 20 m de profundidade.

A maior parte da energia geotérmica superficial utilizável provém da energia solar, uma vez que, em média, a radiação solar que é absorvida pelo solo anualmente é de cerca de 1500 kWh/m², enquanto que o fluxo de calor geotérmico é somente 0,6 kWh/m² (Andersson, 2011). Assim, o solo serve de armazenador da energia solar.

3.4.1. Usos Directos

A utilização directa da energia geotérmica de baixa entalpia ou de muito baixa entalpia corresponde ao aproveitamento dos reservatórios geotérmicos com temperaturas inferiores a 30 °C até 150 °C. Este tipo de aproveitamento corresponde, estatisticamente, à maior fatia de utilização da Energia Geotérmica, pois é possível aceder mais facilmente a estes recursos, quer física quer economicamente. Estes recursos geotérmicos podem ser aproveitados directamente, por diversas formas, para fornecer energia e/ou calor, podendo representar uma redução de 50 a 80 % no consumo de combustíveis fósseis e energia primária, dependendo da utilização efectuada (De Carli et al., 2014).

Estima-se que a energia térmica instalada disponível para utilização directa no final de 2009 era de cerca de 48,5 GWt, correspondendo a um aumento de 72% relativamente a 2005 e a energia térmica usada corresponde a 117,7 TWh/ano, um aumento de 55% face a dados de 2005. Em 2010, 79 países faziam uso directo da Energia Geotérmica (contribuindo já com 50,6 GWt), representando um aumento relativamente ao ano de 2005 (72 países), sendo líderes China, EUA, Islândia, Japão, Noruega, França e Alemanha (Lund, 2010; Kiruja, 2011).

Na Fig. 3.3 está representada a distribuição das diversas utilizações directas da energia geotérmica de baixa entalpia e superficial, em percentagem do consumo total destas utilizações, a nível mundial em 2010. Destaca-se a utilização de BCG, evidenciando o aumento considerável que tem vindo a ser registado neste tipo de utilização.

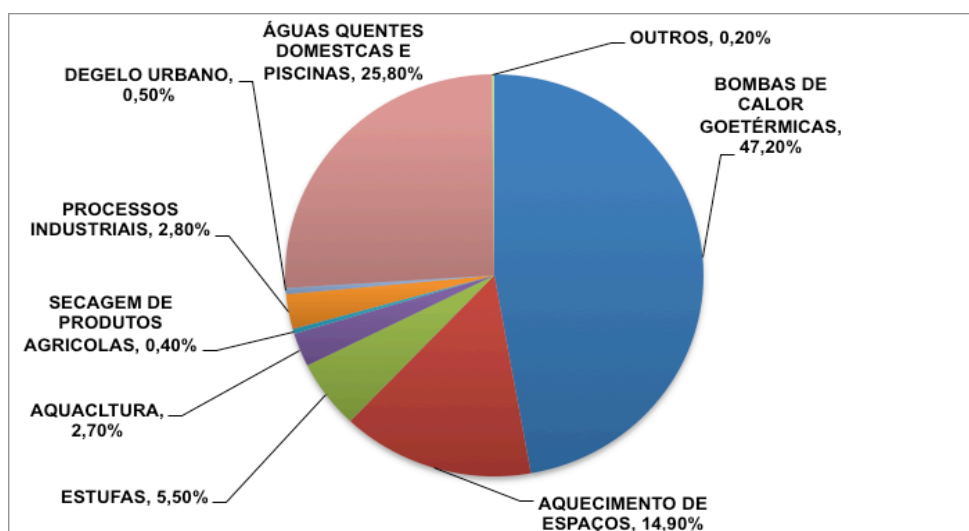


Fig. 3.3: Aplicações directas da Energia Geotérmica no Mundo em percentagem do consumo total de energia. Adaptado de Lund (2010).

A utilização directa da Energia Geotérmica, conforme o tipo de recurso geotérmico disponível e a intenção da utilização, pode ser dividida em aquecimento de águas, piscinas, balneoterapia, aquecimento e climatização de edifícios, incluindo aquecimento urbano (aquecimento/climatização comunitária), aplicações agrícolas como aquecimento de estufas e solos agrícolas, processos industriais incluindo secagem e desidratação de produtos agrícolas como alimentos e sementes, aquacultura, degelo de passeios, aplicação de bombas de calor geotérmicas e outros.

No que respeita à balneoterapia, as termas e spas são aplicações muito conhecidas da energia geotérmica de baixa entalpia, através do aproveitamento de águas termais para fins medicinais ou recreativos como piscinas. Também é feito o aquecimento/climatização de balneários. De realçar que através do aproveitamento em cascata é possível aumentar a rentabilidade dos recursos disponíveis para este tipo de utilizações, tal como referiu Lindal (1973).

Nos países nórdicos recorre-se à instalação de sistemas anti-congelamento por baixo dos passeios nas ruas, que evitam que a neve e o gelo se acumulem em passeios.

Devido à utilização directa da Energia Geotérmica, foram totalizadas poupanças energéticas equivalentes a 38 milhões tep, evitando 107 milhões de toneladas de CO₂ libertadas para a atmosfera (Lund, 2010). Para este feito, contribuiu grandemente a utilização de BCG para climatização, em vez da geração de electricidade através dos combustíveis fósseis para uso de aquecedores ou equipamentos de ar condicionado.

3.4.2. Bombas de Calor Geotérmicas

A bomba de calor é uma instalação térmica que se baseia num ciclo termodinâmico de Carnot inverso (consome energia da unidade e produz um efeito térmico).

O mercado das BCG apresenta grande crescimento, com a Suíça e a Suécia a liderar desde os anos de 1980, sendo que a Alemanha e a França denotam grande crescimento. De notar que, na Suíça cerca de 80 % dos edifícios residenciais unifamiliares recém-construídos estão equipados com bombas de calor, e, principalmente nas grandes áreas urbanas, as pessoas já não querem adquirir habitações sem bombas de calor, o que

provoca uma desvalorização da habitação por não ter esta tecnologia de climatização (Eugster, 2011).

A implementação de sistemas de aquecimento e climatização urbana através de aproveitamentos geotérmicos, com recurso à instalação de BCG, pode contribuir para o desenvolvimento na utilização da Energia Geotérmica, uma vez que, após o investimento inicial, permite poupanças energéticas e económicas acentuadas (manutenção barata) quando comparadas com sistemas típicos. Estes sistemas podem ser implementados em habitações particulares (pequena escala) e em blocos de apartamentos (aquecimento/climatização comunitária), em edifícios de serviços como hospitais (grande escala) e em processos industriais (Urchueguía e Sikora, 2011a).

Entre os sectores consumidores finais de energia, o sector dos edifícios ocupa um lugar de destaque. Torna-se necessário reduzir este consumo tornando os edifícios mais eficientes. Uma das tecnologias que tem vindo a ser usada por forma a atingir esta eficiência é a tecnologia das bombas de calor.

As bombas de calor são dispositivos que permitem a transformação de calor a partir de um nível inferior de temperatura para uma mais elevada. Fazem um “upgrade” da temperatura a que se encontra o subsolo, tornando-a usável para aquecimento e/ou climatização dos edifícios, não sendo propriamente uma utilização directa da Energia Geotérmica (Urchueguía e Sikora, 2011a). As bombas de calor são equipamentos muito eficientes, e a eficiência advém do uso conjunto de fontes renováveis, a energia geotérmica e a energia solar. Têm vindo a ser bastante utilizadas na climatização e aquecimento de edifícios por todo o mundo devido às altas e atractivas performances energéticas, ambientais e económicas.

Esta tecnologia aproveita o facto da temperatura do subsolo permanecer relativamente constante todo o ano, superior à temperatura do ar no Inverno e inferior no Verão. Assim, durante o Verão, a bomba retira o calor do interior do edifício e devolve-o ao subsolo. Durante o Inverno, a bomba transfere o calor do subsolo ou de águas subterrâneas para o interior do edifício. Quer isto dizer que o subsolo age como fonte de calor no Inverno e como depósito de calor no Verão.

Em 17 de dezembro de 2008, o Parlamento Europeu aprovou a Directiva da Energia Renovável (2009/28/CE), onde estabelece um quadro de políticas para a promoção da energia proveniente de fontes renováveis. Esta directiva abre uma grande oportunidade

para a promoção da utilização de bombas de calor para aquecimento e climatização de edifícios novos e existentes. Esta Directiva indica que a quantidade de energia aerotérmica, geotérmica ou hidrotérmica captada por bombas de calor que deve ser considerada como energia proveniente de fontes renováveis, E_{RES} , é calculada pela seguinte fórmula:

$$E_{RES} = Q_{usable} \times \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (4)$$

em que Q_{usable} é o total de calor utilizável estimado produzido por bombas de calor conformes aos critérios referidos no nº 4 do artigo 5º, aplicado da seguinte forma: só as bombas de calor para as quais $SPF > 1,15(1/\eta)$ são tomadas em consideração. SPF é o factor médio de desempenho sazonal estimado para as referidas bombas de calor; η é o rácio entre a produção total bruta de electricidade e o consumo de energia primária para a produção de electricidade, e é calculado enquanto média da UE com base em dados do Eurostat.

De acordo com Sarbu e Sebarchievici (2014), o coeficiente de performance (COP) caracteriza o desempenho de uma bomba de calor e é definido por:

$$COP = \frac{E_U}{E_D} \quad (5)$$

onde E_U é a energia térmica útil ou a energia utilizável e E_D é a energia consumida para produzir a energia útil. Se E_U e E_D dizem respeito à energia térmica utilizável e à energia consumida durante um ano, obtém-se da eq. (5) o $COP_{sazonal}$ ou SPF , que traduz o coeficiente de performance sazonal.

No modo de aquecimento o COP é definido por:

$$COP_{AQUEC.} = \frac{Q_{HP}}{P_e} \quad (6)$$

onde Q_{HP} [W] é a energia térmica (capacidade) da bomba de calor, e P_e [W] é a potência de accionamento da bomba de calor.

No modo de arrefecimento, uma bomba de calor funciona exactamente como um equipamento de ar condicionado. O rácio de eficiência energética (EER) é análogo ao COP, mas mede a eficiência de arrefecimento no estado de equilíbrio de uma bomba de calor. O EER [Btu/Wh] é definido pela equação

$$EER = \frac{Q_0}{P_e} \quad (7)$$

onde Q_0 [Btu/h] é a potência de arrefecimento da bomba de calor, e P_e [W] é a potência de accionamento da bomba de calor. Por seu turno, o COP da bomba de calor no modo de arrefecimento é obtido pela equação:

$$COP_{ARREF.} = \frac{EER}{3,413} \quad (8)$$

onde o valor 3,413 é o factor de transformação de Watt em Btu/h. O uso de uma BCG é só considerado caso o $COP > 2,78$.

As bombas de calor são mais eficientes no aquecimento do que no arrefecimento, uma vez que a energia de entrada do compressor é, em grande parte, convertida em calor útil quando em modo de aquecimento, e é descarregado juntamente com o calor transferido através do condensador. O correcto dimensionamento deve ser feito tendo em conta todo o sistema em conjunto (solo, a bomba, e o edifício) e os seus componentes, de tal maneira que seja alcançada a operação mais eficaz para implementar a melhor instalação.

Os principais componentes do sistema são:

- a fonte ou reservatório de calor, o solo (e o equipamento necessário para tal)
- a bomba de calor para converter o calor (numa temperatura susceptível de ser utilizada)
- e os equipamentos no interior do edifício para dissipar o calor ou frio nas divisões.

Basicamente a bomba extrai energia térmica da fonte (solo). De seguida potencia esta energia e depois liberta-a para o edifício (ou suas divisões) através dos equipamentos no interior do edifício instalados para esse efeito.

Os sistemas de captação de energia térmica podem ser classificados genericamente como sistemas abertos ou fechados. A escolha recai em determinado tipo (aberto ou fechado) tendo em conta a geologia e a hidrogeologia do local, a área disponível para implementação do sistema (o sistema fechado horizontal requer maior área disponível), a existência e disponibilidade dos recursos geotérmicos, como minas, e as características térmicas do edifício.

- Sistema Aberto

A principal fonte ou armazenador de calor é água subterrânea (aquíferos) que circula livremente no subsolo. Serve igualmente como um meio para a troca de calor com as rochas. Embora haja necessidade de alguma manutenção nos poços produzidos, estes sistemas permitem uma inequívoca fonte de calor por um custo baixo, ou razoável. Os principais requisitos são a existência de permeabilidade suficiente para permitir a produção da quantidade de água subterrânea necessária e que estas possuam boas propriedades químicas (nomeadamente baixo teor de ferro por forma a diminuir ou prevenir a corrosão). É um sistema que é aplicado em instalações relativamente grandes. Pode apresentar como desvantagem problemas ambientais oriundos de um estudo do local mal efectuado que pode levar a contaminação dos aquíferos.

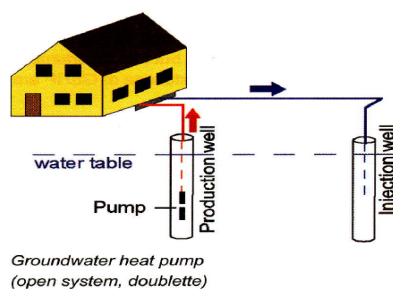


Fig. 3.4: Exemplo de sistema aberto. Fonte: EGEC.

- *Sistema Fechado Horizontal*

Os sistemas mais fáceis de implementar são os sistemas fechados horizontais. Posteriormente à escavação, colocam-se os tubos no solo e a terra retirada é reposta por cima dos tubos. São sistemas que funcionam em circuito hidráulico fechado, sendo a radiação solar incidente no solo a principal fonte de calor.

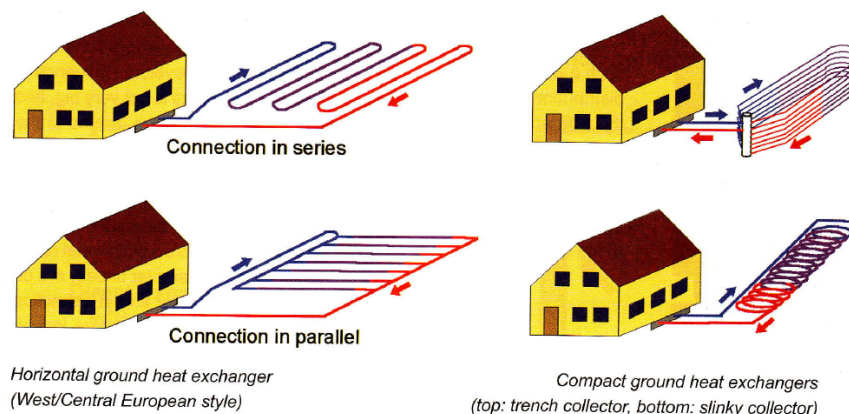


Fig. 3.5: Exemplo de sistemas fechados horizontais. Fonte: EGEC.

- *Sistema Fechado Vertical*

Na “zona neutra” (15 a 20 metros de profundidade), a temperatura é relativamente constante ao longo do ano. Este facto, bem como a necessidade de pouca área de instalação do sistema, favorece a instalação de permutadores de calor verticais. A fonte de calor nestes sistemas é, em parte, a radiação solar absorvida pelo solo (na parte superior) e o fluxo geotérmico (na parte inferior), para o qual o parâmetro principal é a condutividade térmica das rochas. Aqui, a influência de águas subterrâneas muitas vezes não é significativa.

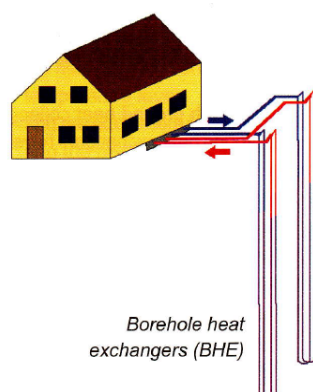


Fig. 3.6: Exemplo de sistema vertical fechado. Fonte: EGEC.

Uma aplicação recente da energia geotérmica de muito baixa entalpia denomina-se de estrutura termo-activa (Fig. 3.7), que consiste, basicamente, em usar as fundações dos edifícios para extrair energia térmica do subsolo (Cruz, 2013).

Os sistemas verticais são normalmente utilizados em detrimento dos sistemas horizontais, uma vez que requerem menor área de terreno para implementação do sistema e têm menores custos de operação com o sistema de bombagem.

O uso da energia geotérmica superficial, recorrendo ao uso de BCG para fins de climatização e aquecimento, é uma solução amiga do ambiente que reduz significativamente os custos com a energia. Trata-se de uma tecnologia versátil que pode funcionar em conjunto com outros sistemas, criando um conjunto híbrido. Como não produz gases de combustão, não há emissão directa de CO₂. Os sistemas podem ser adaptados em praticamente todas as superfícies, o que é mais uma vantagem a ter em consideração.



Fig. 3.7: Esquema de captação vertical através de estacas de fundação. (Cruz, 2013).

Assim, por forma a utilizar as baixas e constantes temperaturas, características da geotermia superficial, pode-se recorrer às BCG, aumentando ou diminuindo a temperatura do fluido geotérmico proveniente do furo para um nível considerado utilizável. Outra forma de potenciar este aproveitamento é o Armazenamento Subterrâneo de Energia Térmica (Undeground Thermal Energy Storage), para aumentar ou diminuir a temperatura do solo armazenando ou extraíndo calor ou frio (Sanner, 2011).

3.4.3. Armazenamento Subterrâneo de Energia Térmica

A energia térmica, na forma de calor ou frio, pode ser armazenada e usada posteriormente para garantir as necessidades de climatização ou aquecimento em edifícios, usando a tecnologia de Armazenamento Sazonal Subterrâneo de Energia Térmica. De facto, esta tecnologia permite o armazenamento de energia térmica, por exemplo durante o Verão para posterior aquecimento no Inverno, uma vez que a bomba de calor extrai o calor do edifício e deposita-o no subsolo. No Inverno o processo é inverso.

Este tipo de instalações, associadas a outro tipo de energia renovável, como por exemplo a energia solar por instalação de colectores solares, pode ser potenciada de forma efectiva através da captação de energia solar, uma vez que a radiação proveniente do sol também é absorvida pelas primeiras camadas do solo e é uma das principais fontes de energia do Armazenamento de Energia Subterrâneo.

O armazenamento subterrâneo de energia térmica tornou-se uma técnica cada vez mais atraente e reconhecida como uma medida eficaz para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a redução do aquecimento global. Pode ser feito segundo dois sistemas: o armazenamento de energia térmica em aquíferos (ATES – *Aquifer Thermal Energy Storage*) e o armazenamento de energia térmica no subsolo com instalação de permutadores de calor (BTES – *Borehole Thermal Energy Storage*). Estes sistemas podem potenciar, sobremaneira, os equipamentos de aproveitamento geotérmico, como as BCG, aumentando assim a eficiência dos sistemas de aquecimento e climatização. O princípio é simples: injectar água por um poço (no caso do sistema BTES) ou num aquífero (ATES) e aproveitá-la posteriormente para climatização (aquecimento ou arrefecimento), dependendo da estação do ano ((IFTECH, 2006); (Worthington, 2010); (Ohga e Mikoda, 2001)).

Assim, o ATES esquematizado na Fig. 3.8, é o mais adequado para soluções de climatização em sistemas comunitários, uma vez que consegue providenciar energia térmica de forma mais rentável, devido às necessidades de climatização da comunidade, aumentando a eficiência de custos com a escala do sistema. Alguns exemplos da aplicação do ATES são conhecidos na Holanda e Suécia, entre outros ((IFTECH, 2006); (Worthington, 2010); (Ohga, 2001)).

Por seu turno, o sistema BTES (Fig. 3.9) é muito eficaz desde que bem implementado e pode ser instalado em conjunto com outros sistemas, tais como Bombas de

Calor Geotérmicas, aparelhos de ar condicionado, permutadores de calor, colectores solares, etc (Worthington, 2010).

Vários países europeus utilizam a tecnologia de armazenamento subterrâneo de energia térmica, seja ele o ATES ou o BTES ou os 2 sistemas (IFTECH, 2006; Worthington, 2010). Entre eles, destacam-se a Holanda, a Alemanha e a Suécia. Da documentação consultada, há relatos e a expectativa que esta tecnologia possa ser economicamente viável e atractiva no Estados Unidos da América, devido aos recursos geotérmicos existentes e conhecidos.

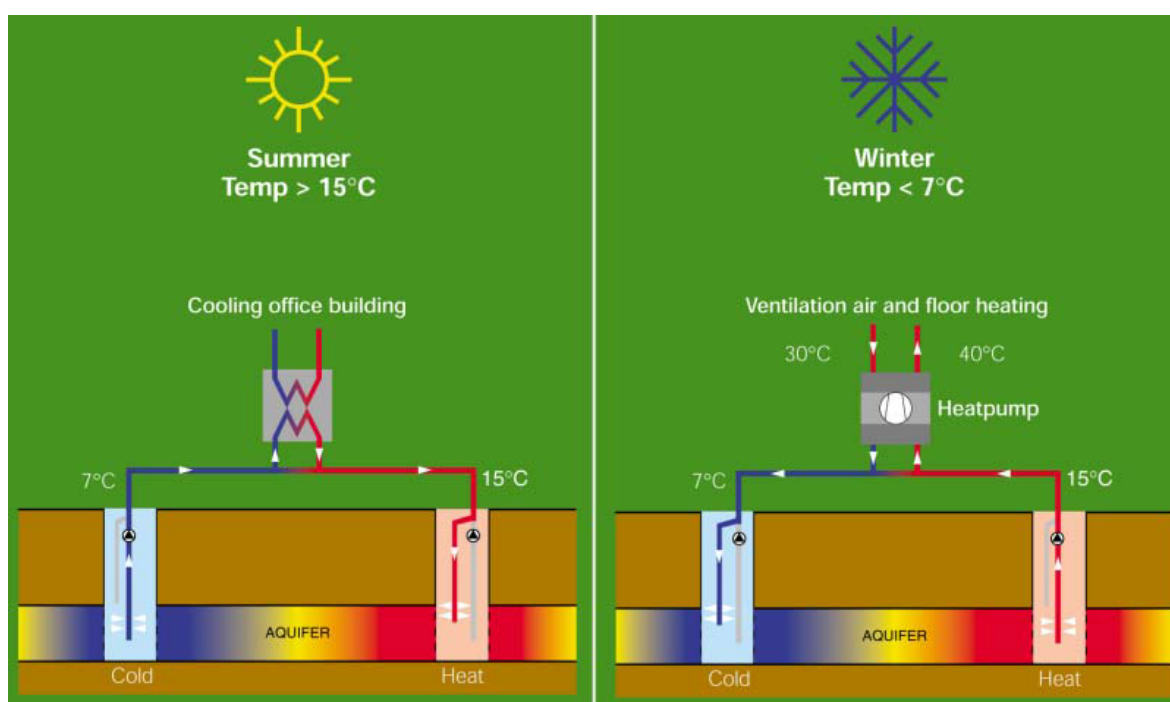


Fig. 3.8: Funcionamento ATES. (IFTECH, 2006).

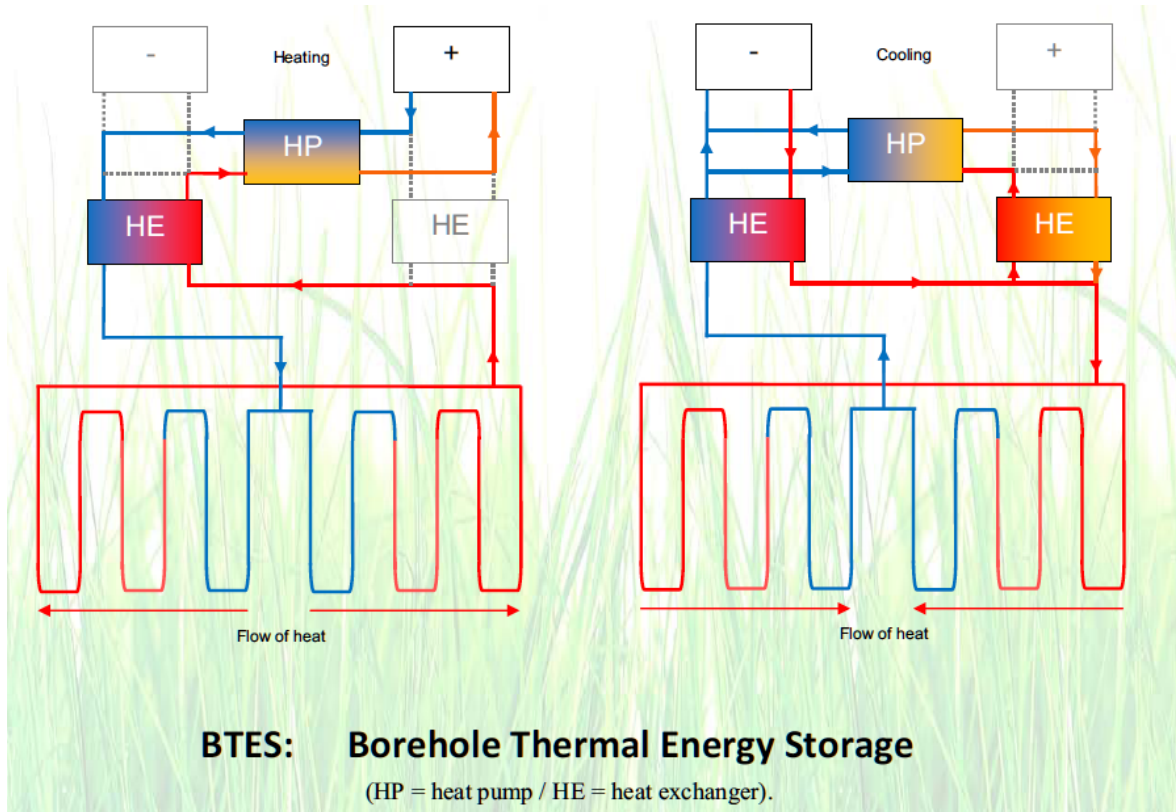
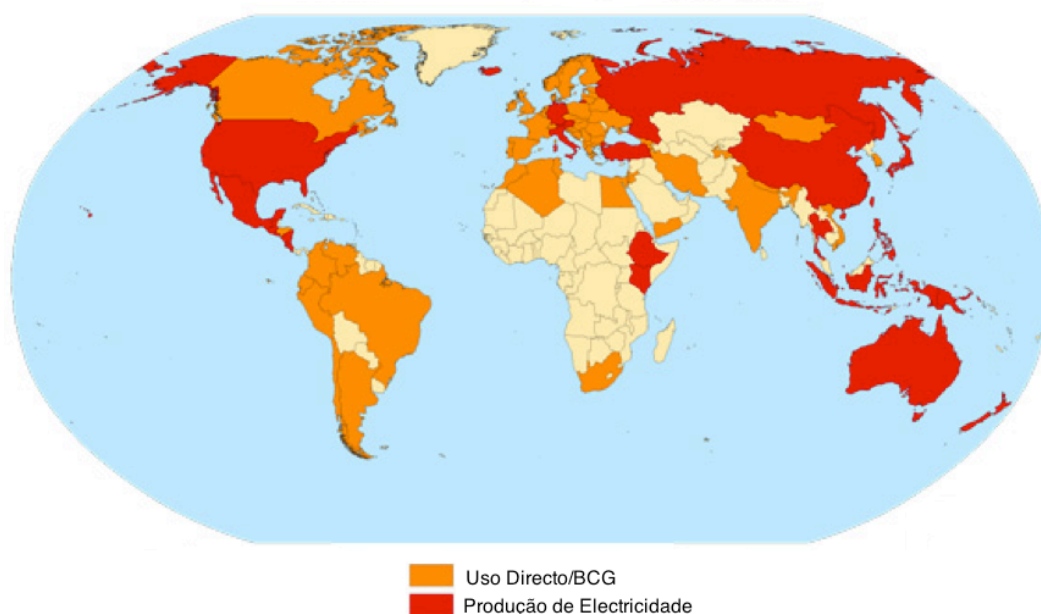


Fig. 3.9: Funcionamento BTES. (IFTECH, 2006).

4. ENERGIA GEOTÉRMICA NO MUNDO

A utilização da Energia Geotérmica a nível mundial difere muito de local para local, até mesmo de continente para continente, seja por falta de promoção governamental ou institucional, seja pela variabilidade da localização dos recursos geotérmicos ou mesmo pelas tecnologias e investimentos disponíveis para o melhor aproveitamento do recurso disponível. Em 2005, a capacidade instalada era de 8,93 GW produzindo cerca de 55,81 TWh passando em 2010 para uma capacidade instalada de 10,72 GW produzindo cerca de 67,25 TWh. (Bertani, 2012). O mapa da Fig 4.1 representa a distribuição mundial da utilização da Energia Geotérmica.



Obs.: Praticamente todos os países produtores de electricidade via Geotermia fazem uso directo e utilizam BCG.

Fig. 4.1: Uso Global da Energia Geotérmica em 2010. Fonte: GRC.

Muitos países têm vindo a desenvolver o trabalho de base necessário, realizando inventários e quantificando os seus recursos, para que, quando haja investimento disponível, seja governamental ou privado, possam então desenvolver esta fonte de energia renovável.

A capacidade eléctrica geotérmica instalada em 1995 era de 6,8 GW_e (Dickson e Fanelli, 2004), sendo que, em final de 2013, era cerca de 12 GW_e (REN21, 2014).

Em 2012, o maior crescimento na utilização da Energia Geotérmica verificou-se na América Central, na África Oriental e na Ásia, devido essencialmente ao crescimento económico dos mercados em desenvolvimento, ao aumento populacional e às necessidades energéticas associadas a este crescimento.

De acordo com o Relatório Geral Internacional do Mercado da Associação de Energia Geotérmica, de 2012, o Quénia gera cerca de oito vezes mais energia eléctrica por via geotérmica (202 MW) do que o país líder no consumo energético (a China), que apenas produz 24 MW de “Electricidade Geotérmica”. Devido à sua localização no Rift da África Oriental, o Quénia tem um enorme potencial geotérmico.

Nas Filipinas houve um forte apoio governamental no fomento da utilização e desenvolvimento dos recursos geotérmicos, com o objectivo de suprir as necessidades energéticas de uma população em crescimento, tornando este país no segundo maior produtor de energia geotérmica a nível mundial, liderado pelos Estados Unidos da América (EUA). Segundo o mesmo relatório, os EUA são o líder mundial neste sector, com uma capacidade geotérmica instalada de 3,4 GW e representam cerca de 29 % da capacidade instalada no Mundo. Seguem-se, portanto, as Filipinas, com aproximadamente 1,9 GW, e a Indonésia com 1,3 GW. Em 2013, os países com maior capacidade geotérmica global foram a Nova Zelândia, seguida pela Turquia e pelos EUA. Existe também potencial para a utilização de energia geotérmica para efeito de produção de energia na África Oriental, América Central, Chile, Rússia, Itália, Islândia e Turquia, estando em estudo diversos projectos de aplicação e aproveitamento da Energia Geotérmica (REN21, 2014).

No que se refere a aplicações não eléctricas, como aquecimento de águas sanitárias, aquecimento/climatização de edifícios públicos e privados, estufas, aquacultura, bombas de calor geotérmicas, de entre outros, 58 países faziam uso directo da energia geotérmica em 2004, contra 28 em 1995 (Lund et al., 2011). Actualmente neste sector da Energia Geotérmica, a China é o país líder, seguido pela Turquia e pela Islândia.

A Agência Internacional da Energia prevê que a energia geotérmica para fins de aquecimento contribua anualmente 5.8EJ até 2050 (IEA, 2011).

4.1. Energia geotérmica Na Europa

Segundo Cansino et al. (2011), a utilização final de energia pelas famílias e pelo sector de serviços representava cerca de 39,5 % do consumo final total de energia na UE-27 em 2007, sendo que a climatização e o aquecimento de águas representava cerca de 70 % do consumo doméstico de energia e cerca de 14% das emissões de GEE da UE-27. Para os membros UE-15, o aquecimento habitacional corresponde a cerca de 68,8 % do consumo doméstico de energia total, contando o aquecimento de águas domésticas com cerca de 13,8 % do consumo doméstico.

A Europa é a região líder mundial na utilização directa da Energia Geotérmica (Kepinska, 2008).

Com já referido anteriormente, o aproveitamento da Energia Geotérmica varia de local para local tendo em conta determinadas circunstâncias que podem limitar este aproveitamento. O espectro deste aproveitamento varia desde a geração de energia eléctrica a partir de recursos de alta entalpia localizados em regiões essencialmente vulcânicas (Islândia, Itália, Grécia, Turquia), até ao uso directo dos recursos hidrotermais nas bacias sedimentares (França, Alemanha, Polónia, Itália, Hungria, Roménia, e outros).

Os principais recursos de alta temperatura, propícios à produção de energia eléctrica, são encontrados principalmente em Itália e na Islândia. Na maior parte do território europeu dominam os recursos geotérmicos de temperatura intermédia ou baixa, sendo, portanto, predominante o uso directo (Lund, 2001). Este aproveitamento é feito principalmente para aquecimento de edifícios, em pequena escala, ou em aquecimento urbano (*district heating*), aquecimento de estufas, aquecimento de águas sanitárias e para climatização com recurso a bombas de calor geotérmicas.

É de salientar que, tal como Itália e Islândia, a ilha dos Açores, em Portugal, também é rica em recursos geotérmicos de alta entalpia. Aqui, há uma contribuição substancial da energia geotérmica na produção de energia eléctrica para fazer face às necessidades da região.

A energia geotérmica superficial e a energia geotérmica de baixa entalpia estão disponíveis em todas as regiões e são aquelas que maior aproveitamento têm, quer por uso directo, quer com recurso a BCG.

Em Abril de 1999, a EGEC (European Geothermal Energy Council) propôs a Declaração de Ferrara, que consistia numa linha de acção por forma a promover a

utilização da Energia Geotérmica na Europa e que apresentava metas e objectivos a alcançar em 2010 e 2020, tendo em conta os valores de 1998 (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Objectivos inscritos na Declaração de Ferrara, com excepção à capacidade instalada. (Antics et al., 2013).

	1998	2010	2020
Aquecimento [MW _t]	5200	15000	48000
Electricidade [MW _{el}]	940	2000	3000

Se em 2007 a capacidade instalada de energia eléctrica gerada pela Energia Geotérmica era de 1060 MW_e (Antics e Sanner, 2007), no final de 2012 esta capacidade aumentou para 1690 MW_e, (Renewable Energy Focus, 2013) ilustrando o enorme potencial de desenvolvimento e aproveitamento da energia geotérmica na Europa para a redução da elevada dependência nos combustíveis fósseis. Segundo Antics et al. (2013) a capacidade eléctrica total instalada em 2012 era de 1,85 GW_{el} produzindo 11,4 TWh de electricidade (Renewable Energy Focus, 2013). A capacidade instalada para fins de aquecimento, quer de geotermia de baixa a média entalpia, quer de geotermia superficial com recurso a bombas de calor geotérmicas, era de 23 GW_t. Estes valores denotam o enorme esforço que tem sido feito para se recorrer mais à energia geotérmica, mas também o enorme potencial que esta detem pela Europa (e pelo Mundo).

Têm sido realizados, recentemente, projectos para uso directo da energia geotérmica em vários países da Europa Central, e de geração de energia eléctrica geotérmica em países como a Itália e a Islândia (Lund, 2001), que são os líderes na Europa, nesta vertente. Actualmente, 99 % da electricidade da Islândia é de fonte geotérmica. Relativamente ao aproveitamento com BCG, Áustria, Suíça, Alemanha e Suécia são os países europeus na liderança.

O potencial geotérmico na Europa é reconhecido e, segundo Geoelec (2013a), este potencial em 2030 poderá significar cerca de 174 TWh de electricidade através da Energia Geotérmica.

4.2. Energia Geotérmica em Portugal

Portugal tem grande potencial de aproveitamento da Energia Geotérmica. Dispõe de vastos recursos geotérmicos, sejam eles de Alta Entalpia (caso do Arquipélago dos Açores) ou de Baixa Entalpia (Portugal Continental), podendo contribuir grandemente para as necessidades energéticas nacionais.

No que respeita ao aproveitamento da energia geotérmica de baixa entalpia ou superficial, esta é adequada para a estratégia portuguesa para a energia, inscrita no PNAER (República Portuguesa, 2010) (Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis), para alcançar os objectivos nacionais definidos pela directiva 2009/28/CE ("Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013", 2013).

Desde muito cedo se verifica uma grande utilização em Portugal, nomeadamente no Arquipélago dos Açores, da Energia Geotérmica para confecção de alimentos como a cozedura de milho directamente nas fumarolas, ou o Cozido das Furnas, colocado em panelas cobertas com sacos de lona em furos abertos no solo do campo de fumarolas das furnas, pratos estes típicos de São Miguel. O aproveitamento termal tem sido feito nas termas das Furnas ou nas termas da Caldeira da Ribeira Grande, por exemplo (Rocha, 2011).

No que se refere ao aproveitamento dos recursos geotérmicos de Alta Entalpia, a Energia Geotérmica nos Açores (recursos associados à junção das placas da América do Norte, Euroasiática e Africana) é também conhecida por algumas instalações que permitem a produção de energia eléctrica, constituindo um recurso endógeno muito importante, podendo ser atingidos nos próximos dez anos mais 30 MWe (Portal Energia, 2009). Actualmente encontram-se em funcionamento duas centrais geotérmicas na ilha de São Miguel (centrais de sistema binário com ciclo de Rankine, tanto na Central Ribeira Grande como na Central Pico Vermelho), responsáveis por uma produção de cerca 42 % da energia eléctrica consumida naquela ilha e 22 % do Arquipélago dos Açores. Um projecto recente de exploração profunda de recursos na ilha Terceira, de 2003 a 2010 atingiu uma temperatura máxima de 312 °C (Carvalho et al., 2013).

4.2.1. O caso de Portugal Continental

Relativamente a Portugal Continental, a situação é diferente. Não há vulcanismo activo e os recursos geotérmicos de baixas entalpias são predominantes. Assim, os aproveitamentos geotérmicos viáveis não passam pela produção de energia eléctrica, mas sim pelo uso directo em estufas, balneoterapia, termas, piscinas, aquecimento de águas sanitárias ou pela climatização (utilizando BCG), à semelhança ao cenário verificado em outros países europeus.

4.2.2. Aproveitamentos e Potencial existentes

Portugal Continental possui uma complexa e variada geologia. Juntamente com esta variabilidade, Portugal possui um apreciável potencial geotérmico, evidenciado pelo elevado número de ocorrências com temperatura superior a 20 °C (Fig. 4.3 – IGM, 1998), utilizadas com finalidades termais desde tempos antigos (Lourenço, 2013), e pelo gradiente geotérmico existente (Fig. 4.2 – Ramalho, 2014).

O potencial geotérmico em Portugal Continental pode ser aproveitado por duas vias (IGM, 1998; Lourenço e Cruz, 2005):

- Aproveitamento de polos termais existentes (temperaturas entre 20 e 76 °C): exemplos paradigmáticos são os aproveitamentos em Chaves (com a temperatura máxima registada de 76 °C) e em S. Pedro do Sul;
- Aproveitamento de aquíferos profundos das bacias sedimentares: caso do projecto geotérmico do Hospital da Força Aérea do Lumiar, em Lisboa, adquirida a partir de um furo com 1.500 m de profundidade com temperaturas superiores a 50 °C, que começou a funcionar em 1992, mas que, entretanto, foi desactivado e as instalações desmanteladas.

Um estudo exaustivo das ocorrências de águas com temperatura superior a 20 °C (naturais ou provenientes de furos) foi concluído em 1998 pelo ex-Instituto Geológico e Mineiro (Lourenço e Cruz, 2005). A Tabela 4.2 mostra estas ocorrências, tendo em consideração a temperatura máxima registada na respectiva localização, e as Figs. 4.3 e 4.4 (IGM, 1998) mostram a sua distribuição espacial de acordo com a temperatura e com o quimismo, respectivamente.

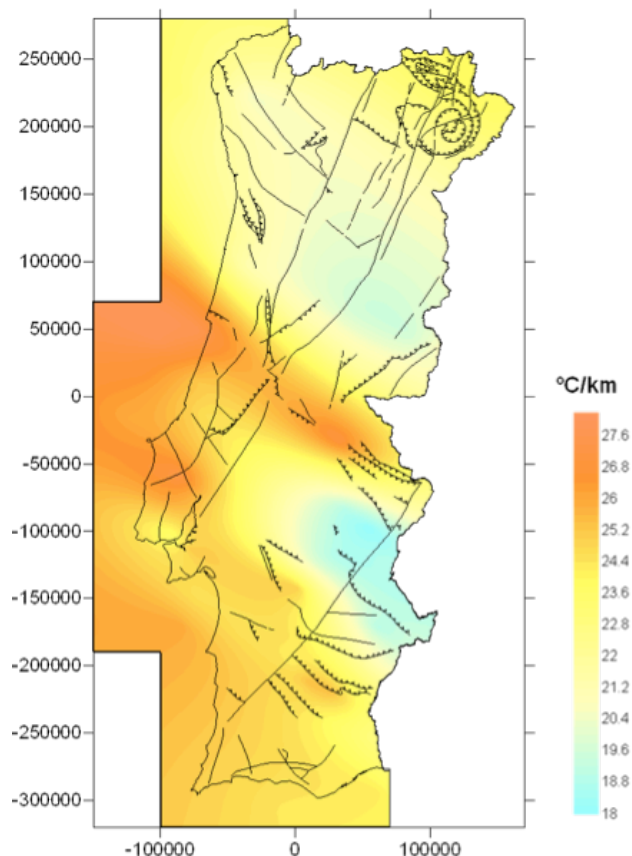
Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia

Laboratório de Geologia e Minas



CARTA DO GRADIENTE GEOTÉRMICO DE PORTUGAL

2014



Ramalho, E. C. (2014) - O papel no Atlas Geotérmico Nacional no fomento da exploração da energia geotérmica em Portugal Continental. *Apresentação oral feita no IX Congresso Nacional de Geologia, Porto.*

Fig. 4.2: Gradiente geotérmico médio em Portugal. (Ramalho, 2014).

A Fig. 4.3 e a Tabela 4.2 mostram o potencial existente no nosso país considerando as características geológicas estruturais de cada local. Traduzem igualmente a disparidade local da distribuição das ocorrências em todo o território, verificando-se que

a norte há uma predominância na zona Centro-Ibérica, devido principalmente às suas características geológicas e estruturais. Verifica-se que a maioria das ocorrências é de baixa temperatura (20 a 40 °C) e que a localização da maioria das ocorrências termais coincide com a localização de fracturas na crosta (zonas de falhas), que favorecem a ascensão de águas aquecidas provenientes de zonas mais profundas. A distribuição das ocorrências de água termal encontra-se directamente relacionada com aspectos essencialmente tectónicos, que favorecem a ascensão rápida dos fluidos, constituindo anomalias geotérmicas locais que sobressaem dos valores regionais de gradiente geotérmico.

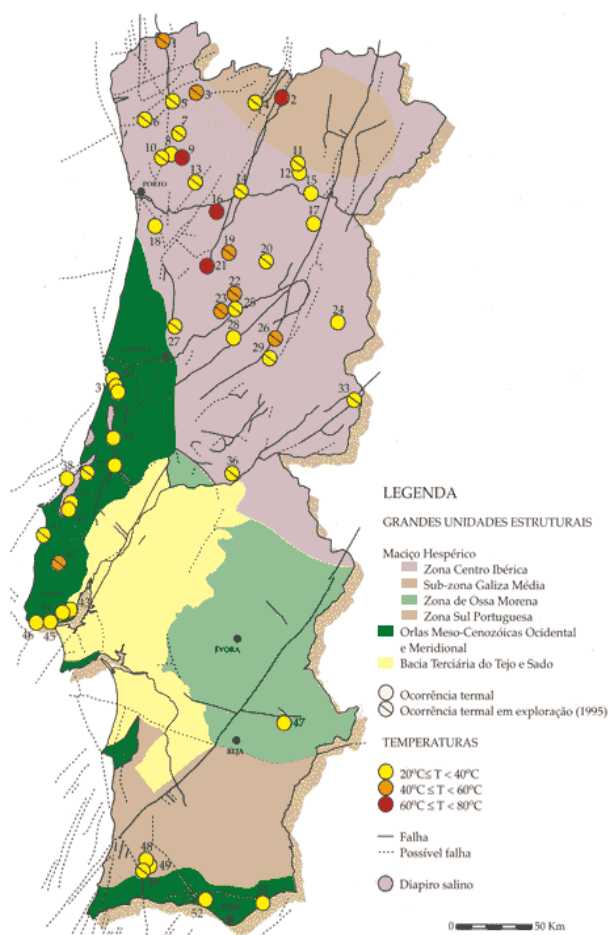


Fig. 4.3: Distribuição por temperaturas das ocorrências termais. (IGM, 1998).

Observa-se uma predominância na zona norte e centro do Maciço Hespérico, estando essa distribuição intimamente relacionada com grandes acidentes tectónicos, como é o caso, por exemplo, dos acidentes Penacova-Régua-Verin ou da Vilariça (Lourenço e Cruz, 2005).

Tabela 4.2: Emergências termais, temperatura máxima registada e características químicas da água.

(Lourenço e Cruz, 2005).

Nº	EMERGÊNCIA TERMAL	TEMPERATURA MÁXIMA REGISTADA (°C)	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Nº	EMERGÊNCIA TERMAL	TEMPERATURA MÁXIMA REGISTADA (°C)	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS
1	Monção	50	H2S, HCO3, Na, F	27	Luso	27	SiO2, Cl, Na, K
2	Chaves	76	HCO3, Na, F, CO2,	28	São Paulo	23	H2S, HCO3, Na
3	Gerês	47	HCO3, Na, F, S2O3	29	Unhais da Serra	37	H2S, HCO3, Na, F
4	Carvalhelhos	22	HCO3, Na, F	30	Amieira	27	Cl, Ca, Na
5	Caldelas	33	HCO3, Ca, F	31	Bicanho	28	Cl, Ca, Mg, Na
6	Eirogo	25	H2S, Cl, HCO3, Na, F	32	Azenha	29	Cl, Na
7	Taipas	32	H2S, HCO3, Na, F	33	Monfortinho	28	SiO2, Cl, Na, K
8	S. Miguel das Aves	22	H2S, HCO3, Na	34	Fonte Quente	24	Cl, HCO3, Na
9	Vizela	62	H2S, HCO3, F, Na	35	Salgadas	23	Cl, Na
10	Caldinhas	30	H2S, Cl, Na, F	36	Envendos	22	SiO2, Cl, Na, K
11	Carlão	29	H2S, HCO3, Na, F	37	Piedade	27	Cl, HCO3, Na
12	São Lourenço	30	H2S, HCO3, Na, K	38	Salir	20	Cl, Na
13	Canavezes	35	H2S, F, HCO3, Na	39	Caldas da Rainha	36	H2S, Cl, SO4, Na, Ca, Mg
14	Moledo	45	H2S, HCO3, Na, F	40	Arrábidos (Gaeiras)	29	H2S, Cl, Na
15	Fonte Sta. do Seixo	21	H2S, HCO3, Na	41	Vimeiro	26	HCO3, Cl, Na, Ca
16	Aregos	62	H2S, HCO3, Na, F	42	Cucos	40	Cl, Na, F
17	Longroiva	34	H2S, HCO3, Na	43	Alcaçarias	30	Cl, Na
18	S. Jorge	23	H2S, Cl, Na	44	Hosp. Força Aérea	50	HCO3, Ca, Mg
19	Carvalho	41	H2S, HCO3, Na, F	45	Oeiras - S.S.F.A.	30	HCO3, Na
20	Cavaca	29	H2S, HCO3, Na, F	46	Estoril	35	Cl, Na
21	S. Pedro do Sul	69	H2S, HCO3, Na, F	47	Santa Comba	22	HCO3, Ca
22	Alcafache	51	H2S, HCO3, Na, F	48	Malhada Quente	28	HCO3, Na, SO4
23	Sangemil	50	H2S, HCO3, Na, F	49	Alferce	27	HCO3, Na,
24	Cró	23	H2S, HCO3, Na	50	Monchique	32	HCO3, Na, F
25	Felgueira	36	H2S, HCO3, Na, F	51	Santo António	25	HCO3, Ca
26	Manteigas	48	H2S, HCO3, Na, F	52	Fte. Sta. Quarteira	21	HCO3, Na, Ca, Mg

Estudos científicos realizados em alguns dos polos considerados, demonstram que as temperaturas de reservatório são significativamente superiores às verificadas à superfície e, através de trabalhos de prospecção em profundidade, as temperaturas baixas

na maioria das ocorrências termais são susceptíveis de serem elevadas em profundidade (Lourenço e Cruz, 2005).

Relativamente ao quimismo das águas termais, e pela análise da Fig. 4.4, as águas predominantes são bicarbonatadas, cloretadas e sulfúreas. As águas sulfúreas são caracterizadas por presença reduzida de formas de enxofre, elevado teor em sílica, elevado teor do ião flúor e valores de pH elevados.

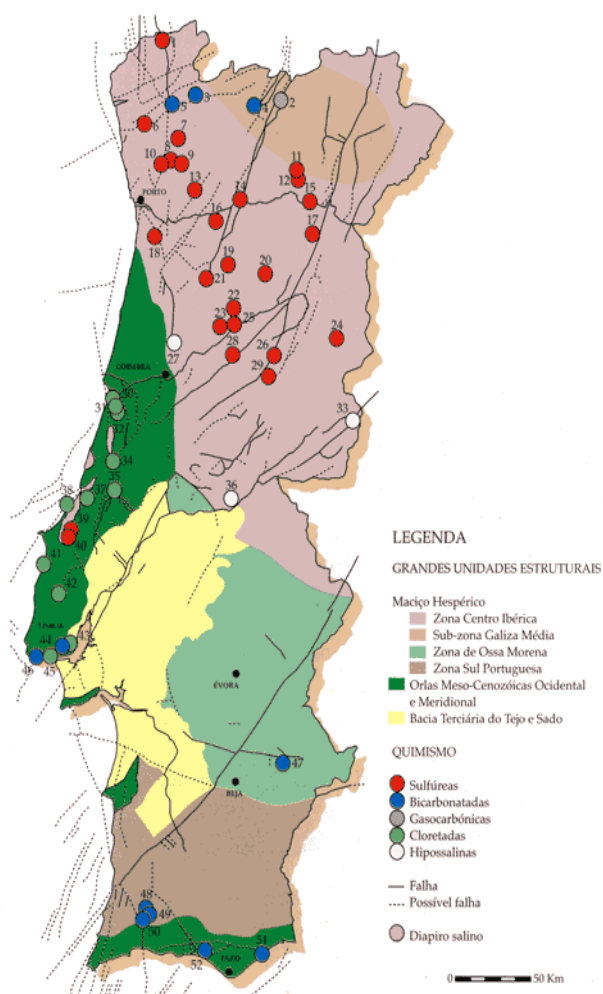


Fig. 4.4: Distribuição das águas termais tendo em conta o quimismo. (IGM, 1998).

As águas termais que ocorrem na Orla Meso-Cenozóica Ocidental são essencialmente cloretadas/bicarbonatadas sódicas, podendo também ocorrer águas sulfatadas cálcicas. As águas termais que se localizam na Orla Meso-Cenozóica Meridional têm como característica comum o facto de serem bicarbonatadas, sódicas ou cálcicas. As

águas termais que se localizam na Zona Centro-Ibérica do Maciço Hespérico são sulfúreas (IGM, 1998).

Os recursos geotérmicos de Portugal Continental justificam alguns aproveitamentos como produção de águas quentes sanitárias, climatização, balneoterapia, estufas, entre outros, os quais podem ser suficientes para as necessidades energéticas extra para suprir aquelas necessidades. Os aproveitamentos em cascata poderão ainda aumentar este potencial. Alguns casos de aproveitamento já são verificados como nas Caldas de Chaves (aproveitamento em cascata: piscinas, aquecimento urbano, estufas, piscicultura) e em São Pedro do Sul (aquecimento de balneários, hotéis), de entre outros. De referir que a utilização dos recursos geotérmicos existentes podem ser grandemente potenciados e aproveitados para climatização, habitacional ou industrial, por aplicação de BCG.

Assim, com o aumento verificado no desenvolvimento das técnicas de perfuração e nos estudos e desenvolvimentos feitos na área da climatização, Portugal Continental apresenta um enorme potencial ao nível dos recursos geotérmicos de baixa e muito baixa entalpia.

Recentemente, o interesse em realizar estudos e projectos para aproveitamento da energia geotérmica aumentou (aquecimento de estabelecimentos termais, à semelhança dos já existentes, hotéis, piscinas, estufas agrícolas, etc). De forma a aumentar o rendimento dos recursos existentes, as utilizações podem e devem ser projectadas e realizadas de forma integrada e sucessiva, tal como se mostra na Fig. 4.5 (Lourenço, 2013).

No que se refere a aquecimento urbano comunitário (*district heating*), encontram-se documentadas duas principais instalações, em Chaves e em S. Pedro do Sul. Em relação aos aproveitamentos geotérmicos em estufas, poucas utilizações são feitas, como refere Carvalho et al. (2013), destacando S. Pedro do Sul.

Relativamente ao uso de BCG não existe informação anterior 2009, mas até 2012 o número de instalações era mínimo (apenas 13 sistemas registados), como relatam Carvalho et al. (2013). O potencial para aproveitamento da energia geotérmica de baixa e muito baixa entalpia é enorme, mas não é aproveitado, cenário que poderá ser invertido devido à formação da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial que visa a divulgação da Energia Geotérmica, nomeadamente da Superficial, e preparação de legislação que regulamente o sector.

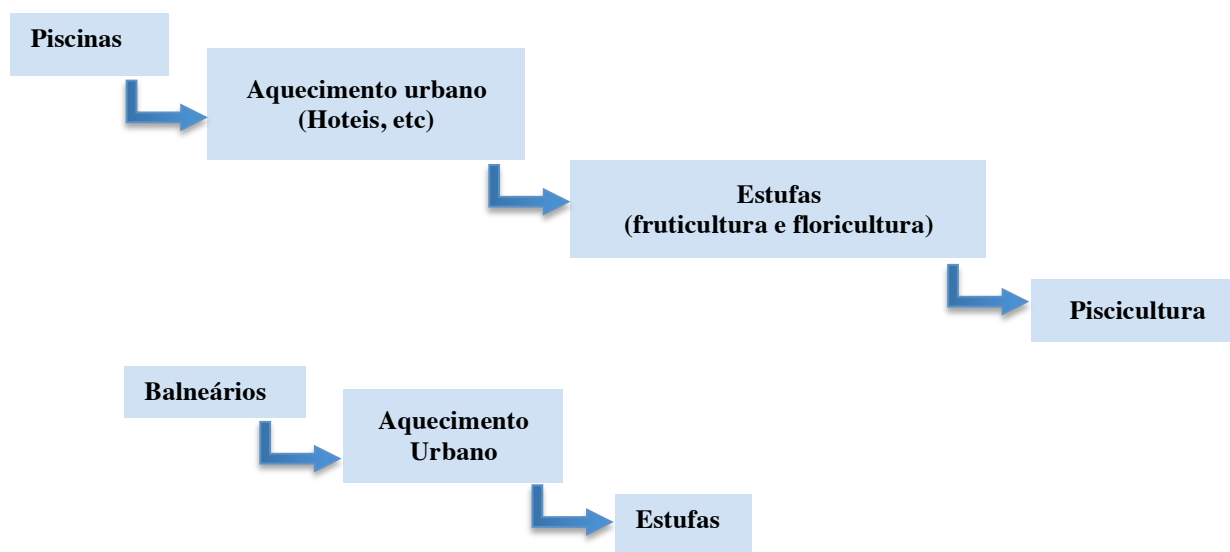


Fig. 4.5: Esquema de aproveitamento em cascata de recursos geotérmicos. (Lourenço, 2013).

Apesar das evidentes vantagens da utilização e exploração dos recursos geotérmicos, e ao contrário do que sucede em outros países, Portugal tem tido pouco desenvolvimento/aproveitamento nesta área, devido por um lado à falta de legislação clara e precisa, e por outro devido à falta de quadros técnicos especializados, bem como de investimento e de financiamento para que se proceda à realização de projectos completos, desde o inventário dos recursos ao perfeito funcionamento das instalações.

4.2.3. Alguns Projectos em Portugal

Alguns projectos foram efectuados em Portugal Continental no âmbito do aproveitamento do potencial geotérmico. Alguns ainda estão em curso e outros não passaram de estudos, uma vez que não prosseguiram. Exponho aqui alguns exemplos.

- *Projecto Europeu “Integration of Geothermal Energy into Industrial Applications – Groundhit”*:

O projecto europeu Groundhit, de que foi parceira a Escola Superior de Tecnologia (EST) do Instituto Politécnico de Setúbal, teve como principal objectivo demonstrar e promover o uso de bombas de calor geotérmicas de alta tecnologia, mais especificamente a demonstração de funcionamento da bombas de calor com COP > 5,5 em

circuito fechado com permutador de calor enterrado (Coelho, 2009). Resumidamente, a parte do projecto desenvolvida na EST consistiu em instalar, no laboratório de termodinâmica, duas BCG de 15KW_t para aquecimento e de 12KW_t para arrefecimento. Este projecto tinha como principal objectivo monitorizar um protótipo de uma bomba de calor com COP superior a 5,5 em condições reais no clima mediterrânico. Este projecto resultou particularmente bem, uma vez que foram atingidos COPs de 5,19 para arrefecimento e 6,05 para aquecimento em condições reais (Carvalho et al. (2013); Sanner et al. (2007)).

- *Projecto Europeu “GroundMed – Advanced ground source heat pump systems for heating and cooling in Mediterranean climate”:*

O projecto GroundMed, cujo parceiro português foi o Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra (ISR-UC), consistiu na instalação, no edifício da Administração Regional de Coimbra, de uma BCG de 56 kW_t para aquecimento e 61 kW_t para arrefecimento. Esta bomba de calor, com COP nominal de 5, tinha como função climatizar um conjunto de escritórios.

O projecto teve início em 1 de Janeiro de 2009 e encontra-se ainda a decorrer e, como tal, ainda não há dados suficientes para tirar conclusões (Carvalho et al., 2013; GroundMed, 2009; Carvalho e de Almeida, 2013).

- *Projecto de colaboração institucional da empresa GEOVITA e da FCTUC:*

Em 2007 foi feita uma reavaliação pela FCTUC do potencial existente para aplicação de Sistemas Geotérmicos Estimulados na região das Beiras, em Portugal. Esta região foi escolhida para este projecto, uma vez que se trata de uma zona granítica (com elevado fluxo de calor de origem radiogénica) e os sistemas geotérmicos estimulados obtêm bom rendimento devido às propriedades radioactivas. Posteriormente, em 2008, foi feito um acordo entre a FCTUC (DCT) e a empresa GEOVITA para desenvolver o potencial existente naquela região, tendo sido garantida uma área de cerca de 500 km^2 para a implementação do projecto. Contudo, em 2011, após a garantia em 2009 de venda de energia para a rede a $0,27\text{ €/kWh}$, a falta de investidores ditou o abandono do projecto pela GEOVITA (Neves, 2011).

• *Projecto de Geotermia na Ilha da Madeira:*

Encontra-se em curso o estudo da viabilidade de produção de energia eléctrica na ilha da Madeira por aplicação de EGS, uma vez que os dados geológicos existentes permitem pressupor a presença de fontes de calor passíveis de exploração para produção de energia eléctrica.

As principais fases deste estudo são i) o estudo prévio com prospecção e avaliação por forma a obter o máximo de informação possível sobre a localização das fontes térmicas; ii) caracterização do reservatório identificado através do estudo prévio e respectiva estimulação do reservatório; iii) instalação da central geotérmica (LNEG, 2010).

Espera-se com este estudo, juntamente com a devida análise económica, determinar a eventual viabilidade de aproveitamento geotérmico na Ilha da Madeira com recurso a sistemas EGS.

Outras concessões foram obtidas por investidores privados, para exploração de recursos geotérmicos para implementação de sistemas EGS para produção de energia eléctrica em pequena escala para uma área total de cerca de 2.600 km² em 2008. Estes projectos não foram concluídos, desconhecendo-se resultados técnicos e científicos.

5. ENQUADRAMENTO LEGAL NACIONAL DA ENERGIA GEOTÉRMICA

A legislação existente no que respeita à energia geotérmica superficial e às práticas da instalação de bombas de calor geotérmicas, bem como a protecção ambiental, é incompleta e pouco clara a nível mundial. Portugal não é excepção. A falta de legislação e a ambiguidade da que está em vigor, permite que algumas pessoas sem formação técnica necessária e sem os meios essenciais não favoreçam a imagem da energia geotérmica, tal como são elementos que podem prejudicar sobremaneira o ambiente com instalações com pouco ou nenhum rigor.

A crise energética vivida no início dos anos setenta do século passado, associada à vontade existente no arquipélago dos Açores de proceder ao aproveitamento geotérmico dos recursos aí existentes para a produção essencialmente de electricidade, levou ao estabelecimento do primeiro diploma legal relativo à geotermia, o Decreto-Lei nº 560/-C/76, de 16 de Julho, o qual veio definir o regime a que ficou sujeita a prospecção, a pesquisa e a exploração de recursos geotérmicos e determinar a integração dos mesmos no domínio público do Estado.

Em Coelho et al.(2013) encontra-se uma abordagem ao estado actual da legislação em Portugal. Actualmente, o Decreto-Lei 90/90 de 16 de Março está ainda em vigor e define o conceito de “Recurso Geológico”. O Decreto-Lei 87/90 de 16 de Março também ainda em vigor, estabelece os regulamentos para a exploração dos recursos geotérmicos.

Com efeito, a legislação vigente, que remonta a 1990, é imprecisa e incompleta, à luz do desenvolvimento tecnológico actual. A utilização de BCG e o aproveitamento da Energia Geotérmica Superficial não estão enquadrados nem definidos legalmente, embora já se reconheça o seu potencial de aproveitamento pelo PNAER. Este Plano Nacional identifica a energia geotérmica superficial como recurso renovável de relevante importância no contributo para atingir os objectivos da estratégia UE 20-20-20. Há uma necessidade crescente do desenvolvimento e aproveitamento das energias renováveis e, esta necessidade cria a oportunidade para o surgimento de vastos projectos,

nomeadamente em energias renováveis como a Energia Geotérmica, promovendo a utilização dos recursos disponíveis e potenciando a investigação nesta área.

Para corrigir esta situação obsoleta e confusa, e ajudar a definir o quadro geral da Energia Geotérmica, em Janeiro de 2013 foi criada a Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial (PPGS). Esta plataforma é resultado de um protocolo entre membros especializados de diversas entidades: a Associação Portuguesa de Geólogos (APG), o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), a Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e a Agência para a Energia (ADENE). A PPGS foi criada para divulgar o conhecimento sobre a energia geotérmica superficial em Portugal; para aumentar e promover a sua correcta utilização; e analisar toda a legislação nacional, europeia e mundial relacionada, com o objetivo de publicar informações novas, adaptadas a Portugal. Plataformas semelhantes já existem noutros países, onde a atividade mostrou ser um bom e eficaz meio para fazer parte da comunidade geotérmica, promovendo uma exploração segura, organizada e sustentável. Assim, e para ir ao encontro do que é pretendido pela PPGS, está a ser preparada legislação para estabelecer o regime jurídico aplicável ao aproveitamento da Energia Geotérmica, para efeitos de climatização, produção de águas quentes sanitárias e produção de energia eléctrica. O aproveitamento geotérmico superficial ainda não dispõe de enquadramento legal.

Para esta entidade, é imperativo fazer a distinção dos conceitos de recursos geotérmicos e de Energia Geotérmica, assim como analisar e regulamentar em que condições deve um solo ser considerado como recurso natural, dado o potencial existente desse solo para armazenamento de energia. Uma das metas da PPGS é regular o sector, para contribuir para o desenvolvimento da energia geotérmica superficial em Portugal e para a produção de alguns materiais que ajudarão os intervenientes a agir de acordo com as melhores práticas (Coelho et al., 2013; PPGS, 2013).

No Decreto-Lei nº 225/2007 e na Portaria 865/2009 encontram-se definidos os incentivos para produção de energia a partir de fontes renováveis.

A Directiva Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios, transposta pelo Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril, estabelece que a Energia Geotérmica, bem como outras Renováveis, devem ser de implementação obrigatória para edifícios novos e recuperados, sempre que economicamente viáveis (Coelho et al., 2013).

Na Europa, uma das zonas mundiais onde a Energia Geotérmica Superficial pode ser aproveitada significativamente com a implementação de Bombas de Calor Geotérmicas, ainda não há regulamentação apropriada, técnicos devidamente formados e informação geral para os consumidores. Não há normas comuns, apenas cada país regula à sua maneira. Mais, a análise da Directiva Quadro da Água (CE, 2000) e da VDI 4640 – Directivas alemãs para o uso de BCG, armazenamento de energia térmica no subsolo e do uso directo de energia geotérmica – leva a concluir que as autoridades competentes relativas aos assuntos ambientais devem ser envolvidas no trabalho da PPGS. Claramente, a legislação portuguesa deve ser actualizada o mais depressa possível, por forma a acompanhar a evolução dos países europeus (Coelho et al., 2013).

É necessário estabelecer medidas adequadas para impulsionar e promover o conhecimento das actividades relacionadas com a energia geotérmica superficial, desde o uso de BCG até à utilização do Armazenamento Subterrâneo de Energia Térmica. Enquanto não se alcança o consenso necessário à criação de leis e normas para o caso português, um primeiro passo seria a adopção da VDI 4640, fazendo os ajustes necessários às características de Portugal.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo centrou-se na divulgação e enquadramento da energia geotérmica.

A energia geotérmica é um dos recursos que pode ser aproveitado por todo o mundo, principalmente a energia geotérmica de baixa entalpia, uma vez que esta não se restringe às regiões vulcânicas. É uma das fontes de energia mais amigas do ambiente e com menor custo de utilização, embora o investimento na compra e instalação dos equipamentos seja ainda grande, quando comparado com outras fontes renováveis.

O aproveitamento geotérmico para fins de climatização e aquecimento, de entre outros, embora seja eficiente, requer pesquisa e desenvolvimento nos próximos anos para que a eficiência actual dos sistemas e equipamentos seja melhorada, por forma a reduzir os custos dos equipamentos e instalações. Para tal, são necessários incentivos para que sejam feitos investimentos em novas tecnologias. Sem estes incentivos o *payback* pode ser demasiado longo.

Salienta-se, no entanto, que este tipo de aproveitamento exige um investimento rapidamente amortizável, uma vez que, regra geral, é reduzido praticamente aos custos iniciais de instalação de todo o equipamento, uma vez que a sua manutenção é caracterizada pelo seu baixo custo.

Durante os próximos anos vamos assistir a um maior aproveitamento da Energia Geotérmica para fins de climatização e de produção de águas quentes sanitárias, entre outros, por via do desenvolvimento de tecnologias e de métodos que permitem fazer o aproveitamento desta energia renovável, como as bombas de calor geotérmicas. Este tipo de tecnologia vai ser mais acessível aos consumidores particulares, à medida que aumente a sua penetração no mercado.

Entre outras vantagens, a Energia Geotérmica tem grande potencial de aproveitamento de calor e permite uma independência energética dos países (por exemplo, relativamente aos combustíveis fósseis), devido ao aproveitamento de um recurso endógeno. Reduz a emissão de gases que potenciam o efeito de estufa, nomeadamente de dióxido de carbono. Permite a produção de energia em continuidade, uma vez que não é dependente de factores externos como o clima, ao contrário da energia eólica e solar, por

exemplo. Requer uma manutenção reduzida das instalações, as quais têm uma longa vida útil.

A necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis devido aos problemas ambientais, nomeadamente a emissão de GEE, leva a que se opte pela energias renováveis. Esta opção encontra por vezes obstáculos. A falta de incentivos, de financiamento, desconhecimento de técnicas e tecnologias, bem com a falta de mão de obra qualificada por forma a maximizar o uso destas energias, são alguns desses obstáculos. Claramente é crucial fazer o enquadramento legal e criar estratégias de desenvolvimento e aproveitamento das energias renováveis, bem como a formação de profissionais aptos a tirar o máximo rendimento destas energias sem que elas afectem o meio ambiente e por forma a que a dependência energética dos combustíveis fósseis seja reduzida ou mesma mitigada.

Seria de todo benéfico contribuir e continuar este estudo através da realização de estudos de natureza mais prática, nomeadamente testar sistemas híbridos (por exemplo, a conjugação da energia solar, com aplicação de colectores solares, com a energia geotérmica superficial, com aplicação de bombas de calor geotérmicas) em climatização e aquecimento, testando diferentes cenários de aplicação e utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013”.

Andersson, O. (2011), “Limitations”. In: *McCorry, M., Jones, Ll. (eds) 2011. Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Geotrained, European Federations of Geologists, Brussels. 15-20.

Antics, M., Bertani, R., Sanner, B. (2013), “Summary of EGEC 2013 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe”. *European Geothermal Congress 2013*, Pisa, Italy.

Antics, M., Sanner, B. (2007), “Status of Geothermal Use and Resources in Europe. *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany.

Bertani, R. (2012), “Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report”. *Geothermics*. 41(0): 1-29.

BP (2014), “BP Statistical Review of World Energy June 2014”. Disponível online em: <http://bp.com/statisticalreview>.

Cansino, J.M., Pablo-Romero, M. Del P., Román, R. Yñiguez, R. (2011), “Promoting renewable energy sources for heating and cooling in EU-27 countries”. *Energy Policy*. 39(6): 3803-3812.

Carvalho, A., de Almeida, A. T. (2013), “Ground-Med Project. Coimbra Demo-Site”. Disponível on-line em: http://www2.adene.pt/pt-pt/Destaques/Documents/Alpes-PPGS/S4_3_AnabelaCarvalho_ISR_UC.pdf

Carvalho, J.C. (2013), “Construção e Avaliação Térmica de um Colector Solar”. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

CARVALHO, J.M., CARVALHO, M.R. (2004), “Recursos Geotérmicos e seu Aproveitamento em Portugal”. *REVISTA DE XEOLOXÍA GALEGA E DO HERCÍNICO PENINSULAR*. 29: 97-117.

Carvalho, J.M., Coelho, L., Nunes, J.C., Carvalho, M.R. (2013), “Geothermal Energy Use, Country Update for Portugal”. *European Geothermal Congress 2013*. Pisa, Italy.

Chamorro, C.R., García-Cuesta, J.L., Mondéjar, M.E., Linares, M.M. (2014), “An estimation of the enhanced geothermal systems potential for the Iberian Peninsula”. *Renewable Energy*, 66(0): 1-14.

Chamorro, C.R., Mondéjar, M.E., Ramos, R., Segovia, J.J., Matín, M.C., Villamañán, M.A. (2012), “World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies”. *Energy*, 42(1): 10-18.

- Coelho, Luis M.R. (2009), “Exemplo de Aplicação de GSHP na ESTSetúbal”. IGEIA Workshop, Proambiente – Exposição Batalha, Portugal.
- Coelho, L., Tavares, N., Lourenço, C., Joyce, A., Madureira, P., Costa, J. (2013), “An Outlook of geothermal energy legal status in Portugal”. *European Geothermal Congress 2013*, Pisa, Itália.
- Comissão Europeia (2000), “DIRECTIVA 2000/60/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 23 de Outubro de 2000 que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da Água”. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*.
- Comissão Europeia (2009), “DIRECTIVA 2009/29/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- Cruz, R.J.L.V. (2013), “Utilização de Energia Térmica do Solo para Climatização de Edifícios”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- De Carli, M., Galgaro, A., Pasqualetto, M., Zarrella, A. (2014), “Energetic and economic aspects of a heating and cooling district in a mild climate based on closed loop ground source heat pump”. *Applied Thermal Engineering*.
- Decreto-Lei nº 225/2007.
- Decreto-Lei nº 87/90 de 16 de Março.
- Decreto-Lei nº 90/90 de 16 de Março.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (2004), “What is Geothermal Energy?”, *Istituto di Geoscienze e Georisorse*, Pisa, Italy.
- Ehrlich, R. (2013), “RENEWABLE ENERGY, A FIRST COURSE – Geothermal Energy”, *CRC Press*.
- European Geothermal Energy Council, “Geothermal Heat Pumps – Ground Source Heat Pumps”.
- Eugster, W.J. (2011), “Design Criteria”. In: *McCorry, M., Jones, Ll. (eds) 2011. Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Geotrained, European Federations of Geologists, Brussels. 29-30.
- GeoElec (2013)a, “A prospective study on the geothermal potential in the EU”.
- GeoElec (2013)b, “GeoElec Final Project Report”.
- Geothermal Resources Council, “What is geothermal?” Disponível on-line em: <http://www.geothermal.org/what.html>.
- Glassley, W.E. (2010), “Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment”. *CRC Press*.

- GroundMed (2009), “Advanced ground source heat pumps systems for heating and cooling in Mediterranean climate”.
- IFTECH (2006), “Underground Thermal Energy Storage for Efficient Heating and Cooling of Buildings”. Disponível on-line em:
http://www.i3con.org/files/conference-1/6-Fri-Energy_Efficiency/3_I3Conference%20-%20IFTech.pdf
- IGM (1998), “Recursos Geotérmicos em Portugal Continental: Baixa Entalpia”. Disponível on-line em:
http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/rec_geotermicos
- Intergovernmental Panel on Climate Changes (2009), “Chapter 4 – Geothermal Energy”. Contribution to Special Report Renewable Energy Sources. Disponível on-line em:
<http://srren.ipcc-wg3.de/report/srren-drafts-and-review/fod-drafts/fod-chapter-04>.
- International Energy Agency (2011), “Technology Roadmap: Geothermal Heat and Power”. Disponível on-line em:
www.iea.org/publications/freepublications/publication/name-3988-en.html
- Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2007). *Vamos mexer nos continentes*. INETI. Versão Online no site do LNEG:
http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/guiaio_tectonica_placas/texto
- Kepinska, B. (2008), “GEOTHERMAL ENERGY USE IN EUROPE” *Geothermal Training Programme*. Reykjavík, Iceland.
- Kiruja, J. (2011), “DIRECT UTILIZATION OF GEOTHERMAL ENERGY”. *Short Course VI on Exploration of Geothermal Resources*. Lake Bogori and Lake Naivasha, Kenya.
- LNEG (2010), “EGEM - Energia Geotérmica Estimulada da Região da Madeira”. Disponível on-line em:
<http://www.lneg.pt/iedt/projectos/313/>
- Lourenço, C. (2013), “Enquadramento Legislativo do Aproveitamento dos Recursos Geotérmicos / Geotermia. Disponível on-line em:
http://www2.adene.pt/pt-pt/Destaques/Documents/Apres-PPGS/S1_2_CarlaLourenco_DGEG.pdf.
- Lourenço, C., Cruz, J. (2005), “APROVEITAMENTO GEOTÉRMICOS EM PORTUGAL CONTINENTAL”. *XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros*, Ponta Delgada, Açores, Portugal.
- Lund, J. (2001), “Geothermal Use in Europe”. *Geo-Heat Center BULLETIN*.
- Lund, J.W. (2010), “Direct utilization of geothermal energy”. *Energies*, 3(8), 1443-1471.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L. (2011), “Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review”. *Geothermics*, 40(3), 159-180.
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>.

- Madureira, P.R., Antunes, P. (2012) “Geotermia de muito baixa entalpia. Razões e vantagens do seu aproveitamento”. *GEONOVAS*, 25.
- Neves, L. (2011), “HDR/EGS Potencial of the Beiras region, Central Portugal”.
- Ohga, H., Mikoda, K. (2001), “ENERGY PERFORMANCE OF BOREHOLE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS”. *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial (PPGS) (2013), “1º Seminário da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial – PPGS”. Disponível on-line em: <http://www2.adene.pt/pt-pt/Destaques/Documents/PPGS-apresentações.html/>.
- Portal Energia (2009), “Energia Geotérmica – funcionamento e tecnologia. Disponível on-line em: <http://www.portal-energia.com/energia-geotermica-funcionamento-e-tecnologia/>
- Ragheb, M. (2013), “Terrestrial radioactivity and geothermal energy”. *Nuclear, Plasma and Radiation Science*.
- Ramalho, E. C. (2014), “O papel no Atlas Geotérmico Nacional no fomento da exploração da energia geotérmica em Portugal Continental”. Apresentação oral feita no IX Congresso Nacional de Geologia, Porto, 18 a 24 de Julho.
- Ramos, N.C.M.M. (2014), “Viabilidade dos sistemas geotérmicos estimulados para a produção de energia eléctrica em Portugal”. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- REN21 (2014), “Renewables 2014 Global Report”, Disponível on-line em: <http://www.ren21.net/gsr>
- Renewable Energy Focus (2013), “Renewable Power Generation – 2012 figures”. Disponível on-line em: <http://renewableenergyfocus.com/view/35690/renewable-power-generation-2012-figures/>.
- República Portuguesa (2010), “Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/20/CE”.
- Rocha, S.S.P.G. (2011), “Caracterização de sistemas hidrotermais de baixa entalpia na Ribeira Grande, Ilha de S. Miguel, Açores”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica – Georrecursos. Universidade Nova de Lisboa. In: <http://hdl.handle.net/10362/6232>.
- Sanner, B. (2011), “Overview of Shallow Geothermal Systems”. In: *McCorry, M., Jones, Ll. (eds) 2011. Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Geotrained, European Federations of Geologists, Brussels. 7-14.
- Sanner, B., Karytsas, K., Abry, M., Coelho, L. Goldbrunner J., Mendrinos, D. (2007), “GROUNDHIT – advancement in ground source heat pumps through EU support”. *Proceedings European Geothermal Congress*, Unterhaching, Germany.

- Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2014), “General review of ground source heat pump systems for heating and cooling of buildings”. *Energy and Buildings*, 70(0), 441-454. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>.
- TRILLO, G.L., ANGULO, V.R. (2008), “Guía de la Energía Geotérmica”.
- União Europeia (2014), “2030 framework for climate and energy policies”. Disponível on-line em: http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm.
- União Europeia (2012), “The 2020 climate and energy package”. Disponível on-line em: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.
- Urchueguía, J., Sikora, P. (2011)a, “Heat Pump Technology”. In: *McCorry, M., Jones, Ll. (eds) 2011. Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Geotrained, European Federations of Geologists, Brussels. 93-106.
- Worthington, M.A. (2010), “Seasonal thermal Energy Storage Applications for Direct Energy Systems”. IDEA 101st Annual Conference & Trade Show – District Energy/CHP: Creating an Efficient Energy Source, Indianapolis, Indiana.