

“

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLOGICOS

Homenagem ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho

”

L.J.P.F. NEVES, A.J.S.C. PEREIRA,
C.S.R. GOMES, L.C.G. PEREIRA,
A.O. TAVARES

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Potencial EGS/HDR da região Centro e Norte de Portugal

Alcides Pereira¹; Luís Neves¹

1IMAR, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL.
apereira@dct.uc.pt; luisneves@dct.uc.pt

Palavras-chave: Potencial geotérmico, EGS, HDR, Portugal

Resumo

A geotermia do tipo EGS/HDR apresenta um elevado potencial enquanto fonte de energia eléctrica com carácter renovável, encontrando-se presentemente em desenvolvimento dezenas de projectos nos EUA, Austrália e Europa. Na região centro e Norte de Portugal não é possível encontrar alguns dos cenários geológicos mais favoráveis a este tipo de aproveitamento geotérmico, normalmente associados a rochas graníticas possuindo espessa cobertura de sedimentos. Contudo, alguns granitos hercínicos de natureza HHP que ocorrem na região apresentam indicadores favoráveis à existência de fluxos térmicos superiores aos normais na crosta, o que potencialmente os qualifica para o efeito de aproveitamento geotérmico EGS/HDR. Em favor desta possibilidade concorrem, designadamente, o grande volume e profundo enraizamento de alguns destes corpos graníticos, a sua elevada produção interna de calor radiogénico ($>3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$), as evidências geoquímicas de que os teores de elementos radiogénicos são susceptíveis de não decrescer rapidamente em profundidade, e ainda as inferências baseadas em geotermómetros aplicados a águas termais que sugerem fluxos térmicos locais da ordem dos $140 \pm 10 \text{ mWm}^{-2}$, duplos dos normalmente observados na crosta continental.

Key-words: Geothermal potential, EGS, HDR, Portugal

Abstract

Engineered Geothermal Systems (EGS) present a high potential as a renewable source of energy for electricity production; dozens of projects are currently being developed in the USA, Australia and Europe. In the central and northern region of Portugal it is not possible to find the most common geological scenarios that are usually considered favorable for this new type of geothermal exploitation, namely those associated with deep granites covered by a thick sedimentary sequence. However, some HHP granites of this region of Portugal show several evidences of increased heat flow, which could make them suitable for EGS/HDR. This conclusion is based in the large volume and deep-rooted nature of some plutons, their high internal heat production ($>3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$), geochemical evidence suggesting that the concentrations of the radiogenic elements are not likely to be

significantly reduced with depth, and also results from geothermometers applied to thermal waters, that allow to estimate heat flow in the range $140\pm 10 \text{ mWm}^{-2}$, which approximately doubles typical values of the continental crust.

Introdução

A energia geotérmica é utilizada com sucesso na produção de electricidade há um século, encontrando-se actualmente instalada uma capacidade de 10 GW a nível mundial, com significativa expansão em anos recentes. São diversas as vantagens deste tipo de energia: as emissões de CO₂ são reduzidas ou mesmo nulas, os custos de produção competitivos, os impactes ambientais praticamente inexistentes e a taxa de disponibilidade das centrais muito elevada (equivalente à das baseadas em combustíveis fósseis). Pelo exposto, e atendendo ao carácter inesgotável do calor interno da Terra, a energia geotérmica é a única energia renovável com capacidade para substituir os combustíveis fósseis na geração do nível de base de energia eléctrica que é necessário assegurar nas redes de distribuição.

Contudo, as condições geológicas necessárias à implementação de um projecto geotérmico ocorrem com alguma raridade, restringindo-se no essencial a regiões com vulcanismo activo, geograficamente muito limitadas, onde seja possível recuperar fluidos a alta temperatura naturalmente existentes a profundidades reduzidas ou moderadas (geralmente até 2 km). Tal justifica a pouca expressão deste tipo de energia a nível mundial; em Portugal, apenas os Açores apresentam um elevado potencial para a aplicação deste tipo de geotermia, que se pode designar por convencional.

Tal poderá no entanto ser alterado de forma significativa pelos recentes avanços alcançados no domínio dos EGS (Enhanced ou Engineered Geothermal Systems), conceito equivalente ao idealizado nos anos 70/80 sob a designação de HDR (*Hot Dry Rock*). Este novo tipo de exploração geotérmica desenvolve-se a profundidades superiores a 4 km, sendo o reservatório geotérmico gerado por técnicas de engenharia, com estimulação hidráulica e injeção de fluidos a partir da superfície. O âmbito geográfico da sua aplicação é assim grandemente alargado face à geotermia convencional, dada a maior facilidade na obtenção das temperaturas necessárias a profundidades maiores. O conceito foi testado com sucesso em 2008 no projecto experimental de Soultz-sous-Forêt (França), encontrando-se um elevado número de projectos a decorrer em diversos países, incluindo Portugal (ver Neves *et al.*, 2011).

O presente trabalho tem por objectivo apresentar uma avaliação do potencial geotérmico da região Centro e Norte de Portugal para a implementação de projectos do tipo EGS/HDR.

Condicionantes Geológicas à implementação de EGS/HDR

No quadro da tecnologia presentemente disponível, na produção de energia eléctrica de origem geotérmica poderão ser usados fluidos com temperaturas variáveis entre 150-250°C ou 100-120°C, no caso de estarem disponíveis, respectivamente, caudais moderados ou elevados; os projectos EGS/HDR têm como alvo o primeiro dos intervalos de temperatura referidos. Com o propósito de obter tais temperaturas com um custo mínimo de perfuração, um projecto EGS/HDR exige como condição a disponibilidade de gradientes geotérmicos mais elevados que a média (40-50°C/km face aos normais 25-30°C/km), embora não tão elevados como os que caracterizam as regiões com vulcanismo activo.

A distribuição da temperatura na crosta depende do fluxo térmico. Este parâmetro por sua vez depende do fluxo térmico basal, que corresponde à dissipação de calor do centro para a superfície da Terra, a que se adiciona uma componente de produção de calor radiogénico associada ao decaimento dos elementos radioactivos contidos nas próprias rochas (U, Th e K). Em geral, fluxos térmicos superiores ao da média crustal (60 mWm⁻²) são observados quando existe um incremento no fluxo basal, situação que ocorre nas regiões com vulcanismo activo ou recente em termos geológicos (*ex.*: sistemas de rifte peri-alpinos e bacias de origem tectónica situadas no interior do cinturão alpino – *c.f.* Genter, 2003). Em muitos casos, como é exemplo o rifte do Reno, trata-se de grabens bordejados por falhas normais, conduzindo os processos tectónicos ao adelgaçamento da crosta e a fenómenos de vulcanismo de idade terciária ou mesmo quaternária. Sedimentos pós-paleozóicos, nalguns casos com mais de 1000 m de espessura, preenchem as áreas tectonicamente deprimidas, assentando discordantemente sobre rochas hercínicas, por vezes de natureza granítica. Muitas das áreas na Europa consideradas de elevado potencial geotérmico integram-se neste enquadramento geodinâmico, de que é emblemático o projecto de Soultz-sous-Forêt (Genter *et al.*, 2003).

Contudo, em áreas tectonicamente estáveis também é possível a ocorrência de fluxos térmicos elevados, sendo normalmente considerado como enquadramento geológico preferencial a ocorrência de granitos possuindo alguns quilómetros de cobertura sedimentar. Admite-se, neste caso, que o efeito de isolamento térmico criado pelos sedimentos contribua

para um significativo acréscimo da temperatura na rocha granítica, onde é constituído o reservatório geotérmico. Este tipo de enquadramento geológico é exemplarmente ilustrado na região de Cooper Basin (Austrália), onde se encontram em desenvolvimento diversos projectos EGS/HDR.

Menos atenção tem sido dada no entanto às potencialidades associadas aos granitos do tipo HHP (High Heat Production granites) que ocorrem em zonas tectonicamente estáveis, ou sismicamente de baixa actividade, aflorantes ou com cobertura sedimentar pouco espessa, aos quais se podem associar também fluxos térmicos regionais acrescidos, como resultado da sua elevada produção de calor radiogénico interna. O caso mais conhecido é o do plutónio de Carnmenellis, aflorante no sudoeste de Inglaterra (v.g. Rodrigues *et al.*, 1995). Uma das razões para esta situação deve-se ao menor acervo de informação disponível sobre os fluxos térmicos prevalentes neste tipo de enquadramento geológico, comparativamente ao das áreas inseridas em espessas bacias sedimentares, as quais foram muitas vezes prospectadas pela indústria petrolífera. As rochas graníticas são especialmente abundantes no Sul da Europa. Na realidade, este tipo de rochas ocupa uma área muito significativa no Maciço Hespérico; proporcionalmente às restantes rochas a relação neste sector da cadeia hercínica pende fortemente para as de natureza ígnea, o que é uma situação única no quadro europeu, encontrando-se expostos alguns batólitos graníticos com características que os tipificam como HHP (Godinho *et al.*, 1991).

Potencial geotérmico EGS da região Centro e Norte de Portugal

O substrato geológico da região Norte e Central de Portugal continental é composto maioritariamente por rochas ígneas e metassedimentares de idade hercínica e ante-hercínica, localmente cobertos por rochas sedimentares, em geral de espessura reduzida e de idade terciária (Figura 1). Os últimos eventos magmáticos na região, associados às intrusões de rochas filonianas de natureza básica remontam ao Mesozóico. Não se encontram presentes, por conseguinte, os enquadramentos geológicos considerados como mais favoráveis ao desenvolvimento de projectos EGS/HDR, tal como discutido no capítulo anterior, com a excepção dos associados a rochas com elevada produção de calor radiogénico interno.

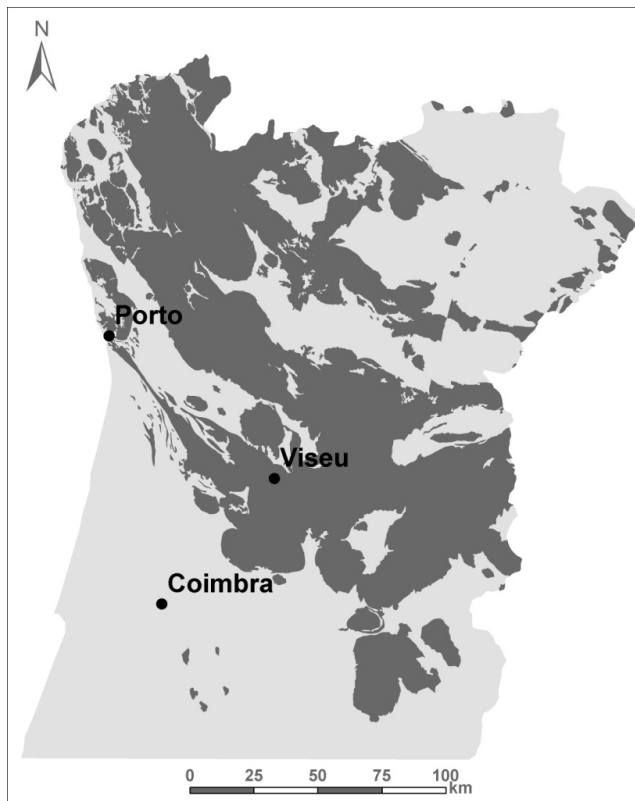


Figura 1. Enquadramento geológico simplificado da região Centro e Norte de Portugal. A cinza escuro representam-se as rochas granitóides, maioritariamente de idade hercínica; a área restante é composta por rochas metassedimentares de idade ante-hercínica bem como rochas sedimentares pós-paleozóicas.

São muito escassos os dados actualmente disponíveis sobre o fluxo térmico em Portugal continental. No que se refere ao Maciço Hespérico, a Zona Centro-Ibérica (ZCI) tem vindo a ser reconhecida como um dos sectores do território onde os valores deste parâmetro serão mais elevados que a média crustal. Em trabalho recente, Correia e Ramalho (2005), numa escala com máximo de 4, integraram a ZCI no grupo 3 que se caracteriza por apresentar fluxos de calor com média estimada de 78 mWm^{-2} , acima, pois, do valor médio crustal. Contudo, e como referem os mesmos autores, este valor médio pode estar subestimado atendendo a que os dados disponíveis foram maioritariamente obtidos em furos muito superficiais, em geral de profundidade inferior a 100 m. Neste sentido parece ir o facto de se encontrarem reconhecidos alguns corpos de natureza granítica com características que os poderão filiar como HHP, os quais potencialmente podem incrementar localmente o fluxo térmico (Godinho *et al.*, 1991).

Estes últimos autores estimaram a produção radiogénica (A_0) de rochas aflorantes na ZCI na base das concentrações de U, Th e K, tendo obtido resultados variáveis no intervalo 1,7-11 μWm^{-3} . Neste conjunto, as rochas metassedimentares situam-se no limiar inferior do intervalo, próximo à média crustal, enquanto as rochas de composição granítica apresentam a maior produção de calor radiogénico; neste último caso, são frequentes os valores médios situados entre 3,1 e 4,3 μWm^{-3} . O valor de $A_0=3,5 \mu\text{Wm}^{-3}$ tem-se como o limiar para que um granito se possa considerar, em princípio, rocha de elevado potencial geotérmico (Webb *et al.* 1985), concluindo-se em Godinho *et al.* (1991) que, em face da informação disponível para as rochas aflorantes na região Norte e Centro de Portugal, a área aflorante ocupada por este tipo de rochas possa ser de algumas centenas de quilómetros quadrados.

De referir, no entanto, que os valores de A_0 disponíveis foram estimados a partir dos teores de elementos radiogénicos medidos em amostras de superfície; dada a reconhecida mobilidade do U é provável que os teores tenham sido subestimados, situação já referida por outros autores em contextos similares (*v.g.* Webb *et al.*, 1985), pelo que a produção de calor radiogénico poderá ser ainda mais elevada. No mesmo sentido apontam os dados relativos ao fluxo de radiação gama natural emitido pelos materiais geológicos, parâmetro que pode ser usado como estimador da concentração dos elementos radiogénicos (Pereira *et al.*, 2010). Dados disponíveis para o território continental mostram a ocorrência de fluxos elevados, espacialmente associados às rochas graníticas aflorantes na ZCI, com taxas de exposição à radiação gama frequentemente superiores a 200 nGy/h.

Outro indicador do fluxo térmico potencial consiste na existência de um vasto conjunto de emergências de águas minerais naturais na área em análise, as quais, nalguns casos, brotam à superfície com temperaturas elevadas, destacando-se as termas de Chaves, de S. Pedro do Sul e de Alcafache com valores superiores a 50°C (Figura 2). Utilizando o teor em SiO_2 das águas minerais naturais como geotermómetro e assumindo a relação empírica definida em Swanberg & Morgan (1978), que relaciona a temperatura com o fluxo térmico (a qual foi validada através da aplicação com sucesso em diversas regiões do globo), foi possível estimar este último parâmetro, na base das composições químicas conhecidas para as emergências localizadas na ZCI; os valores obtidos dispersam-se entre 115 e 190 mWm^{-2} , agrupando-se a maioria no intervalo $140\pm 10 \text{ mWm}^{-2}$. Este intervalo, ainda que constitua uma estimativa com um nível de incerteza elevada, está, no entanto, de acordo com os dados apresentados durante a

discussão anterior, reforçando a possibilidade de ocorrência de fluxos térmicos mais elevados do que os valores conhecidos até ao momento em algumas regiões da ZCI, em particular em associação às rochas de natureza granítica e como resultado de uma produção interna de calor acrescida por parte destas.

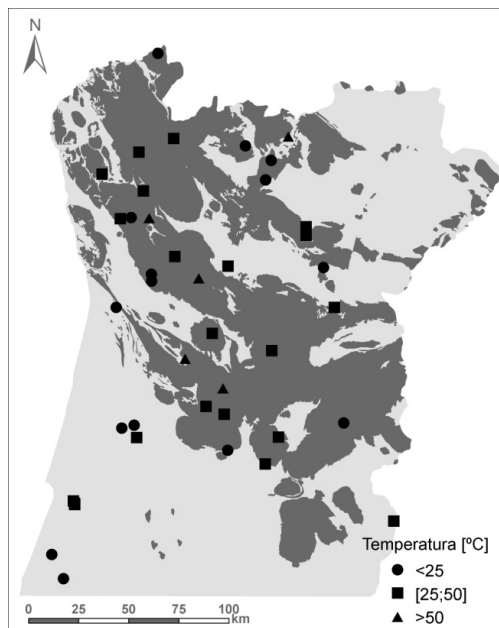


Figura 2. Localização das nascentes de águas minerais naturais na região Centro e Norte de Portugal com indicação da temperatura na emergência.

Os granitos hercínicos tardi-orogénicos da região das Beiras como alvo preferencial para aplicações geotérmicas do tipo EGS/HDR

Conforme já referido, apenas corpos ígneos com extensão vertical muito significativa e elevada produção interna de calor têm capacidade para influenciar de forma decisiva o fluxo térmico local, através da adição de uma relevante contribuição de calor radiogénico. Neste sentido, são as rochas graníticas da ZCI com características HHP alvos preferenciais, por apresentarem as mais elevadas produções de calor radiogénico (Godinho *et al.*, 1991); e, de entre estas, serão expectáveis os mais elevados fluxos térmicos locais por parte das que apresentem enraizamento profundo e homogeneidade na distribuição vertical dos radionuclídeos.

De entre as rochas graníticas hercínicas distinguem-se duas séries, a dos granitos sin-tectónicos e a dos tardi a pós-tectónicos, apresentando ambas as séries produções de calor radiogénico semelhantes (Godinho *et al.*, 1991). Contudo, as rochas que integram a série mais antiga são em geral consideravelmente mais diferenciadas do que as tardi a pós-tectónicas, o que sugere poderem corresponder a plutonitos com pequena volumetria e extensão vertical. A correlação observada entre os teores de U e o grau de fraccionação da rochas é igualmente um indicador que vai no mesmo sentido (Figura 3), tal como observado por Webb *et al.* (1985) no Reino Unido. Ao invés, os granitos tardi a pós-tectónicos, e em particular o batólito granítico das Beiras, mostram uma evolução geoquímica moderada e invariância de U com o grau de fraccionação (Figura 3), características que sugerem poderem estas rochas apresentar significativo enraizamento crustal com manutenção das suas características geoquímicas e radiológicas.

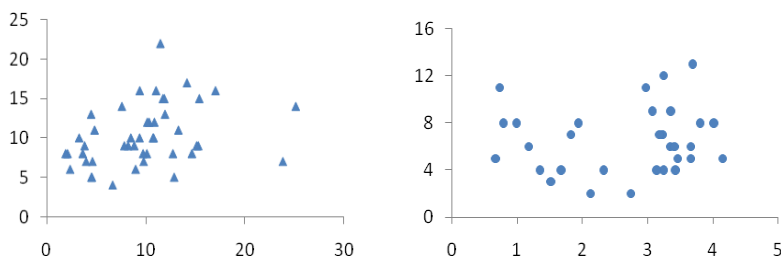


Figura 3. Racio Rb/Sr (abscissas) vs. U (ordenadas) para granitóides da região de Viseu; à esquerda granitos sintectónicos, à direita granitos tardi a pós-tectónicos. Informação recolhida em (Neves, 1993).

Dados gravimétricos obtidos em rochas graníticas do Norte de Portugal indicaram a possibilidade de a raiz dos corpos ígneos se encontrar a profundidades significativas; num caso de estudo, Sant’ovaia & Noronha (2005) indicam como provável a profundidade de 16 km para um desses corpos. O tratamento de dados disponíveis referentes ao campo gravítico do território português, na base da carta gravimétrica de Portugal (Instituto Geográfico e Cadastral, 1967), através da aplicação de análise de superfícies de tendência, permite evoluir um pouco mais no sentido da identificação de áreas preferenciais, onde as rochas graníticas denotam enraizamento profundo. Para o propósito, a informação foi tratada através da aplicação de métodos polinomiais, tendo sido deduzido um modelo de variação regional de grau 3, o qual é significativo e absorve parte relevante da variabilidade total. Do ponto de vista da detecção de anomalias negativas no campo gravítico, o melhor indicador disponível consiste no mapa dos resíduos do

modelo, ou seja, no mapa que traduz a diferença entre a tendência regional deduzida e os valores observados localmente (Figura 4). Desta análise verifica-se a persistência de significativas anomalias negativas associadas a alguns corpos graníticos, onde se destaca o maciço da Serra da Estrela, bem como uma parte do batólito granítico das Beiras, designadamente no sector de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital.

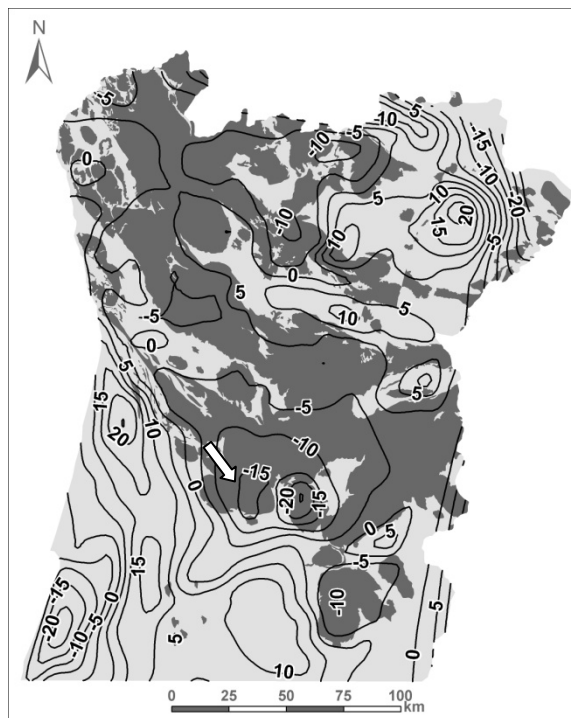


Figura 4. Mapa de resíduos do modelo polinomial de variação regional do campo gravítico medido na região Centro e norte de Portugal (a seta indica de forma aproximada o afloramento do batólito das Beiras – região de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital)

É neste último sector, contudo, onde se observam os indícios de maior mobilidade do U, patente na ocorrência, na superfície topográfica ou na sua proximidade, de um elevado número de locais onde as concentrações deste elemento podem ser várias vezes superiores à média estimada para a rocha granítica encaixante. Trabalhos de prospecção levados a cabo desde a década de 50 pelas diversas companhias mineiras detectaram a presença de alguns milhares de locais com significativas anomalias radiométricas. Algumas dessas anomalias (num total de 61) deram origem a explorações

mineiras tendo sido produzido um total de 4370t de U_3O_8 (Nero *et al.*, 2005). A maior parte das mineralizações são superficiais, estendendo-se até à profundidade máxima de 50 m, sendo compostas por fosfatos secundários, como são os casos da autunite e da torbernite. Dados de análise por traços de fissão obtidos no granito das Beiras evidenciaram a existência de uma forte mobilização do U dos suportes mineralógicos primários (Neves *et al.*, 1997), sendo um deles a uraninite, um mineral facilmente lixiviável em contacto com fluidos meteóricos, cuja presença foi detectada no mesmo tipo de rochas (Pinto, 2001). A lixiviação da uraninite primária e subsequente deposição de U em armadilhas estruturais é um processo que permite explicar as características do fenómeno mineralizante que afecta a região. É, assim, expectável que a maiores profundidades a probabilidade de ocorrência da interacção com fluidos meteóricos seja bem menor e, por conseguinte, os teores de U na rocha não alterada serão mais elevados que os observadas em rochas colhidas em afloramento, potenciando os valores de A_0 .

É ainda de referir que o batólito granítico das Beiras apresenta os mais elevados fluxos de radiação gama de superfície do território nacional (>200 nGy/h), com especial ênfase para a continuidade espacial do mesmo no sector de Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital. Na mesmo sector ocorrem igualmente diversas emergências termais, para além da de Alcafache já citada: Caldas da Felgueira ($T=36^\circ C$), Caldas de Sangemil ($T=50^\circ C$); Granjal ($T=23^\circ C$) e Caldas de S. Paulo ($T=23^\circ C$), cujo quimismo corrobora a possibilidade de ocorrência de valores de fluxo térmico elevados, conforme já anteriormente discutido.

A avaliação das tipologias mais favoráveis no espaço europeu à ocorrência de temperaturas não inferiores a $200^\circ C$ até profundidades de 5 km efectuada por Genter *et al.* (2003), na base da informação disponível sobre o fluxo térmico, indicou como um dos contextos favoráveis as rochas graníticas aflorantes no sudoeste de Inglaterra (Cornualha), em particular o plutonito de Carnmnellis, tal como já referido. Este corpo tem semelhanças do ponto de vista petroquímico com o batólito granítico das Beiras, reunindo ambos alguns indicadores favoráveis ao potencial geotérmico, nomeadamente no que respeita à produção de calor radiogénico, filiação no grupo das rochas do tipo HHP, densidade de mineralizações de U no espaço aflorante, distribuição de K, Th e U em profundidade, volumetria significativa e ainda a presença de emergências de águas minerais naturais, por vezes com temperaturas elevadas (próximo dos $50^\circ C$). No entanto, e comparativamente ao plutonito de Carnmnellis, o batólito das Beiras tem área aflorante *ca.* 10 vezes superior e, ainda que não se disponha, no

momento, de informação sobre a posição da raiz do corpo ígneo, na base dos dados gravimétricos anteriormente apresentados afigura-se provável que esta se encontre a uma profundidade de vários quilómetros, pelo que será significativamente mais volumoso.

Pelo exposto, conclui-se pela existência de um potencial geotérmico relevante por parte das rochas tardi a pós-tectónicas que integram o batólito granítico das Beiras, com ênfase para o sector Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital.

Avaliação do potencial energético de um segmento do batólito das Beiras (Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira Hospital).

Com base na metodologia desenvolvida pelo MIT (2006) estimou-se para um segmento crustal com ca. 530 km² de área ocupada pelo batólito das Beiras, no sector Santa Comba Dão-Nelas-Oliveira do Hospital, a quantidade de energia geotérmica armazenada. Estudos deste tipo serão, nesta fase, necessariamente preliminares dada a insuficiência em alguma informação sobre o segmento em causa; procurou-se, no entanto, controlar a incerteza com recurso a informação disponível em contextos geológicos similares. Na base das temperaturas estimadas em profundidade para o segmento crustal, assumindo com fontes térmicas o calor proveniente do manto e o produzido pelo decaimento dos elementos radioactivos (Pereira *et al.*, 1996), que aponta para valores superiores a 100°C apenas a profundidades superiores a 3 km, e atendendo ao limite que é possível atingir actualmente pela tecnologia de perfuração (10 km), restringiu-se a modelação numérica ao intervalo delimitado por aquelas profundidades. Com suporte na formulação matemática explicitada pelo MIT (2006), estimou-se subsequentemente a quantidade de energia térmica disponível assumindo a individualização do segmento crustal em porções cada uma delas com dimensão de 530km² x 1 km.

Na figura 5 apresenta-se o resultado obtido, o qual sugere que a energia disponível possa atingir os 2295 EJ (ExaJoule=1018J). Considerando o cenário de recuperação mais pessimista equacionado na avaliação do potencial do território dos EUA (MIT, 2006), o qual considera o valor de 2%, estaria acessível nesta região uma quantidade de energia de 46 EJ. Compare-se estes valores com o consumo total de energia eléctrica em Portugal, em 2006 de 48545 GWh (www.iea.org), o que equivale a 0,18 EJ.

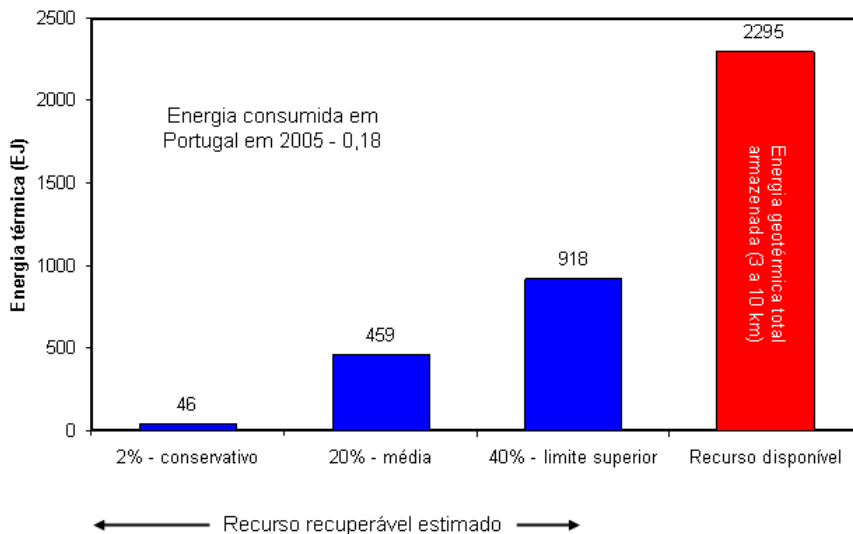


Figura 5. Estimativa das reservas em energia geotérmica acumulada entre os 3 e os 10 km no segmento crustal referente à área proposta bem como no recurso recuperável para vários cenários; cálculos efectuados na base da metodologia proposta pelo MIT (2006).

Conclusões

É muito escassa a informação existente sobre fluxos térmicos no território continental português, o que não permite aferir de forma directa o seu potencial geotérmico, designadamente no domínio da sua aplicação às tecnologias emergentes EGS/HDR; na avaliação do potencial geotérmico do espaço europeu, realizada por Genter *et al.* (2003), parte significativa da Ibéria surge sem qualquer informação associada.

Não obstante, diversas evidências indirectas sugerem que o fluxo térmico possa ser elevado em algumas áreas da região Centro e Norte, em associação às rochas graníticas, em particular aos granitos tardi a pós-tectónicos que integram o batólito granítico das Beiras. Tal decorre da elevada produção de calor radiogénico interno destas rochas, bem como da provável extensão crustal das mesmas em profundidade. A avaliação preliminar de um segmento do batólito com 530 km² compreendido entre Santa Comba Dão, Nelas e Oliveira do Hospital, mostra que a energia existente entre os 3 e os 10 km de profundidade, ainda que recuperada em muito pequena proporção (2%), equivale a mais de 250 vezes o consumo total anual de energia do país.

Agradecimentos: Os autores dedicam o presente trabalho ao Professor Manuel Maria Godinho, o qual foi pioneiro na avaliação do potencial das rochas granitóides portuguesas para a geotermia HDR.

Bibliografia

- Correia, A., Ramalho, E. C. (2005) - Updated surface heat flow density map in mainland Portugal. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turquia*, 1-5.
- Genter, A., Guillou-Frottier, L., Feybesse, J.-L., Nicol, N., Dezayes, C., Shwartz, S. (2003) - Typology of potential Hot Fractured Rock resources in Europe. *Geothermics*; 32, 701-710.
- Godinho, M.M., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F. (1991) - Potencial térmico das rochas graníticas num segmento do Maciço Hespérico (Portugal Central). *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 112, 469-483.
- Instituto Geográfico e Cadastral (1967) - Carta gravimétrica de Portugal, escala 1: 1000 000.
- MIT (2006) - The future of geothermal energy. http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html.
- Nero, J.M.G., Dias, J.M.M., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F., Torrinha, J. (2005) - Environmental evaluation and remediation methodologies of radioactive abandoned mines in Portugal. *Proceedings do International Workshop on Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and Remediation Measures, International Atomic Energy Agency*, 145-158.
- Neves, L.J.P.F. (1993) - Variabilidade geoquímica e diversidade das rochas granitóides da região de Torredeita (Viseu, Portugal Central) - Um modelo petrogenético explicativo. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*; 115, 107-136.
- Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C., Carter, A., Godinho, M.M., Dias, J.M.M., Hurford, A.J. (1997) - Evidência de mobilização recente do urânio num granito da região de Torredeita (Viseu): um estudo por traços de fissão. *X Semana de Geoquímica e IV Congresso dos Países de Língua Portuguesa, Braga. Actas*, 401-403.
- Neves, L.J.P.F., Pereira, A.J.S.C., Dias, J.M.M. (2011) - Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR) – um desafio para o século XXI (este volume).
- Pereira, A.J.S.C. Godinho, M.M., Castro, J.A.M. (1996) - Modelagem bidimensional do arrefecimento do plutonito de Tábua (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. e Mineiro*; 82, 15-30.
- Pereira, A.J.S.C., Godinho, M.M., Neves, L.J.P.F. (2010) - On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *J. Env. Radioactivity*; 101, 10, 875-882.
- Pinto, M.M.S.C. (2001) - Mineralizações uraníferas no vale de Abrutiga e estudos de impacte ambiental da sua exploração. *Tese de mestrado, Universidade de Coimbra*, 156 p.
- Rodrigues, N.E.V., Green, A.S.P., Barley, R. (1995) - Modeling tracers tests in the Rosemanowes HDR reservoir. *Geothermics*; 24, 3, 375-384.
- Sant’ovaia, H. & Noronha, F. (2005) - Gravimetric anomaly modeling of the post-tectonic granite pluton of Águas Frias-Chaves (Northern Portugal). *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*; 30, 87-98.
- Swanberg, C.A. & Morgan, P. (1978) - The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow map of the United States. *Pure Appl. Geophys.*; 117, 227-241.
- Webb, P.C., Tindle, A.G., Barritt, S.D., Brown, G.C., Miller, J.F. (1985) - Radiothermal granites of the United Kingdom: comparison of fractionation patterns and variation of heat production for selected granites. In: “High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis”, *The Institution of Mining and Metallurgy*, 409-424.