



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Colégio Luís António Verney

Departamento de Geociências

**Análise de viabilidade de armazenamento de
energia sob a forma de ar comprimido em
cavernas subterrâneas**

João Filipe Soares dos Santos Alves

Orientador: Prof. Dr. Júlio Ferreira Carneiro

Mestrado em Engenharia Geológica

Dissertação

Évora 2015

“Sempre parece impossível até que seja feito”

Nelson Mandela

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário”

Albert Einstein

“As pessoas costumam dizer que a motivação não dura sempre. Bem, nem o efeito do banho, por isso recomenda-se diariamente”.

Zig Ziglar

“Uma aventura de mil milhas começa com um único passo”

Lao Tzu

Resumo

Esta dissertação procura avaliar a possibilidade de implementar a tecnologia de armazenamento de energia CAES (*Compressed Air Energy Storage*) em cavidades subterrâneas para responder às necessidades de uma melhor gestão da produção de energia eólica.

O estudo de viabilidade centra-se no diapiro de Rio Maior, onde a existência de importantes fatores fundamentam o interesse do estudo, destacando-se a geologia adequada para a construção de caverna por dissolução no domo salino, a proximidade a um gasoduto, a existência do parque eólico da Serra dos Candeeiros com uma potência de 111MW, critérios favoráveis à segurança na superfície e a existência das salinas de Fonte da Bica, que possibilita tratar a salmoura resultante da formação da caverna em sal-gema.

Por fim, foram considerados os parâmetros de segurança numa caverna CAES em sal-gema, proposta uma campanha de prospecção e dimensionamento numa caverna no diapiro de Rio Maior de acordo com os parâmetros definidos.

Compressed air energy storage feasibility analysis in underground caverns

Abstract

This dissertation aims to evaluate the possible implementation of CAES (Compressed Air Energy Storage) technology in underground caverns in order to meet the needs for a better management in wind energy production.

This feasibility study is focused in the Rio Maior salt dome where the major factors required for implementing this technology are in place, namely, the geological conditions for the construction of a cavern by dissolution of salt, favourable safety criteria at the surface, proximity to a pipeline and the wind farm of Serra dos Candeeiros with 111MW of power, and the existence of Fonte da Bica salt evaporation pond, enabling the brine processing.

At last, it was considered the security parameters for a salt rock cavern with CAES and set out the exploration campaign for a cavern construction in Rio Maior salt dome according to design parameters.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Setor eólico na Europa.....	2
1.3	Energia eólica em Portugal.....	3
1.4	Desafios e dificuldades na gestão da energia eólica.....	6
2.	Estado de arte da tecnologia CAES.....	8
2.1	Fatores que viabilizam a aplicação das centrais CAES.....	10
2.2	Componentes de uma central CAES.....	11
2.3	Condicionantes que limitam a eficiência de CAES.....	11
2.4	Viabilidade económica CAES.....	12
2.5	Reservatórios geológicos adequados para sistemas CAES.....	12
2.6	Volume e pressão de funcionamento CAES.....	15
2.7	Tecnologia de geração da energia CAES.....	16
2.8	Centrais CAES em atividade.....	19
2.9	Projetos para futuras centrais CAES.....	22
3.	Características geológicas de reservatórios para a tecnologia CAES.....	28
3.1	Critérios para seleção de reservatórios em rochas duras.....	28
3.2	Critérios para seleção de reservatórios em cavernas em domos salinos.....	31
4.	Caracterização e localização do caso de estudo.....	34
4.1	Condições para implementação das instalações superficiais.....	34
4.2	Caso de estudo.....	35
4.3	Sismicidade local.....	40
5.	Enquadramento geológico do caso de estudo.....	43
5.1	Magmatismo na Bacia Lusitaniana.....	43
5.2	Diapirismo na Bacia Lusitaniana.....	43
5.3	Diapiro de Rio Maior – Porto de Mós.....	47
6.	Critérios para dimensionamento dum caverna em sal para CAES.....	57
6.1	Condicionamentos geológicos.....	57
6.2	Orientações base para o desenvolvimento da caverna.....	58
6.3	Fatores de funcionamento da caverna.....	60
7.	Projeto conceptual.....	61
7.1	Profundidade da caverna.....	61
7.2	Energia armazenada por unidade de volume.....	61
7.3	Volume da caverna.....	64
7.4	Geometria da caverna.....	66
7.5	Volume de água necessário para a dissolução.....	66
7.6	Observações.....	67
8.	Programa de prospeção.....	68

8.1	Triagem inicial	68
8.2	Métodos geofísicos.....	68
8.3	Perfuração	70
8.4	Caracterização da rocha de sal.....	72
8.5	Custos de prospeção	73
9.	Conclusões	76
10.	Bibliografia.....	78
11.	Anexos.....	A

Índice de Figuras

<i>Fig. 1-1 Contribuição para a redução do CO₂ até 2050 por tecnologia (IEA, 2008 in IEA, 2009).</i>	1
<i>Fig. 1-2 Capacidade geradora de energia eólica em Dezembro de 2013 (e²p, 2013).</i>	2
<i>Fig. 1-3 Percentagem da nova capacidade instalada em 2013 (e²p, 2013).</i>	3
<i>Fig. 1-4 Taxa de crescimento anual da capacidade eólica em Portugal (e²p, 2013).</i>	3
<i>Fig. 1-5 Capacidade de geração de energia eólica acumulada (e²p, 2013).</i>	4
<i>Fig. 1-6 Localização dos parques eólicos (e²p, 2013).</i>	5
<i>Fig. 1-7 Capacidade geradora de energia eólica por distrito e regiões autónomas (e²p, 2013).</i>	6
<i>Fig. 1-8 Produção diária de energia eólica ao longo do ano 2012 (REN, 2013).</i>	6
<i>Fig. 1-9 Comparação entre as tecnologias de armazenamento em potência e tempos de descarga (IEA, 2009).</i>	7
<i>Fig. 2-1 Nivelamento do custo anual para as tecnologias de armazenamento (Australian greenhouse office 2005 in Neumiller, 2007).</i>	9
<i>Fig. 2-2 Custo das tecnologias de armazenamento em massa (Research Reports International 2004 in Neumiller, 2007).</i>	9
<i>Fig. 2-3 Esquema de uma instalação tradicional CAES (Konrad et al. 2012).</i>	11
<i>Fig. 2-4 Representação das cavernas de sal para armazenamento da central CAES de Huntorf na Alemanha e comparação da pesquisa sonar NK1 em 1984 e pesquisa de laser em 2001 (Crotogino et al. 2001).</i>	14
<i>Fig. 2-5 Coincidência do potencial eólico elevado e domos de sal na Europa. Os círculos vermelhos indicam áreas com potencial eólico e as manchas a azul-escuro indicam as formações de sal CAES (Succar & Williams, 2008).</i>	15
<i>Fig. 2-6 Esquema do sistema CAES com caverna de armazenamento a pressão constante por compensação com coluna de água; (1) chaminé, (2) central CAES, (3) reservatório superficial de água, (4) armazenamento de ar, (5) coluna de água (Barnes & Levine, 2011).</i>	16
<i>Fig. 2-7 Tipos de armazenamento de energia referindo a capacidade tecnológica e comercial (Arsie et al. 2009).</i>	17
<i>Fig. 2-8 Esquema da configuração do sistema CAES convencional (Succar & Williams, 2008).</i>	18
<i>Fig. 2-9 Central de Huntorf (na parte superior da imagem é visível a localização das cavernas e ao centro a central CAES) (Zschocke, 2012).</i>	20
<i>Fig. 2-10 Representação esquemática das cavernas da central de Huntorf (Zschocke, 2012).</i>	20
<i>Fig. 2-11 Central de Huntorf (Casa das maquinas) (Succar & Williams, 2008).</i>	21
<i>Fig. 2-12 Central de McIntosh. À esquerda, o sistema de compressão; à direita, a turbina e camara de combustão (Succar & Williams, 2008).</i>	22

<i>Fig. 2-13 Projeto das instalações de superfície da central CAES em Norton (Succar & Williams, 2008).</i>	23
<i>Fig. 2-14 Esquema do Iowa Stored Energy Park (ISEP) (Succar & Williams, 2008).</i>	24
<i>Fig. 2-15 Esquema da central CAES em Columbia Hills (McGrail et al. 2013).</i>	25
<i>Fig. 2-16 Esquema da central CAES em Yakima Minerals (McGrail et al. 2013).</i>	26
<i>Fig. 2-17 Esquema do projeto de investigação ADELE (RWE, 2010).</i>	27
<i>Fig. 3-1 Componentes de um sistema CAES com um revestimento em betão do reservatório (Kim et al. 2011).</i>	30
<i>Fig. 3-2 Exemplo de uma secção transversal de um projeto de uma caverna CAES com revestimento de betão e modelo das condições do revestimento (Rutqvist et al. 2012).</i>	31
<i>Fig. 4-1 Rede elétrica nacional (REN, 2015).</i>	34
<i>Fig. 4-2 Rede nacional de gás natural (REN, 2015).</i>	34
<i>Fig. 4-3 Localização do caso de estudo. Área do diapiro de Rio Maior que reúne os fatores para a construção de uma central CAES, segundo Cavaco (2013) (Cavaco, 2013).</i>	36
<i>Fig. 4-4 Vista aérea do parque eólico da Serra dos Candeeiros (e²p, 2014).</i>	37
<i>Fig. 4-5 Localização dos aquíferos existentes na zona de estudo (SNIRH, 2015).</i>	38
<i>Fig. 4-6 Vista aérea das salinas da Fonte da Bica (Calado & Brandão, 2009).</i>	39
<i>Fig. 4-7 Volume de água tratada nas salinas por ano.</i>	40
<i>Fig. 4-8 Enquadramento Neotectónica do local de estudo (Carvalho et al.2011).</i>	41
<i>Fig. 4-9 Zonamento Sísmico do território de Portugal Continental (Adaptado in Silva, 2013).</i> ..	42
<i>Fig. 5-1 Localização dos diapiros e de outras estruturas da Bacia Lusitaniana (Kullberg, 2000).</i>	44
<i>Fig. 5-2 Modelo esquemático da formação dos diapiros das Caldas da Rainha e de Fonte da Bica em Rio Maior (Zbyszewski, 1959 in Fonseca, 1996).</i>	45
<i>Fig. 5-3 Mapa geológico do Maciço Calcário Estremenho (Fonte: Carvalho et al. 2011).</i>	46
<i>Fig. 5-4 Perfil sísmico e interpretação sismoestratigráfica, com representação da sondagem São Mamede 1 (SM1). H1 a H10: horizontes sísmicos. 1- Falha não reconhecida em superfície. Note-se a posição do diápiro de Rio Maior. Para a relação entre código de cores e estratigrafia, ver Fig.5-5 (Carvalho, 2013).</i>	48
<i>Fig. 5-5 Coluna litoestratigráfica e o código de cores utilizado para a referência dos horizontes sísmicos (litoestratigrafia adaptada de Azerêdo, 1998, DGEG, 2011, e Dinis, 2001) (Fonte: Carvalho, 2013).</i>	49
<i>Fig. 5-6 Geologia da zona do diapiro de Rio Maior (Carvalho, 2013 in Cavaco 2013).</i>	50
<i>Fig. 5-7 Variação das percentagens de Cloreto de Sódio e de insolúveis ao longo das duas sondagens S1 e S2 (Cavaco, 2013).</i>	51

<i>Fig. 5-8 Cálculo do gradiente geotérmico (estremo mais baixo das linhas isotérmicas).....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 5-9 Cálculo do gradiente geotérmico (estremo mais elevado das linhas isotérmicas).....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 5-10 Modelo Hidrológico para as salinas de Fonte da Bica. (P1, 2, 3, 4) Poços de água doce. β Corpo ígneo de basalto (Eggenkamp et al. 2013).</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 5-11 Mapa topográfico com os locais de amostragem do trabalho realizado por Eggenkamp et al. 2013. Poços água doce (●) (P1, P2, P3 e P4); Poço de água salina (o). Adaptado do Instituto Geográfico do Exército (2005) (Eggenkamp et al. 2013).</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 7-1 Consumo de energia no dia 13 de Fevereiro de 2012 (REN. 2013)</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 7-2 Produção média de energia eólica ao longo do dia em 2012 (REN.2013).</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 7-3 Esquema representativo da caverna definida no maciço.</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 8-1 Malhas regulares de sondagem: (a) quadrada; (b) retangular; (c) romboédrica (Catarino, 2009).....</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 8-2 Caixa de sondagem para acondicionar os testemunhos recolhidos (Neto & Rocha, 2010).</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 8-3 Núcleos salinos (esquerda) e microfotografia (direita) para os estudos de dissolução (Bary et al. 2002).</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 8-4 Resultados de laboratorio realizados para determinar a resistencia e a propriedades de deformação do nucleos salinos . Os nucleos da frente mostram deformação plastica e os de atrás mostratram deformação fragil (fraturas) (Bary et al. 2002).</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 11-1 Temperatura à profundidade de 800 metros (Bernardes et al. 2011).</i>	<i>D</i>
<i>Fig. 11-2 Temperatura à profundidade de 1000m (Bernardes et al. 2011).</i>	<i>D</i>
<i>Fig. 11-3 Temperatura à profundidade de 1500m (Bernardes et al. 2011).</i>	<i>E</i>
<i>Fig. 11-4 Mapa do local em estudo.</i>	<i>F</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2-1. Custos e desempenhos inerentes às tecnologias com maior capacidade de armazenamento (Research Reports International 2004 in Neumiller, 2007).....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 5-1 Resumo dos dados disponíveis para o cálculo do gradiente geotérmico</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 7-1 Constantes inerentes ao cálculo.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 7-2 Valores referentes às turbinas (consideram-se equivalentes às da central de Huntorf).....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 7-3 Parâmetros.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 8-1 Custos das técnicas geofísicas.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 8-2 Custos associados à perfuração.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 8-3 Custos dos logs de sondagens e diagrafia geofísica</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 8-4 Custos associados a trabalho em laboratório.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 11-1 Análises químicas da sondagem S1 de Fonte da Bica</i>	<i>B</i>
<i>Tabela 11-2 Análises químicas da sondagem S2 de Fonte da Bica</i>	<i>C</i>

1. Introdução

Os últimos anos têm assistido a um rápido desenvolvimento da utilização de energias renováveis, em parte devido a uma estratégia de redução das emissões de CO₂ a nível global, em que se projeta que as energias renováveis devem permitir a redução de cerca de 21% das emissões de CO₂ projetadas até 2050 (IEA, 2009) (Fig.1-1). Para atingir essa meta é necessário o aumento da utilização da energia eólica, solar e hídrica para valores da ordem dos 5000TWh para cada uma dessas fontes energéticas (IEA, 2009).

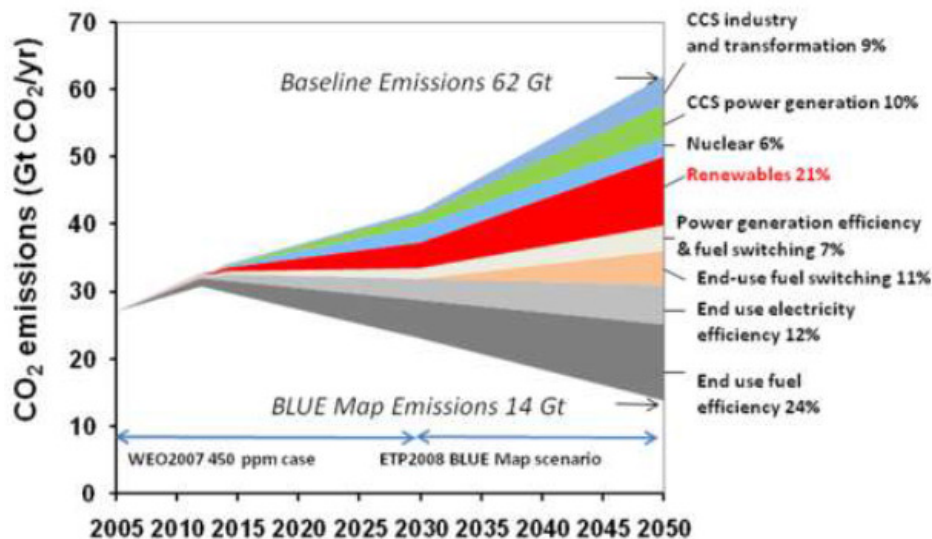


Fig. 1-1 Contribuição para a redução do CO₂ até 2050 por tecnologia (IEA, 2008 in IEA, 2009).

A estratégia da União Europeia (UE) “Europa 2020” tem como objetivo a redução de 20% das emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia, o aumento em 20% da produção energia a partir de fontes renováveis e o incremento da eficiência energética em 20% (Comissão Europeia, 2014).

A discussão em curso sobre a estratégia para 2030 aponta para que a União Europeia reduza em pelo menos 40% as emissões de gases de efeito de estufa em relação aos valores de 1990, e para que a produção de energia renovável e a eficiência energética atinjam o valor de 27% (Comissão Europeia, 2014).

Os objetivos para 2050 visam manter o aquecimento global abaixo dos 2°C, pelo que a UE estabeleceu como meta a redução das emissões de gases de efeito de estufa em 80 a 95% até 2050 em relação aos valores de 1990 (Comissão Europeia, 2014).

Como se pode constatar, nestas estratégias o crescimento do sector das energias renováveis ocupa um lugar central, e como se verá no caso nacional, a energia eólica tem constituído o principal sector de investimento. Porém, a energia renovável, e em concreto a energia eólica, é caracterizada por possuir algumas limitações, como a baixa densidade de potência e a intermitência. Estas condicionantes concorrem para o aumento dos custos unitários da energia eólica e condicionam a sua difusão (Arsie *et al.* 2009).

De forma a responder a estas condicionantes discute-se de um modo crescente o conceito de aliar aos sistemas de produção de energia eólica um sistema de armazenamento de energia (Arsie *et al.* 2009).

1.1 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a possibilidade de implementação da tecnologia de armazenamento de energia em ar comprimido associada à produção eólica num caso de estudo na zona de Rio Maior.

O armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido (CAES – *Compressed air energy storage*) é uma tecnologia relativamente recente, desenvolvida na década de 70 na Alemanha, mas que está demonstrada como eficiente à escala comercial.

A tecnologia CAES procura responder à variabilidade de produção da energia eólica, permitindo armazenar grandes volumes de ar comprimido em formações geológicas em momentos de baixa procura energética. Em momentos de elevada procura energética o ar armazenado é expandido, previamente aquecido e injetado numa turbina, produzindo energia elétrica para rede e permitindo a estabilização do consumo energético.

1.2 Setor eólico na Europa

A Europa no final do ano de 2013 detinha cerca de 120,1 GW de potência eólica instalada acumulada, com a Alemanha a contribuir cerca de 33730 MW. A Espanha apresentava-se como segundo maior produtor europeu com cerca de 22959 MW, enquanto Portugal gerava cerca de 4731 MW de potência instalada acumulada e constituía o 7º maior produtor de energia eólica na Europa (Fig. 1-2).

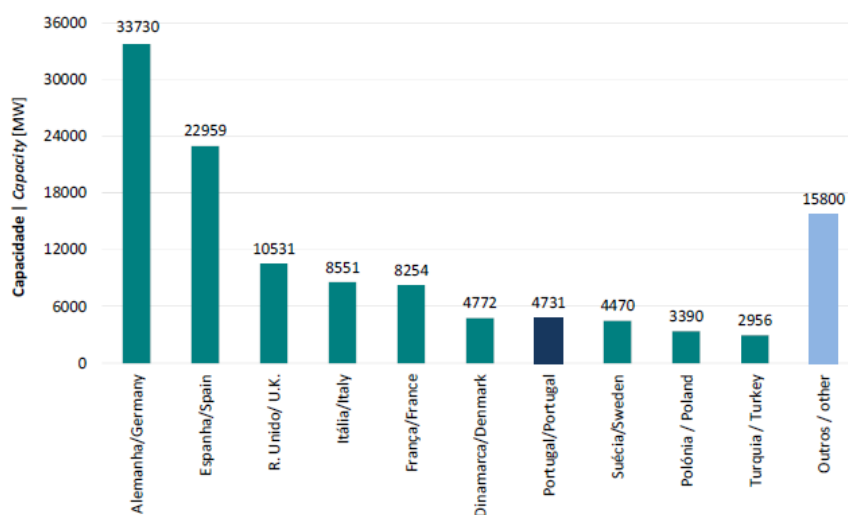


Fig. 1-2 Capacidade geradora de energia eólica em Dezembro de 2013 (e²p, 2013).

A Alemanha em 2013 liderou, a par do Reino Unido, a percentagem de nova capacidade instalada com cerca de 27,2% e 15,8%, respetivamente, enquanto Portugal desenvolveu a sua capacidade de gerar energia eólica em 1,7% (Fig. 1-3).

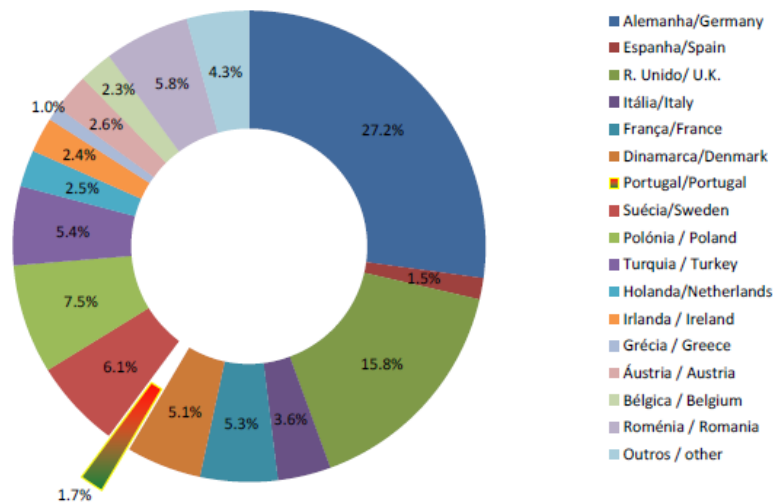


Fig. 1-3 Percentagem da nova capacidade instalada em 2013 (e²p, 2013).

1.3 Energia eólica em Portugal

A produção de energia eólica em Portugal teve início nos anos 80 com a instalação de um aerogerador experimental na zona de Sintra com potência de 20KW. Em 1988 foi instalado na ilha de Santa Maria um aerogerador de potência de 30 KW (Almeida, 2013).

Os primeiros parques eólicos em Portugal surgem nos anos 90, com o parque eólico de Sines a ser ligado de forma comercial no continente (Almeida, 2013). O desenvolvimento destes parques dependia de pequenos produtores, bem como de duas empresas de dimensão apreciável, a EDP Renováveis e a Enersis (Almeida, 2013).

Em 2000 deu-se um grande desenvolvimento na capacidade geradora instalada em Portugal, que atingiu valores de cerca de 45%. Em 2005 a taxa de nova capacidade geradora instalada quase que duplicou, registando um aumento de 95%, e de 2007 a 2009 rondou os 25% ao ano. Em 2010 a taxa de nova capacidade geradora instalada foi inferior a 20% mantendo-se assim até final de 2013 (Fig. 1-4).

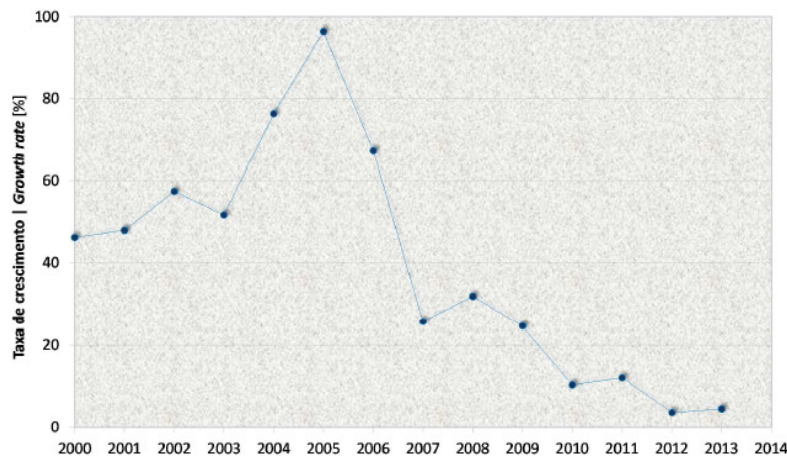


Fig. 1-4 Taxa de crescimento anual da capacidade eólica em Portugal (e²p, 2013).

Assim, o aumento da potência acumulada registou um grande desenvolvimento desde do ano 2000, com cerca de 124 MW, para uns impressionantes 4731 MW no final de 2013 (Fig. 1-5).

Segundo a Diretiva de Energia Renovável da UE, Portugal terá de desenvolver políticas para fomentar um aumento da capacidade instalada de produção de energia eólica até cerca de 6875 MW em 2020 (Almeida, 2013).

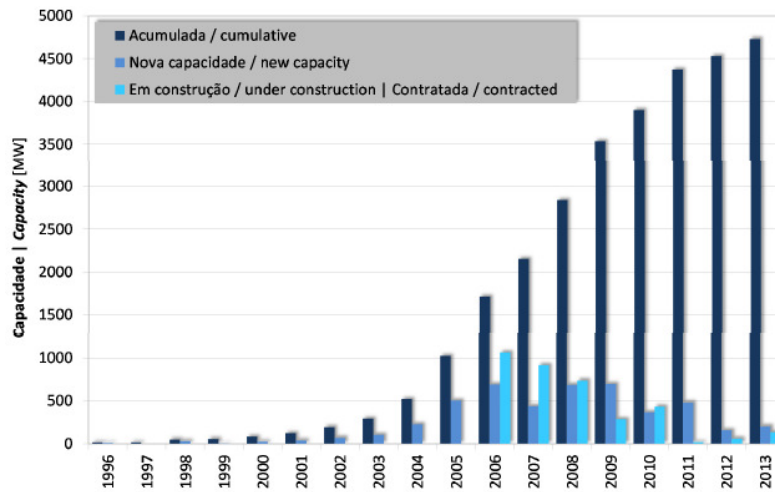


Fig. 1-5 Capacidade de geração de energia eólica acumulada (e²p, 2013).

1.3.1 Localização geográfica dos parques eólicos

A localização dos parques eólicos em Portugal encontra-se predominantemente a norte do Tejo, em regiões interiores de Portugal Continental, beneficiando das melhores condições de intensidade e regularidade do vento associada às altitudes elevadas no nordeste de Portugal continental (Almeida, 2013) (Fig. 1-6).

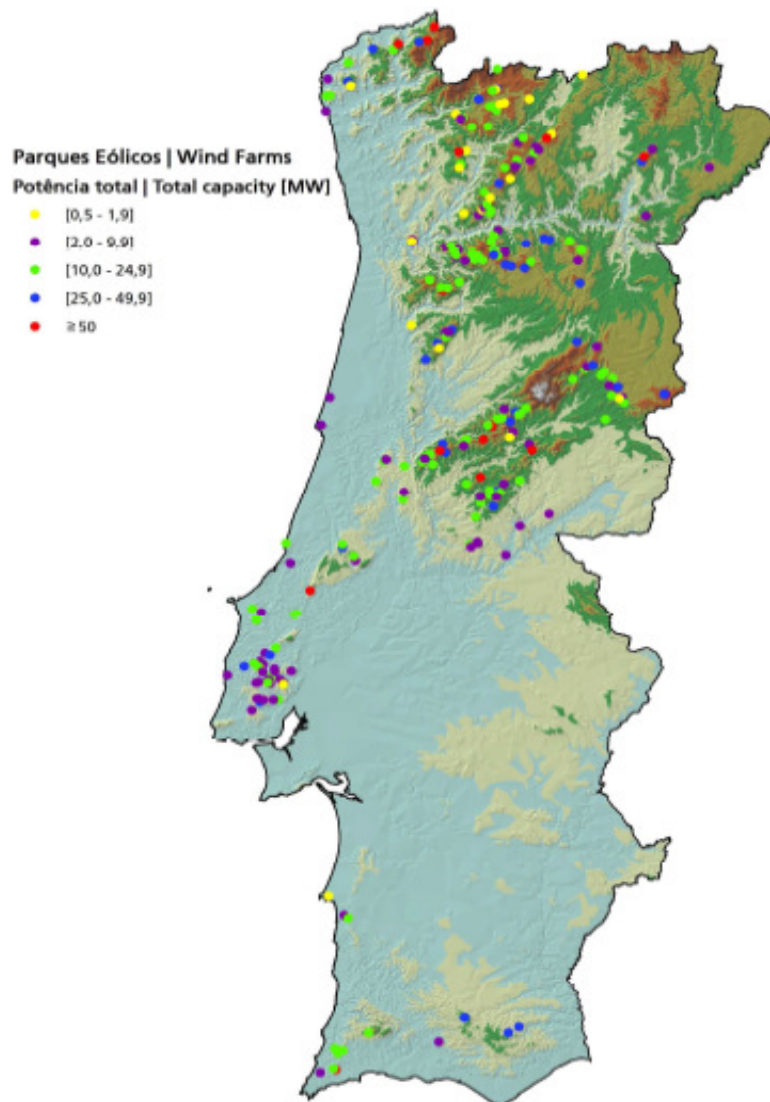


Fig. 1-6 Localização dos parques eólicos (e²p, 2013).

Em Portugal o distrito de Viseu é líder na capacidade produtiva de energia eólica com cerca de 935 MW, seguido pelos distritos de Coimbra e de Vila Real, cada um com cerca de 590 MW. Os distritos a sul do Tejo revelam uma pequena capacidade produtiva, com exceção do distrito de Faro com cerca de 210 MW (Fig. 1-7).

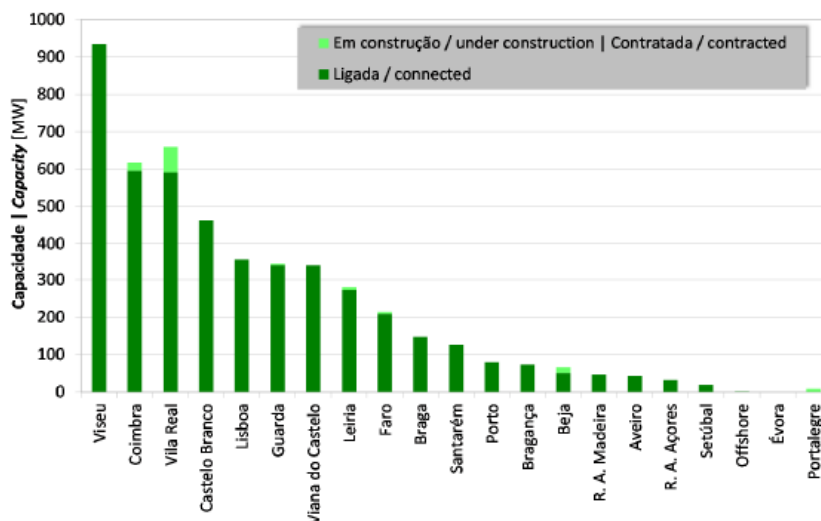


Fig. 1-7 Capacidade geradora de energia eólica por distrito e regiões autónomas (e²p, 2013).

1.4 Desafios e dificuldades na gestão da energia eólica

A energia eólica é considerada uma energia renovável caracterizada por uma elevada variabilidade e instabilidade, encontrando-se dependente de diversos fatores geográficos e atmosféricos (Miranda, 2011).

A variabilidade pode ser observada de estação para estação, dia para dia ou mesmo de hora para hora. A energia eólica encontra-se dependente da velocidade do vento, que pode cair para zero ou para níveis reduzidos em extensas áreas e por muitos dias. Em caso de tempestades as turbinas eólicas podem ser desligadas para proteção do equipamento durante algumas horas ou dias (IEA, 2009).

Derivado a estas flutuações, a produção de energia eólica situa-se entre 15 a 30 % (Erro Médio Absoluto Relativo), dependendo das variações da velocidade do vento e do horizonte temporal da previsão. Por isso, é frequente não existir coincidência entre a produção de energia eólica e os períodos de maior procura, dificultando uma gestão de boa qualidade (Miranda, 2011) (Fig. 1-8).

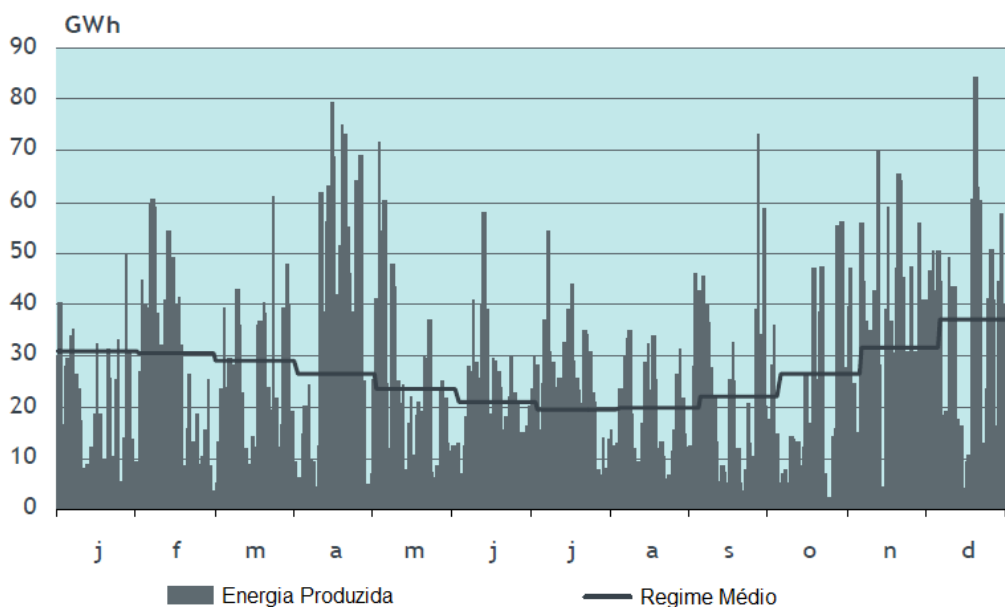


Fig. 1-8 Produção diária de energia eólica ao longo do ano 2012 (REN, 2013).

Como resposta a estes desafios surge o conceito de armazenamento de energia. Este conceito tem como objetivo regularizar a produção da energia eólica, bem como das outras energias renováveis. O armazenamento de energia decorrerá em momentos de pouca procura de energia ou em picos produtivos de energia renovável, enquanto a injeção na rede da energia armazenada deverá suprimir as flutuações negativas da produção de energia renovável, permitindo o nivelamento da produção de energia (Abelho, 2011).

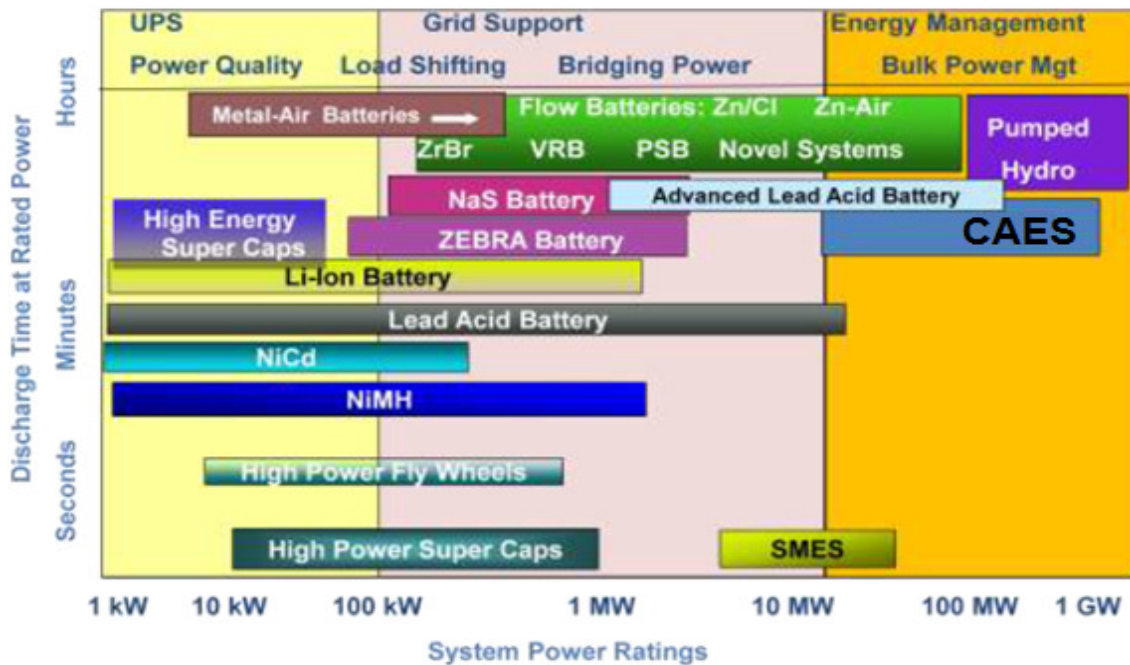


Fig. 1-9 Comparação entre as tecnologias de armazenamento em potência e tempos de descarga (IEA, 2009).

As tecnologias de armazenamento que apresentam maiores tempos de descarga (número de horas em que o sistema pode injetar energia na rede) e de potência armazenada são a CAES, a par da tecnologia de armazenamento em barragens por bombagem (*pumped hydro*), sendo as únicas que aliando estes dois fatores permitem a gestão da produção elétrica em grande escala (Fig. 1-9).

2. Estado de arte da tecnologia CAES

A viabilidade técnica da CAES está comprovada pela existência de duas centrais CAES no Mundo, a central de 290 MW da *E.N Kraftwerke*, em Huntorf, Alemanha (1978) (Hoffeins, 1994 in Raju & Khaitan, 2012) e a central de 110 MW detida pela *Alabama Electric Corporation* (AEC) em McIntosh, Alabama, EUA (1991) (Hounslow *et al.* 1998 in Raju & Khaitan, 2011).

Ambas as centrais têm funcionado de modo eficiente ao longo destas últimas décadas e sem qualquer problema (Raju & Khaitan, 2011).

A tabela 2-1 indica os custos de instalação médios para as técnicas de armazenamento de energia com maior capacidade de armazenamento, embora não incorpore uma representação precisa dos custos variáveis associados à quantidade de energia produzida por cada tecnologia, e que pode influenciar o custo real de produção (Neumiller, 2007).

Tabela 2-1. Custos e desempenhos inerentes às tecnologias com maior capacidade de armazenamento (*Research Reports International 2004* in Neumiller, 2007).

	Custos relacionados com a energia (\$/kWh)	Custos relacionados com a potência (\$/kWh)	Balanco da central (\$/kWh)	Eficiência de descarga
Bateria de chumbo ácido (Baixo)	175	200	50	0,85
Bateria de chumbo ácido (Alto)	250	300	50	0,85
SMES	500	300	100	0,95
<i>Flywheel</i> (alta velocidade)	25000	350	1000	0,93
<i>Flywheel</i> (baixa velocidade)	300	280	80	0,90
Supercapacitores	82000	300	10000	0,95
CAES	3	425	50	0,79
Barragens com bombagem	10	600	2	0,87

A figura 2-1 apresenta o custo anual das tecnologias referidas na tabela 2-1 normalizado pelo tempo de horas disponíveis para descarga.

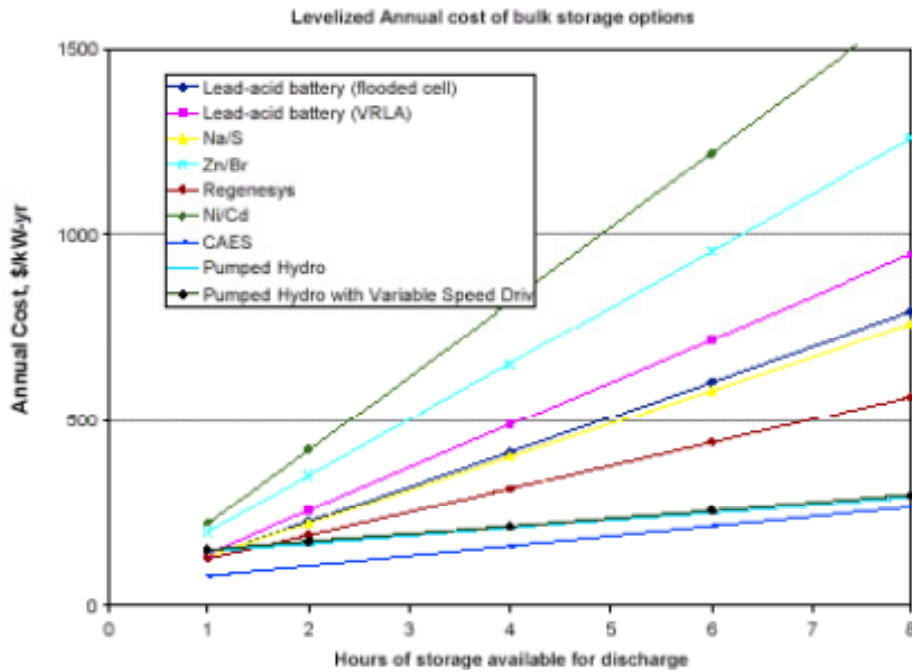


Fig. 2-1 Nivelamento do custo anual para as tecnologias de armazenamento (*Australian greenhouse office 2005 in Neumiller, 2007*).

Embora a Tabela 2-1 apresente a tecnologia CAES como uma das mais dispendiosas (custos de potência), os custos anuais indicados na Fig. 2-1, provam que a CAES permite uma maior quantidade de armazenamento com um custo menor (Neumiller, 2007). Verifica-se igualmente que a tecnologia CAES tem o custo mais reduzido por unidade de energia e de potência (Fig. 2-2).

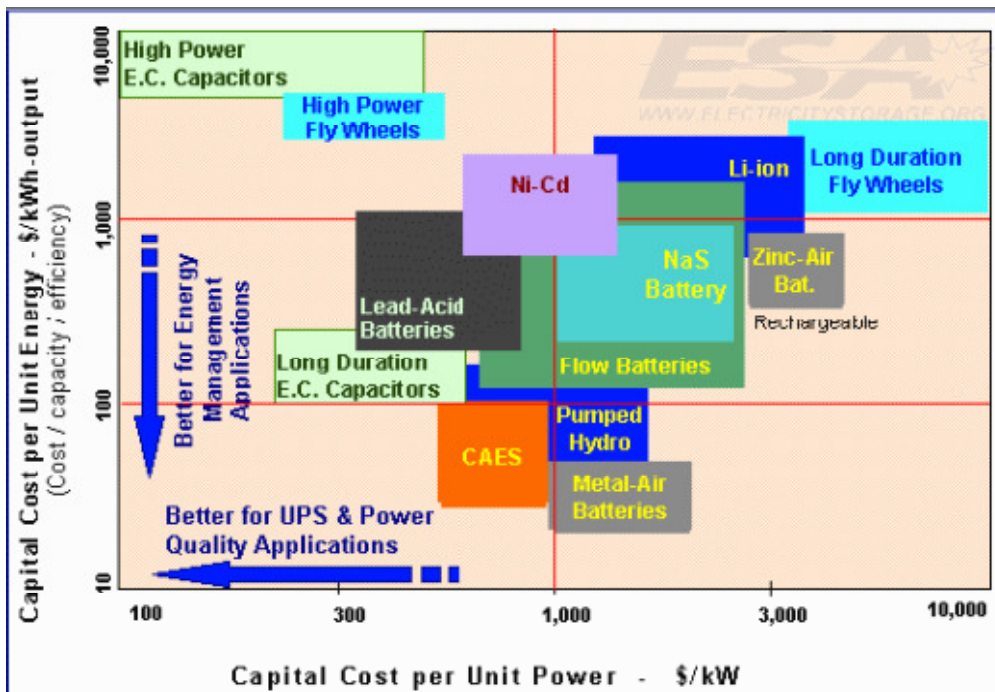


Fig. 2-2 Custo das tecnologias de armazenamento em massa (*Research Reports International 2004 in Neumiller, 2007*).

Por conseguinte, a tecnologia CAES possui a vantagem de fornecer uma grande quantidade de energia por um longo período de tempo a baixo custo, e é a única que garante

simultaneamente três mais-valias no armazenamento de energia: i) menores custos na energia; ii) menores custos na potência; iii) maior tempo de produção) (Neumiller, 2007).

Conclui-se que a tecnologia CAES possui grandes vantagens em relação às outras tecnologias de armazenamento, com paralelo apenas na tecnologia de armazenamento hidroelétrico por bombagem (Neumiller, 2007).

Porém, entre estas duas tecnologias de armazenamento, a CAES apresenta as seguintes vantagens: razões ambientais (como o armazenamento hidroelétrico é à superfície provocando a destruição de ecossistemas e de biodiversidade; condições geográficas (devido à grande disseminação existem cada vez menos locais com possibilidade de suportar novas barragens); sendo a tecnologia CAES considerada cerca de 20% mais eficiente (custos / capacidade) (Fig. 2-2) e com 1/3 dos custos de armazenamento das centrais hidroelétricas por bombeamento (Neumiller, 2007).

2.1 Fatores que viabilizam a aplicação das centrais CAES

A CAES é uma tecnologia que usa a energia fora do horário de pico de consumo para comprimir ar, armazenando-o em formações e estruturas geológicas como cavidades subterrâneas ou formações sedimentares porosas. Durante um pico na procura, o ar armazenado é libertado da caverna, aquecido e expandido através de uma turbina de combustão para gerar energia (Arsie *et al.* 2009).

Para permitir o equilíbrio da produção da energia eólica é fundamental que os sistemas de armazenamento apresentem grande escala e longa duração de armazenamento, mas também um curto tempo de resposta na emissão da energia e uma localização próxima das zonas de produção de energia eólica (Succar & Williams, 2008).

Estes fatores são conseguidos com a aplicação da tecnologia CAES, que garante uma rápida resposta e a operação eficiente em condições de carga parcial, sendo a tecnologia mais adequada para equilibrar as rápidas flutuações na produção de energia eólica (Succar & Williams, 2008).

Esta tecnologia só necessita de pequenas quantidades de gás natural (baixo emissor de gases de efeito de estufa) o que potencia uma melhor gestão da emissão de gases de efeito de estufa (Succar & Williams, 2008).

As turbinas a gás garantem uma resposta rápida às carências na produção de energia eólica. Assim, as turbinas aliadas a uma reserva de ar comprimido, são candidatas a enfrentar o desafio de equilibrar o crescente desenvolvimento do setor eólico (Succar & Williams, 2008).

Por outro lado, o baixo consumo de combustível nas centrais CAES, torna-se especialmente relevante face aos elevados preços do gás natural (Succar & Williams, 2008).

O consumo de combustível no CAES é menos de metade de uma turbina a gás das centrais termoelétricas, o que permite um melhor controlo da volatilidade dos preços do gás natural (DeCorso *et al.* 2006 in Succar & Williams, 2008).

Por fim, deve-se considerar o acoplamento de sistemas de armazenamento CAES junto às zonas remotas de produção de energia eólica, o que permite aumentos na capacidade de produção de energia na ordem dos 50%. Ou seja, usualmente os parques eólicos possuem uma capacidade de produção na ordem dos 30 a 40% (Succar & Williams, 2008), mas acoplados a sistemas de armazenamento CAES, podem atingir cerca de 80 a 90%, devido à melhor gestão da produção de energia eólica (Succar & Williams, 2008).

2.2 Componentes de uma central CAES

Uma instalação tradicional CAES é composta por cinco componentes principais (Fig.2-3): compressor, motor-gerador; caverna de armazenamento (reservatório) câmara de combustão, e câmara de expansão (Konrad *et al.* 2012).

Na central CAES o processo de produção de energia elétrica inicia-se com a expansão do ar comprimido numa câmara de combustão, onde este é misturado com um combustível (gás natural), e a mistura é queimada para adicionar energia térmica ao fluxo de ar. Este fluxo converge para uma turbina, que aciona o gerador, produzindo energia elétrica que é injetada na rede a preços mais elevados que a energia gasta a comprimir o ar para o reservatório (Konrad *et al.* 2012) (Fig. 2-3).

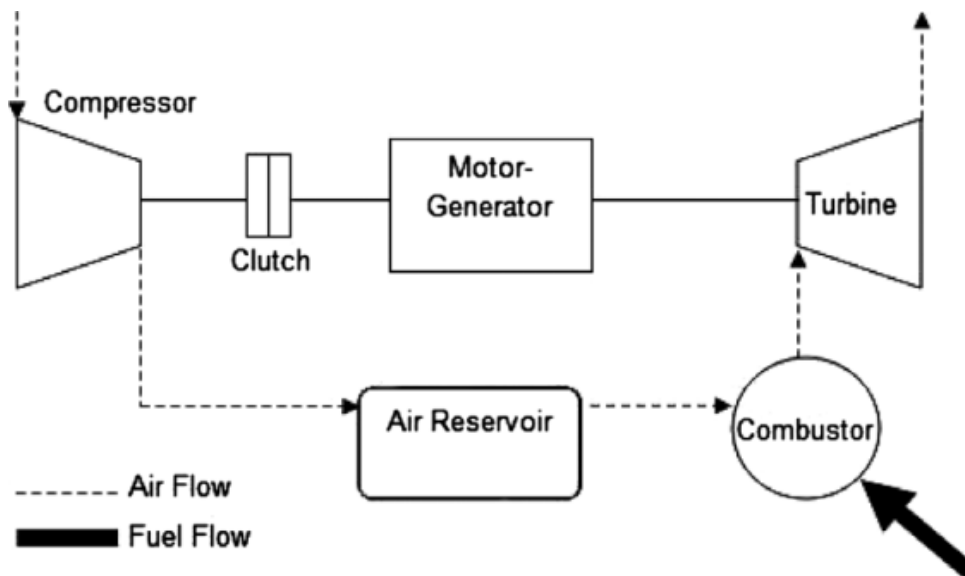


Fig. 2-3 Esquema de uma instalação tradicional CAES (Konrad *et al.* 2012).

Os avanços na tecnologia CAES já permitem o aproveitamento do calor residual, resultante do processo de combustão, para pré-aquecer o ar em expansão antes de entrar na câmara de combustão, reduzindo assim o consumo de combustível e aumentando a eficiência global (Konrad *et al.* 2012).

Nas centrais CAES o armazenamento subterrâneo de ar comprimido, ao invés da utilização de reservatórios superficiais, é justificado pela minimização da área ocupada à superfície, evitando custos com a manutenção de equipamentos devido a corrosão, tanques de volume limitado e por reduzir os custos de armazenamento (Konrad *et al.* 2012).

O armazenamento subterrâneo de energia de ar comprimido pode ser conseguido com a utilização de cavernas de sal, em aquíferos naturais, em antigas explorações de gás natural e petróleo e em cavernas construídas em rocha (Raju & Khaitan, 2011).

2.3 Condicionantes que limitam a eficiência de CAES

A eficiência do sistema CAES pode ser avaliada através do desempenho das duas centrais operacionais, a de Huntorf na Alemanha, a funcionar desde 1978, e a de McIntosh, EUA, a funcionar desde 1991. A eficiência da central de Huntorf é de cerca de 42% e a de McIntosh perto de 54%. (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk, 2010).

Estes valores de eficiência de descarga são mais de 30% inferiores à eficiência do armazenamento nas centrais hidroelétricas por bombeamento (ver Tabela 2-1) (RWE, 2010).

Esta reduzida eficiência resulta da necessidade de arrefecer o ar até à temperatura do interior da caverna durante a fase de compressão antes, de ser armazenado na caverna, e posteriormente ao aquecimento do ar pela queima de gás natural na fase de produção de energia elétrica (RWE, 2010).

A tecnologia CAES ainda está sujeita a desafios técnicos que permitam aumentar a eficiência do sistema e reduzir custos de construção e conseqüentemente, reduzir o preço da energia produzida nas centrais CAES (Raju & Khaitan, 2011).

2.4 Viabilidade económica CAES

Para além dos fatores de eficiência, a viabilidade económica de um projeto CAES depende da localização da central e dos custos operacionais (Raju & Khaitan, 2011).

A nível geológico, o local deve oferecer as melhores características para o armazenamento de ar comprimido e a nível orográfico não deve levantar grandes desafios à construção da central (Raju & Khaitan, 2011).

Adicionalmente, a viabilidade duma central CAES está dependente de algumas infraestruturas e da sua proximidade às mesmas. A rede de distribuição de gás natural é fundamental para fornecer combustível para promover a expansão do ar comprimido, e a existência de uma rede elétrica é necessária tanto para a fase de compressão como para a emissão de energia elétrica (Raju & Khaitan, 2011).

2.5 Reservatórios geológicos adequados para sistemas CAES

Os reservatórios geológicos adequados ao desenvolvimento de sistemas CAES podem ser classificados em três categorias: rochas porosas, rochas duras e sal-gema.

2.5.1 Rochas porosas

Não existem, até ao momento, sistemas comerciais operacionais de armazenamento de ar comprimido em formações sedimentares porosas, mas o conceito da sua utilização para sistemas CAES foi demonstrado em testes-piloto (Barnes & Levine, 2011).

Um destes testes foi desenvolvido em Sesta, Itália, para uma central com uma potência de 25 MW (Barnes & Levine, 2011).

Embora os testes tenham sido bem-sucedidos, um evento geológico perturbou o local e levou ao desmantelamento da instalação Barnes & Levine, 2011).

A viabilidade do armazenamento em rochas porosas não se restringe a aquíferos, pois também é possível utilizar reservatórios de gás e petróleo considerados esgotados (Barnes & Levine, 2011).

O aproveitamento destes reservatórios esgotados levanta questões relacionadas com a mistura do ar comprimido com frações residuais de hidrocarbonetos (Barnes & Levine, 2011).

A injeção de ar comprimido promove o aumento da concentração de oxigénio no reservatório e a presença de hidrocarbonetos em quantidade residual pode induzir o risco de combustão (Barnes & Levine, 2011).

O risco de combustão pode ser mitigado, restringindo a operação de armazenamento a áreas distantes da zona de acumulação de gás natural, ou pela injeção de azoto de modo a reduzir a concentração de oxigénio no ar comprimido (Barnes & Levine, 2011).

A aplicação destes dois métodos torna possível a utilização de campos de gás natural esgotados para o armazenamento de energia na forma de ar comprimido (Barnes & Levine, 2011).

Do ponto de vista económico, estima-se que o desenvolvimento de CAES numa formação sedimentar porosa implique custos ao nível do armazenamento na ordem dos 2 a 7 dólares por kWh (Barnes & Levine, 2011).

2.5.2 Rochas duras

Estima-se que a opção por desenvolver um reservatório CAES em rochas duras (rochas competentes, cristalinas ou cristalofílicas) seja bastante dispendiosa, na ordem dos 30 dólares por kWh de produção (Succar & Williams, 2008).

No entanto, a utilização de cavidades em minas já existentes pode reduzir os custos para cerca de 10 dólares por kWh de produção (Swider, 2007; Sipila et al. 1994; Shepard & van der Linden, 2001 in Succar & Williams, 2008).

O desenvolvimento de metodologias para avaliar a estabilidade do corpo rochoso e reduzir as fugas e perdas de energia em sistemas baseados em rochas duras, resultou também no conceito do revestimento dos tuneis com betão (Succar & Williams, 2008).

Vários sistemas deste tipo têm sido propostos. Os testes-piloto conhecidos incluem dois recentes projetos no Japão: um sistema de 2 MW, usando um túnel revestido por betão na antiga mina de carvão de Sunagaawa, e um teste de confinamento hidráulico realizado num túnel da antiga mina Kamioka (EPRI, 2003).

Dado que o custo para o desenvolvimento do armazenamento em rochas duras é bastante elevado em relação às outras duas possibilidades (sal-gema e rochas porosas) é pouco provável uma instalação de raiz (construção de uma caverna) em rochas duras para um sistema CAES de grande escala (Barnes & Levine, 2011).

2.5.3 Domos salinos

As duas centrais CAES atualmente em laboração efetuam o armazenamento em cavidades construídas em domos salinos por dissolução do sal-gema (Barnes & Levine, 2011).

Uma vez que o sal-gema é uma rocha muito solúvel em contacto com água, é fundamental controlar a água existente no ar quando este for comprimido (Fig.2-4) (Allen *et al.* 1982), bem como minimizar a contaminação da turbina pela humidade contendo sal dissolvido de modo a evitar a corrosão (Barnes & Levine, 2011).

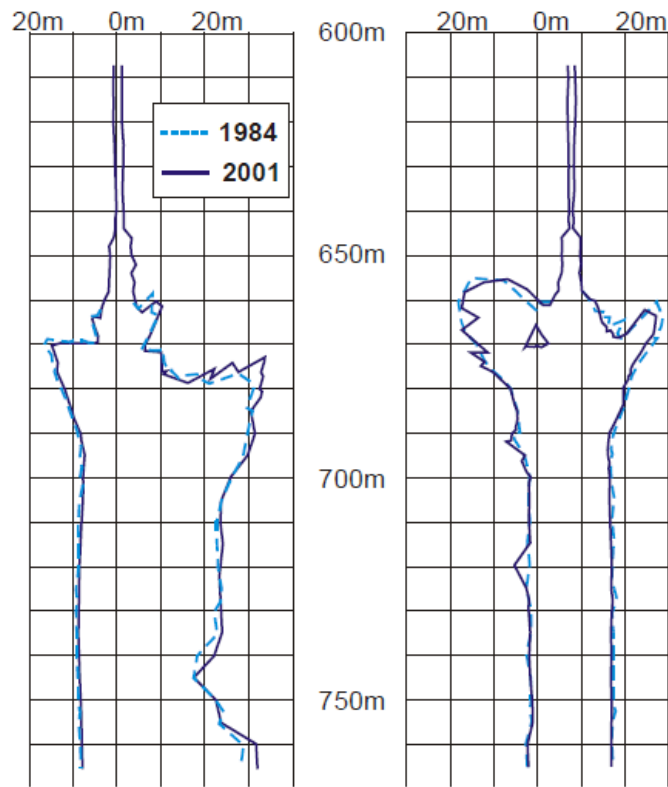


Fig. 2-4 Representação das cavernas de sal para armazenamento da central CAES de Huntorf na Alemanha e comparação da pesquisa sonar NK1 em 1984 e pesquisa de laser em 2001 (Crotogino *et al.* 2001).

Este tipo de armazenamento possui algumas vantagens, pois é mais fácil de desenvolver e operar, pois a técnica de mineração da caverna por dissolução é de baixo custo e confiável (Barnes & Levine, 2011).

O desenvolvimento de uma caverna de sal garante o volume necessário para viabilizar a construção de uma central CAES a baixo custo (tipicamente o custo de armazenamento é 2 dólares por kWh à saída da caverna), se for possível garantir na fase de construção um fornecimento adequado de água potável e a eliminação eficiente da salmoura resultante da construção da caverna (Barnes & Levine, 2011).

Na Fig.2-5 verifica-se, à escala da Europa, a coincidência espacial entre formações de sal e zonas de potencial eólico elevado, o que fornece boas perspectivas para o desenvolvimento da tecnologia CAES em formações de sal (Succar & Williams, 2008).

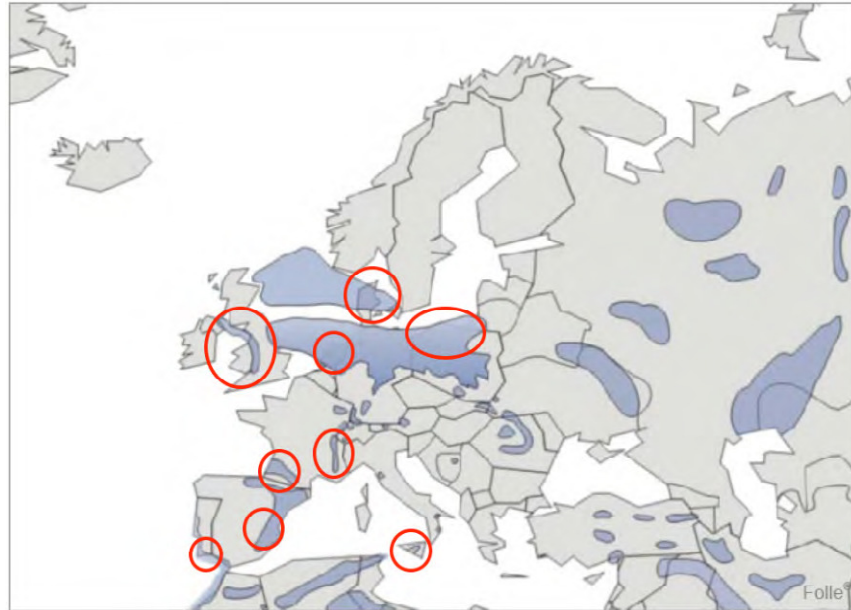


Fig. 2-5 Coincidência do potencial eólico elevado e domos de sal na Europa. Os círculos vermelhos indicam áreas com potencial eólico e as manchas a azul-escuro indicam as formações de sal CAES (Succar & Williams, 2008).

2.6 Volume e pressão de funcionamento CAES

Uma central CAES pode operar de maneiras diferentes, dependendo do tipo de reservatório geológico (Barnes & Levine, 2011).

O modo mais comum consiste em operar em condições de volume constante, isto é com um volume de armazenamento constante, mas pressão variável (Barnes & Levine, 2011).

Este método de funcionamento oferece duas opções de projeto:

- I. Um sistema que permite que a pressão à entrada da turbina varie com a pressão na caverna;
- II. Um sistema que mantém a pressão constante à entrada da turbina por estrangulamento do ar a montante (Barnes & Levine, 2011).

Embora esta última opção exija um volume de armazenamento superior, devido a perdas resultantes do estrangulamento, foi a opção em ambas as centrais CAES existentes por permitir uma maior eficiência da turbina (Barnes & Levine, 2011).

A central CAES de Huntorf foi projetada para ajustar o ar saído da caverna para os 46 Bar à entrada da turbina (com a caverna a operar entre os 48 a 66 Bar) e o sistema McIntosh ajusta o ar de entrada a 45 Bar (com operação entre os 45 a 74 Bar) (Barnes & Levine, 2011).

Uma terceira opção passa por manter a caverna de armazenamento a pressão constante durante toda a operação, usando uma coluna de água ligada a um reservatório à superfície (Barnes & Levine, 2011) (Fig. 2.6).

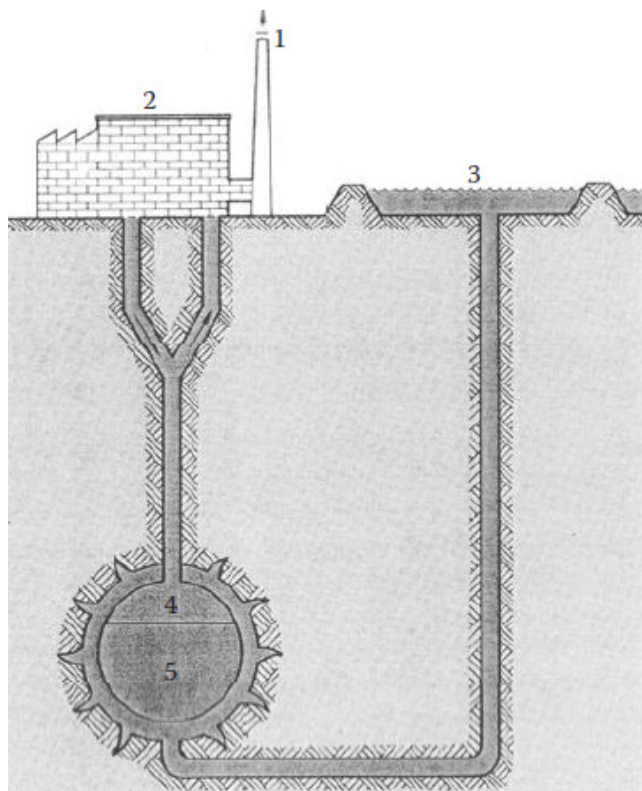


Fig. 2-6 Esquema do sistema CAES com caverna de armazenamento a pressão constante por compensação com coluna de água; (1) chaminé, (2) central CAES, (3) reservatório superficial de água, (4) armazenamento de ar, (5) coluna de água (Barnes & Levine, 2011).

A utilização de volume de armazenamento compensado por uma coluna de água minimiza as perdas e melhora a eficiência do sistema, mas é preciso garantir o controle do fluxo de ar e do volume de ar na caverna, de forma a evitar instabilidades no contacto entre água e ar. Essa instabilidade é denominada efeito “champanhe” (Giramonti & Smith, 1981 in Barnes & Levine, 2011).

Esta técnica, com utilização de água doce como fluido de compensação, é inviável para cavernas construídas em sal, uma vez que o contínuo fluxo de água iria dissolver as paredes da caverna. Porém, a técnica seria viável se em vez de água doce, se utilizasse a salmoura como fluido de compensação. O funcionamento seria similar ao da caverna compensada por coluna de água, mas há superfície teria de existir um tanque de salmoura saturada (Barnes & Levine, 2011).

Naturalmente, colocar-se-iam preocupações a nível biológico e de contaminação de águas subterrâneas (Weber, 1975 in Barnes & Levine, 2011).

Assim, este tipo de operação de pressão compensada está limitada a sistemas com o reservatório desenvolvido em rochas duras e de sal-gema com o uso de salmoura como fluido e não pode ser desenvolvida em armazenamentos em rochas porosas (aquíferos) (Barnes & Levine, 2011).

2.7 Tecnologia de geração da energia CAES

O modo de operação de centrais CAES evoluiu com o desenvolvimento da tecnologia (Fig. 2-7) e atualmente são consideradas três gerações CAES:

- I. Sistema de primeira geração, também conhecido como sistema convencional, é o único sistema CAES em uso comercial tanto em Huntorf como em McIntosh (EASE & EERA, 2013).
- II. A segunda geração de centrais CAES está em fase de pesquisa e desenvolvimento. A maioria dos planos é baseada no melhoramento técnico e na modificação das turbinas de gás já existentes (EASE & EERA, 2013).
- III. A terceira geração de centrais CAES é denominada como “Advanced Adiabatic CAES” (AA-CAES) ou (A-CAES) (EASE & EERA, 2013).

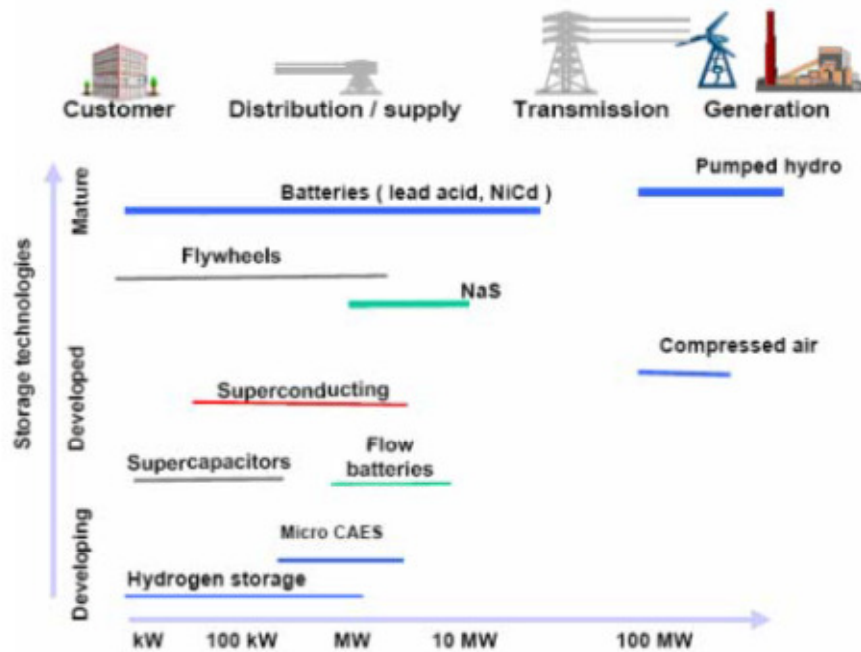


Fig. 2-7 Tipos de armazenamento de energia referindo a capacidade tecnológica e comercial (Arsie *et al.* 2009).

2.7.1 Funcionamento dos sistemas CAES convencionais

O funcionamento do sistema CAES convencionais (Fig. 2-8) é praticamente idêntico às turbinas de gás convencionais, exceto que as operações de compressão e de expansão ocorrem independentemente e em diferentes momentos, porque a energia de compressão é fornecida separadamente, e quando concluída, a fase final (expansão) pode fornecer energia elétrica (Barnes & Levine, 2011).

CAES system

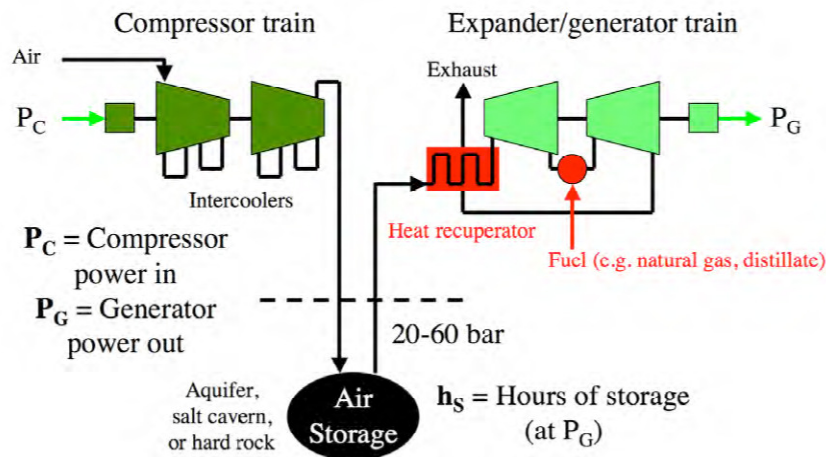


Fig. 2-8 Esquema da configuração do sistema CAES convencional (Succar & Williams, 2008).

Durante a compressão (armazenamento de energia), a eletricidade é usada para ativar uma cadeia de compressores que injetam ar para o reservatório de armazenamento (Barnes & Levine, 2011).

Na compressão verifica-se o aumento da temperatura e da pressão. O ar antes de ser injetado no reservatório subterrâneo, passa por um conjunto de refrigeradores para reduzir a temperatura do ar. Aumenta-se assim a compressão e a eficácia do armazenamento, reduzindo o volume necessário para armazenamento e minimizando o esforço térmico nas paredes do reservatório (Barnes & Levine, 2011).

Apesar da energia de entrada ser superior à necessária por unidade de massa, devido à necessidade de arrefecimento, o consumo total de combustível ainda é drasticamente inferior à contribuição da energia da central CAES para a rede e três vezes inferior à de uma turbina convencional (Ter-Gazarian, 1994 in Barnes & Levine, 2011).

Durante a operação de expansão, o ar pressurizado é retirado do reservatório de armazenamento e misturado com gás natural. A queima da mistura provoca a expansão do ar (tipicamente em duas fases) que passando pela turbina, gera energia elétrica (Barnes & Levine, 2011).

Se a fase de aquecimento do ar não fosse cumprida, ou seja, se o ar a passar pela turbina mantivesse a temperatura do interior da caverna, exigiria maior fluxo de ar para atingir a mesma rentabilidade, aumentando os requisitos de entrada de energia do compressor e reduzindo o sucesso da operação (Zaugg, 1975 in Barnes & Levine, 2011).

Além disso, na ausência de combustão, o arrefecimento inerente à expansão de um gás provocaria temperaturas baixas à saída da turbina com risco significativo de formação de gelo nas pás, apesar do pequeno teor de humidade específica no ar armazenado a alta pressão (Barnes & Levine, 2011).

2.7.2 Funcionamento dos sistemas CAES de segunda geração (CAES-2)

Nakhamkim *et al.* (2009) desenvolveu e patenteou uma nova tecnologia CAES de segunda geração (CAES-2). A tecnologia resulta da experiência adquirida na central de McIntosh ao longo dos anos, e dos seus dados de operação, desempenho e de manutenção.

Comparando as tecnologias CAES convencionais e CAES-2, verifica-se que esta é menos dispendiosa na fase de construção, tem menores custos operacionais e possui características de funcionamento mais flexíveis.

Os expansores geram aproximadamente 70% da energia total que a central CAES-2 produz, sem qualquer aumento adicional de emissões e de combustível, e as turbinas a gás são responsáveis por cerca de 30% da energia produzida.

As turbinas na tecnologia CAES-2 foram melhoradas para potenciar um aumento da energia produzida em cerca de 20% a 25%. Assim, desenvolveram-se duas formas de potenciar a rentabilidade das turbinas: (i) a extração do ar a partir do compressor-expansor, para ser injetada na turbina de gás a montante da câmara de combustão, (ii) injeção do fluxo de escape do compressor-expansor a temperatura inferior à ambiente (sujeita a otimização num recuperador de calor) diretamente para a turbina de gás (Nakhamkim *et al.* 2009).

O recuperador de calor pode pré-aquecer o ar saído do armazenamento até cerca de 450 a 550 °C, dependendo da temperatura de combustão na turbina a gás e dos aproveitamentos gerados pela otimização na central (Nakhamkim *et al.* 2009).

2.7.3 Funcionamento dos sistemas Adiabatic CAES (ACAES)

Este conceito visa recuperar e armazenar o calor resultante da compressão do ar, através da incorporação de um dispositivo de armazenamento de calor (EASE & EERA, 2013).

O dispositivo de armazenamento de calor poderá ser um reservatório pressurizado envolto por pedras ou tijolos de cerâmica moldada (EASE & EERA, 2013).

Os desafios desta tecnologia prendem-se com os materiais a usar e que têm que ser resolvidos para permitir a construção do reservatório e das tubagens.

Outro desafio a ultrapassar pela ACAES é o desenvolvimento de um compressor de alta temperatura que suporte temperaturas na ordem dos 600°C e pressões de 100 bar (EASE & EERA, 2013).

A vantagem mais significativa da ACAES é a ausência de emissão de gases de efeito de estufa, pois não ocorre o processo de combustão e não há consumo de combustíveis fósseis no processo de produção de energia elétrica.

A construção de uma central ACAES de demonstração poderá entrar em funcionamento em 2016, na melhor das hipóteses, e terá uma eficiência na ordem dos 70% (EASE & EERA, 2013).

2.8 Centrais CAES em atividade

2.8.1 Huntorf

A central Huntorf (Fig. 2-9) é a primeira instalação CAES do Mundo, com construção concluída em 1978, perto de Bremen, Alemanha (Succar & Williams, 2008).

A central tem uma potência instalada de 290 MW e foi projetada e construída pela ABB para fornecer energia de arranque para as centrais nucleares localizadas próximo do Mar do Norte e para fornecer potência de pico a baixo custo.

A central tem operado com sucesso há quase 3 décadas, maioritariamente como unidade de corte de pico e para complementar outras instalações de armazenamento (Hidroelétrica por

bombagem), e para suprimir dificuldades no tempo de resposta das centrais termoelétricas (a carvão) em que o tempo de resposta a picos de procura é elevado (Succar & Williams, 2008).

A central de Huntorf inicialmente foi concebida com um volume de armazenamento capaz de responder a duas horas de produção de energia, mas tem sido modificada e modernizada de forma a aumentar o tempo de produção de energia para cerca de quatro horas (Zschocke, 2012), de modo a auxiliar na gestão e equilíbrio na produção de energia eólica no norte da Alemanha (Crotogino *et al.* 2001 e Succar & Williams, 2008).

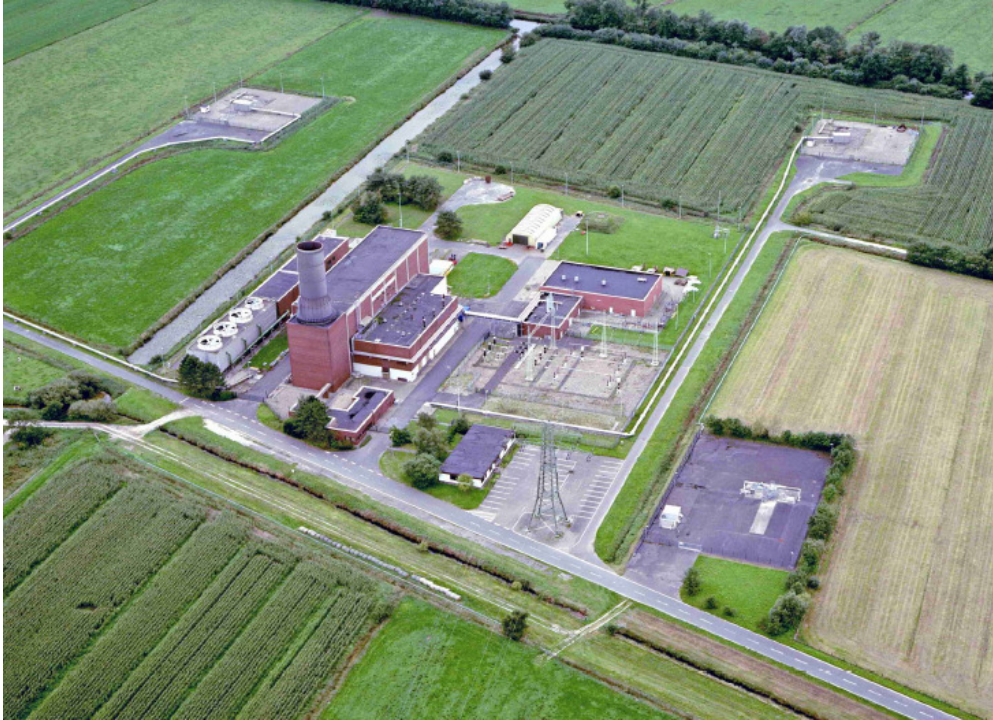


Fig. 2-9 Central de Huntorf (na parte superior da imagem é visível a localização das cavernas e ao centro a central CAES) (Zschocke, 2012).

A parte subterrânea responsável pelo armazenamento do ar comprimido consiste em duas cavernas de sal com um volume total de 310 000 m³, projetadas para operar entre os 48 a 66 bar (Fig. 2-10) (Succar & Williams, 2008).

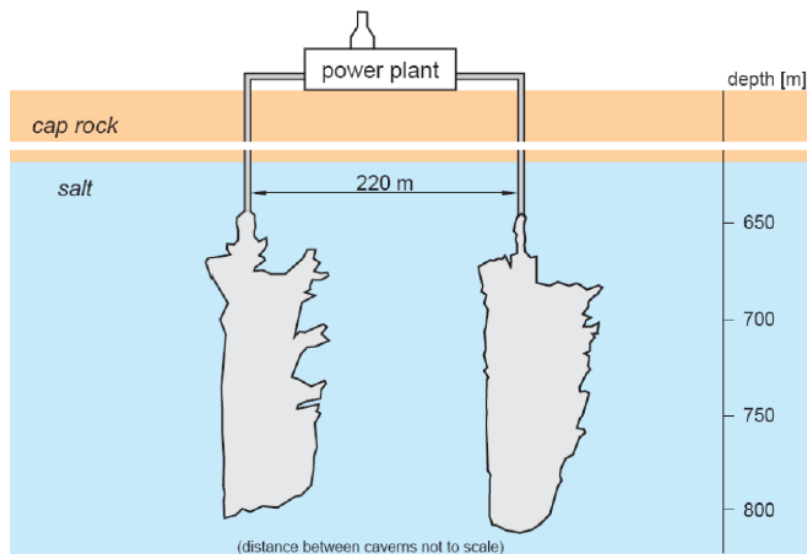


Fig. 2-10 Representação esquemática das cavernas da central de Huntorf (Zschocke, 2012).

O ar armazenado nas cavernas de sal originou oxidação e corrosão nos equipamentos da central a montante da turbina a gás. Este fenómeno foi observado no primeiro ano de laboração, o que obrigou à instalação no interior das tubagens das cavernas de um polímero reforçado com fibra (Succar & Williams, 2008).

Os restantes equipamentos (turbina e expansores) da central (Fig. 2-11) também foram afetados pelo mesmo fenómeno, pelo que foram desencadeadas medidas especiais para garantir as condições aceitáveis e modificou-se a entrada de ar das turbinas para garantir a proteção dos equipamentos (Succar & Williams, 2008).

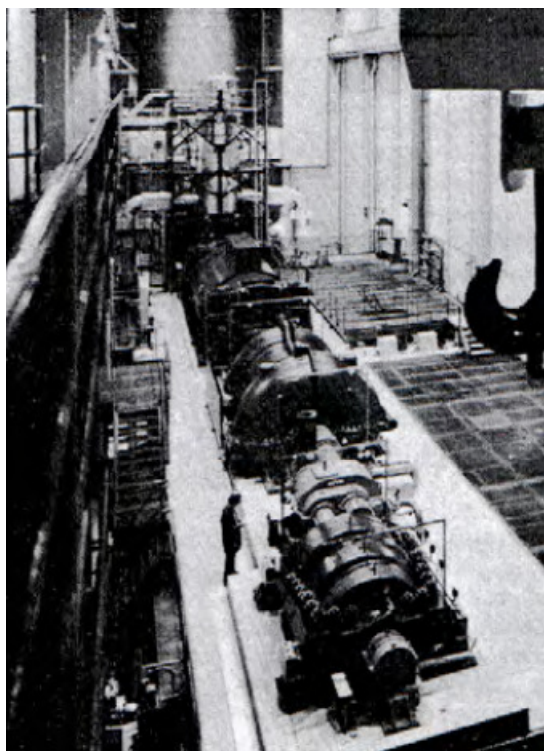


Fig. 2-11 Central de Huntorf (Casa das maquinas) (Succar & Williams, 2008).

As fases que envolvem as ações de compressão e de expansão do ar, obtém fluxos de ar de 108 e 417 kg/s, respetivamente e cada uma delas é constituída por duas etapas (Succar & Williams, 2008).

A turbina na primeira etapa expande o ar de 46 para 11 Bar (Succar & Williams, 2008).

A central não possui recuperadores de calor proveniente dos gases de escape da turbina para minimizar o tempo de resposta de iniciação do sistema (Succar & Williams, 2008).

2.8.2 McIntosh

A central de McIntosh, com uma potência instalada de 110 MW foi construída pela *Alabama Electric Cooperative* (AEC) num domo salino no sudoeste do Estado do Alabama nos EUA e está em laboração desde 1991 (Succar & Williams, 2008).

A construção da central (turbinas, instalações e caverna subterrânea) demorou 30 meses e teve um custo de 51 milhões de dólares (EPRI, 2003).

A central de McIntosh está projetada para 26 horas de produção de energia na potência máxima e recorre a uma única caverna construída por dissolução do sal-gema (Succar & Williams, 2008) situada entre os 450 m a 760 m abaixo da superfície (EPRI, 2003). A caverna

opera com pressões entre 45 a 74 bar e possui um volume de armazenamento de cerca de 560 000 m³ (Succar & Williams, 2008).

O projeto foi desenvolvido pela *Dresser-Rand*, mas muitos dos aspetos operacionais da central, (temperatura de entrada de ar, pressões, etc.) são semelhantes aos planos da central de Huntorf (Succar & Williams, 2008).

Esta central (Fig.2-12) encontra-se equipada com um recuperador de calor que reduz o consumo de combustível em cerca de 22% e dispõe da capacidade para dois tipos de combustível, gás natural ou gasóleo (Succar & Williams, 2008).

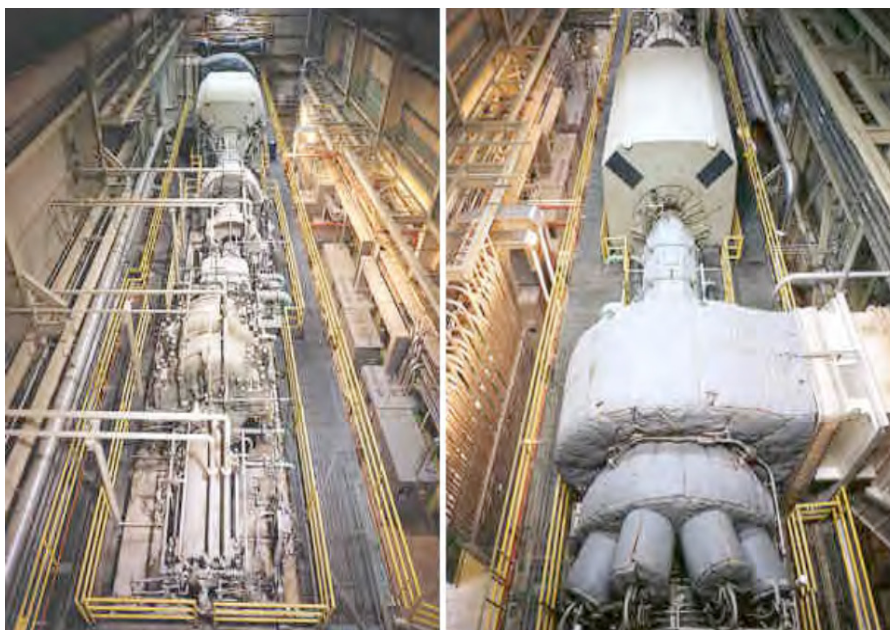


Fig. 2-12 Central de McIntosh. À esquerda, o sistema de compressão; à direita, a turbina e câmara de combustão (Succar & Williams, 2008).

No início do funcionamento da central verificaram-se quebras significativas na fiabilidade devido a interrupções na produção de energia, o que foi resolvido através de modificações na câmara de combustão de alta pressão e do redesenho da câmara de combustão de baixa pressão (Succar & Williams, 2008).

Estas alterações melhoraram a fiabilidade média de 91,2% a 92,1% para um valor na ordem dos 96,8% a 99,5%, referentes aos ciclos de produção de energia e de compressão, respetivamente (De Biasi, 1998 in Succar & Williams, 2008).

2.9 Projetos para futuras centrais CAES

2.9.1 Norton

A maior central CAES projetada (Fig. 2-13) está a ser desenvolvida em Norton, Ohio, nos EUA, com uma potência de 2700 MW distribuída por 9 turbinas (9 x 300 MW) (Neumiller, 2007).

O reservatório corresponde ao aproveitamento de uma mina de calcário com aproximadamente 670 m de profundidade, com uma capacidade de armazenamento de cerca de 9,5 milhões de metros cúbicos (Neumiller, 2007) e deverá operar a pressões entre os 55 e 110 bar (Succar & Williams, 2008).

Quando concluída, a instalação da central será capaz de fornecer 2700 MW com emissões comparáveis a uma central térmica a gás natural de 600 MW de potência (Research Reports International 2004 in Neumiller, 2007).

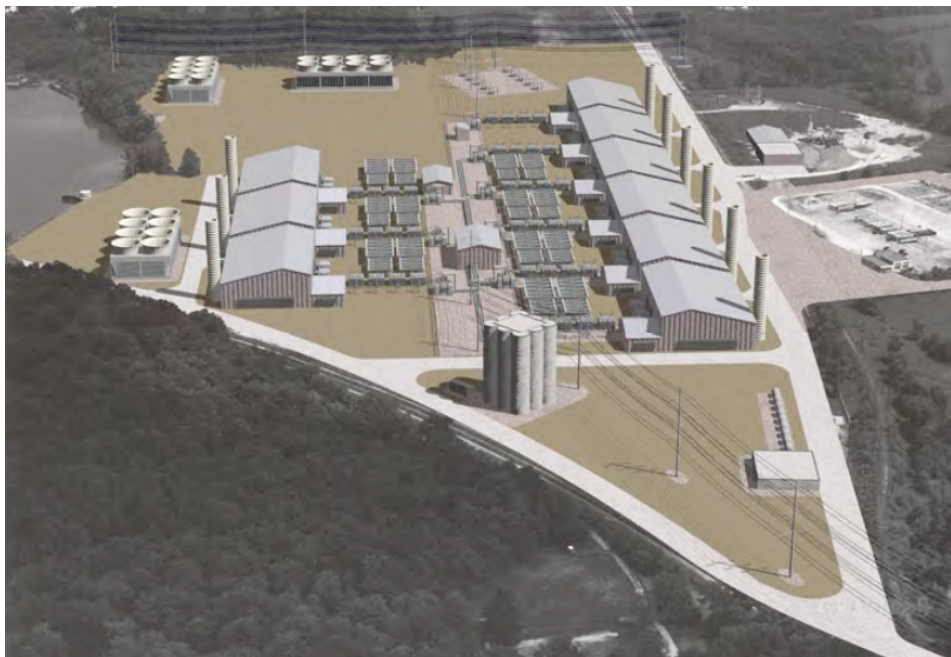


Fig. 2-13 Projeto das instalações de superfície da central CAES em Norton (Succar & Williams, 2008).

2.9.2 Parque de armazenamento de energia de Iowa

A associação, *Iowa Association of Municipal Utilities (IAMU)*, está a desenvolver um projeto CAES acoplado a um parque eólico com o armazenamento num aquífero (Fig.2-14) (Succar & Williams, 2008).

Esta instalação CAES e parque eólico são denominados por *Iowa Stored Energy Park (ISEP)*, e a central terá uma potência instalada de 268 MW, enquanto o parque eólico terá uma potência de cerca de 75 MW a 100 MW. Trata-se de um projeto pioneiro, pois é o primeiro que alia a tecnologia CAES a um parque eólico e a utilizar um reservatório poroso para o armazenamento de energia (Succar & Williams, 2008).

A central CAES irá ocupar 16 hectares e o reservatório geológico encontra-se a cerca de 900 m de profundidade num anticlinal, numa formação porosa (arenito). O parque eólico encontra-se a cerca de 150 km a 300 km do local da central CAES (Succar & Williams, 2008).

O local para implementar a central CAES foi selecionado após uma triagem entre 20 possíveis estruturas geológicas no estado do Ohio. Os estudos realizados para avaliar a formação escolhida demonstraram que esta tem o volume, dimensão e a profundidade adequadas, e que possui uma rocha de cobertura impermeável (Succar & Williams, 2008).

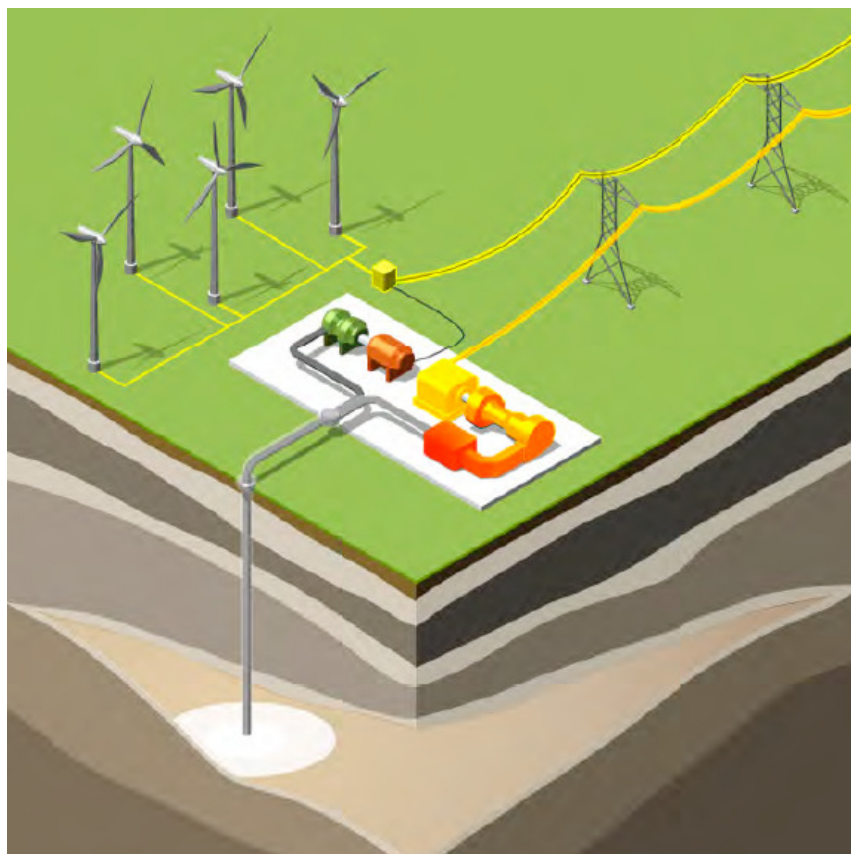


Fig. 2-14 Esquema do Iowa Stored Energy Park (ISEP) (Succar & Williams, 2008).

2.9.3 Sistemas CAES propostos no Texas

O estado do Texas conhece um rápido crescimento do desenvolvimento e produção de energia eólica, mas a rede de distribuição de energia possui poucos pontos de interligação, o que compromete a viabilidade dos investimentos em energia eólica (Succar & Williams, 2008).

A região possui formações de sal-gema com comprovada viabilidade e segurança para desenvolver sistemas CAES, o que possibilitaria uma gestão adequada da energia eólica

Assim, a *Ridge Energy Storage & Grid Services*, anunciou planos para desenvolver vários projetos CAES no estado do Texas, incluindo um projeto com potência de 540 MW em *Matagorda County*, baseado no projeto de McIntosh e recorrendo a uma caverna num domo salino.

Paralelamente, a empresa *Ridge Energy Storage* preparou dois estudos que concluíram pela viabilidade da construção de novos sistemas CAES, propondo uma unidade de 270 MW de potência com 50 horas de armazenamento.

A Shell e a TXU anunciaram também a pretensão de explorar a possibilidade de aliar um sistema de armazenamento CAES a um parque eólico de 3000 MW em *Panhandle, Texas* (TXU, 2007 in Succar & Williams, 2008).

2.9.4 Central de Columbia Hills

O projeto para a central CAES em Columbia Hills (Fig.2-15) está localizado no estado de Washington, EUA, com uma capacidade de geração de potência de 207 MW.

Este local oferece condições geológicas adequadas e encontra-se próximo de gasodutos de transporte de gás natural.

A estrutura geológica para armazenamento é uma rocha porosa num anticlinal, com capacidade para satisfazer os requisitos de compressão de ar equivalente a 40 dias de injeção até atingir o *spill-point* (McGrail *et al.* 2013).

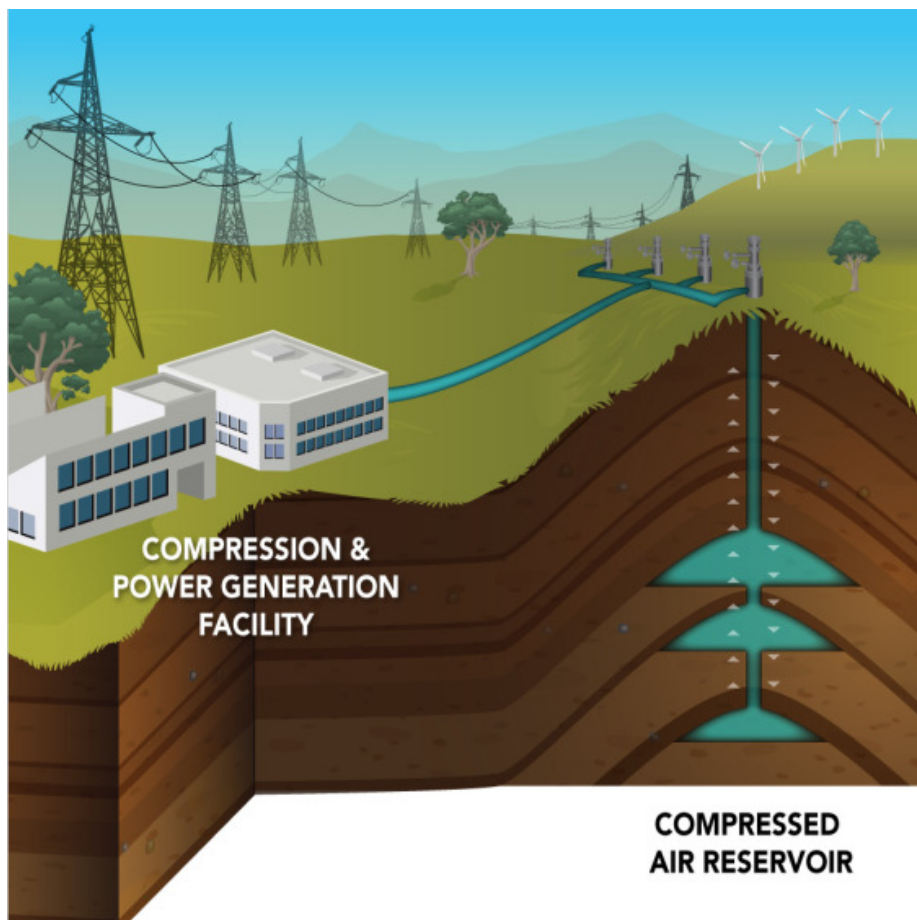


Fig. 2-15 Esquema da central CAES em Columbia Hills (McGrail *et al.* 2013).

Os resultados de simulações mostram que aproximadamente 40% do volume de ar armazenado poderá ser extraído, representando mais de 400 horas de produção de energia antes de atingir o nível de água da formação, o que sugere a importância de manter um volume constante de ar para permitir a gestão do reservatório e impedir a captação da água pelo furo (McGrail *et al.* 2013).

A baixa permeabilidade do reservatório obriga à construção de 4 furos de injeção para ser possível usar toda a capacidade de armazenamento da estrutura geológica (McGrail *et al.* 2013).

2.9.5 Central CAES de Yakima Minerals

O local para o desenvolvimento da central Yakima Minerals é em Yakima Canyon (Fig. 2-16) a norte de Selah no estado de Washington, EUA.

O armazenamento será realizado num anticlinal numa rocha porosa, a uma profundidade superior a 3 Km, que não mostrou perdas de ar comprimido mesmo depois de um ano de injeção (McGrail *et al.* 2013).

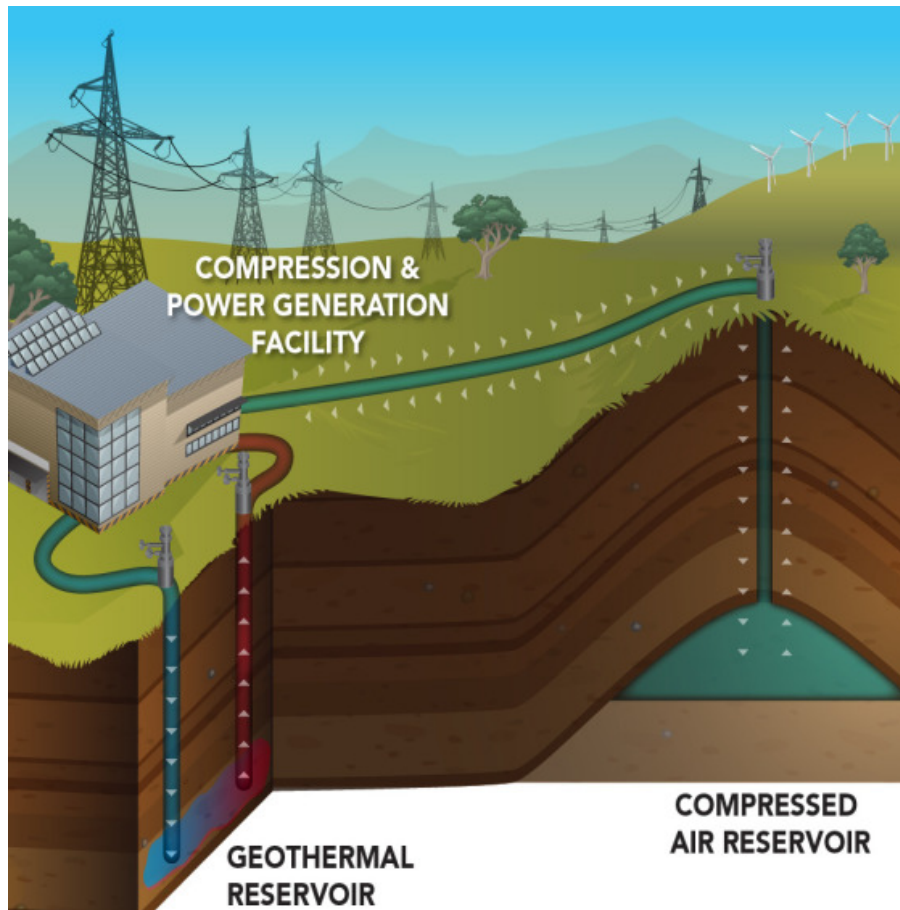


Fig. 2-16 Esquema da central CAES em Yakima Minerals (McGrail *et al.* 2013).

O local não tem acesso a fornecimento de gás natural através de gasodutos nem de água para as necessidades exigidas (McGrail *et al.* 2013).

Dadas estas restrições e a elevada profundidade do armazenamento o projeto segue uma abordagem pouco convencional, sendo proposto o desenvolvimento de uma central CAES híbrida com potência de 87 MW.

A central CAES híbrida utilizaria recursos geotérmicos e a pressão natural para produzir energia.

A água a extrair do reservatório excede os 300°C e será utilizada para suportar múltiplas operações na central (McGrail *et al.* 2013).

Para o funcionamento da turbina haverá a transferência de energia da água para o ar comprimido, permitindo a sua expansão enquanto o calor resultante da compressão também será captado pela água proveniente do mesmo reservatório. A adição de amônia à água permite a captação mais eficiente do calor (McGrail *et al.* 2013).

2.9.6 ADELE

A empresa alemã RWE, juntamente com alguns parceiros, está a desenvolver um projeto (Fig. 2-17) de armazenamento de energia na forma de ar comprimido na Alemanha (RWE, 2010).

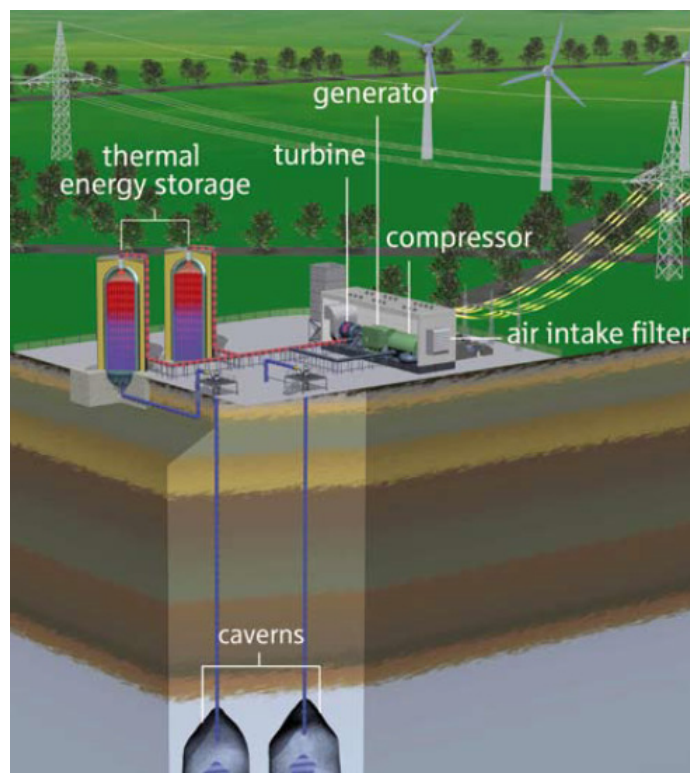


Fig. 2-17 Esquema do projeto de investigação ADELE (RWE, 2010).

Este projeto, denominado ADELE, possui uma capacidade de armazenamento de 360 MWh e capacidade de produzir 90 MW de potência (EASE, 2013), e tem como objetivo desenvolver a tecnologia Adiabatic CAES (ACAES) (RWE, 2010).

O funcionamento é semelhante aos CAES convencionais, mas permite o aproveitamento e armazenamento do calor resultante da compressão do ar, possibilitando a reutilização desse calor para a expansão do ar a ser injetado na turbina e suprimindo a necessidade de utilização de gás natural ou de outro tipo de combustível (RWE, 2010).

3. Características geológicas de reservatórios para a tecnologia CAES

Como referido anteriormente, o armazenamento de energia na forma de ar comprimido pode ser desenvolvido em diferentes tipos de geologias como domos salinos, rochas porosas e em rochas duras. Neste capítulo abordam-se apenas o tipos de reservatórios que se baseiam na construção de uma caverna subterrânea, a saber: rochas duras e domos salinos.

Dependendo da natureza da geologia encontram-se variações importantes nos requisitos exigidos para o desenvolvimento da tecnologia CAES, porém alguns critérios são comuns, e independentes do tipo de reservatório.

Na implantação de sistemas CAES existem alguns requisitos sobre a área envolvente, relevo, topografia e riscos geológicos (Allen *et al.* 1983). Assim, por exemplo para a instalação de CAES a área não pode ser considerada de risco sísmico e deve ser livre de riscos geológicos, como escorregamentos, subsidência e inundações (Allen *et al.* 1983).

3.1 Critérios para seleção de reservatórios em rochas duras

As rochas que reúnem os requisitos básicos para implantar sistemas CAES em cavernas construídas em rochas duras abrangem os granitos, granodioritos, dioritos, gabros, quartzitos, gnaisses sem foliação, dolomias e calcários (Allen *et al.* 1982a).

As rochas selecionadas para CAES devem ser suficientemente competentes para sustentar uma caverna só com o suporte das paredes e de pilares (Allen *et al.* 1982a). Os maciços que se apresentem fortemente fraturados e/ou com falhas ou com outros tipos de descontinuidades, não são adequados, pois não garantem a sustentabilidade, nem a contenção do ar na caverna (Allen *et al.* 1982a).

3.1.1 Requisitos hidráulicos

Os requisitos hidráulicos para o desenvolvimento de CAES em rochas duras são os inerentes ao maciço rochoso, como a porosidade primária e secundária, a permeabilidade e a condutividade hidráulica (Allen *et al.* 1982a).

Assim, para a construção de cavernas em rochas duras é da máxima importância que a porosidade e a permeabilidade sejam as menores possíveis, para minimizar o fluxo descendente de água durante a construção da caverna e as fugas de ar durante o funcionamento do CAES (Allen *et al.* 1982a).

A condutividade hidráulica é uma grandeza que depende da profundidade, pois está relacionada com o estado de tensão do maciço rochoso. O maciço rochoso deve ter uma condutividade hidráulica inferior a 10^{-8} m/s, de forma a garantir a contenção do ar no reservatório (Komada *et al.* 1980 in Allen *et al.* 1982a). Dado que a permeabilidade é um fator difícil de controlar, as perdas de ar admissíveis numa caverna CAES podem ser de cerca de 2% do total do volume de ar contido na caverna por dia (Allen *et al.* 1982a).

A permeabilidade secundária pode ser responsável por importantes fugas de ar, por isso é importante minimizar o movimento descendente de água para o interior da caverna, garantindo a saturação suficiente do maciço rochoso durante o desenvolvimento do CAES. A saturação do maciço neste tipo de reservatórios funciona como um selante, pois impede fugas de ar da caverna. A manutenção dos níveis de saturação resulta da injeção de água na formação rochosa durante o tempo de vida do sistema CAES, mantendo a caverna estanque (Allen *et al.* 1982a).

A profundidade a que a caverna deve ser construída depende da pressão hidrostática, e deve ser igual ou ligeiramente superior à pressão de armazenamento do ar no reservatório.

A caverna tem que se encontrar na zona saturada e à profundidade ideal para garantir a pressão hidrostática ideal. A zona saturada deve garantir o preenchimento dos vazios e das fissuras com a devida pressão hidrostática. O nível piezométrico sofre um reajustamento negativo devido à construção da caverna e o preenchimento dos vazios pela água por capilaridade deve retardar a fuga de ar da caverna, enquanto a reduzida permeabilidade e fracturação reduzem o fluxo excessivo de água para o interior da caverna (Allen *et al.* 1982a).

3.1.2 Requisitos à superfície

O local para a construção da caverna depende de requisitos à superfície que viabilizem a construção de um reservatório para permitir o fornecimento de água, de forma a manter a pressão hidrostática na rocha por injeção. Esta água deve estar disponível por fontes como rios, lagos ou aquíferos superficiais e a água deve ser de boa qualidade para facilitar a aprovação do projeto CAES (Allen *et al.* 1982a).

Existem outros fatores a ter em atenção como a precipitação, o escoamento superficial e o volume de água extraído por poços ou furos (Allen *et al.* 1982a).

3.1.3 Quimismo da água

As características químicas da água podem influenciar negativamente a operação CAES na caverna. A elevada concentração de oxigénio e o aumento da temperatura no interior da caverna induzem alterações no quimismo da água, o que pode favorecer uma acelerada degradação do maciço rochoso e causar instabilidade da caverna (Allen *et al.* 1982a).

Os efeitos negativos devidos à alteração do quimismo da água estão muito dependentes do tipo de rocha. Os calcários, dolomias e mármore são mais sensíveis, em comparação com as rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, pois os carbonatos dissolvem-se mais facilmente que os silicatos (Allen *et al.* 1982a).

3.1.4 Impermeabilização da caverna

A impermeabilização da caverna (Fig.3-1) é um método relativamente recente (década de 1990), em que se constrói um revestimento de betão com uma dada espessura e posteriormente é aplicada uma impermeabilização interna de borracha ou de chapas de aço soldadas (Rutqvist *et al.* 2012).

O betão desempenha uma dupla função: i) estrutural, para sustentação da própria caverna; e ii) vedante primário devido à baixa permeabilidade. Quanto ao isolante (borracha ou chapas de aço soldadas), tem como objetivo a impermeabilização por forma a conter e a reduzir as fugas de ar da caverna (Kim *et al.* 2012 in Rutqvist *et al.* 2012).

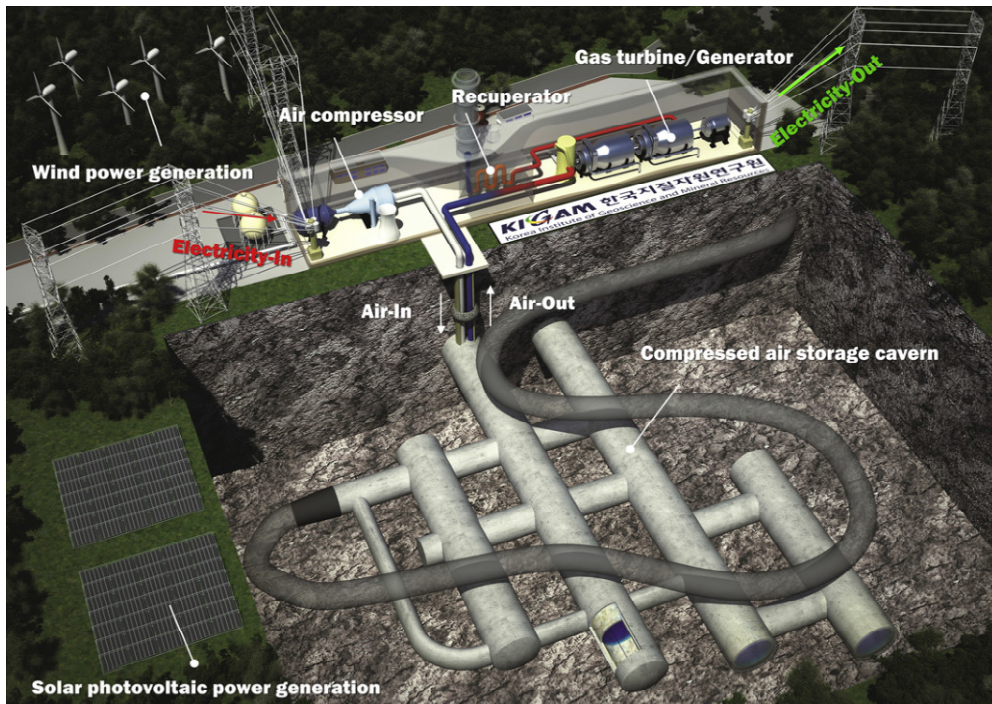


Fig. 3-1 Componentes de um sistema CAES com um revestimento em betão do reservatório (Kim *et al.* 2011).

Revestimento em betão

A construção do revestimento em betão armado consiste na colocação contínua de segmentos de betão pré-fabricados com articulações entre cada segmento. Durante a colocação de cada segmento é preenchido o espaço entre a caverna e os segmentos com um material de enchimento (Rutqvist *et al.* 2012).

A geometria simétrica e radial (Fig. 3-2) é a mais favorável, pois permite o confinamento mecânico e impede a abertura de fendas radiais.

A capacidade estrutural do betão permite a construção de cavernas a profundidades inferiores às não revestidas, o que favorece o aproveitamento de cavernas resultantes da extração mineira (Kim *et al.* 2011).

A característica de vedante do betão depende da baixa permeabilidade que possui, e pode ser otimizada com a manutenção da humidade a níveis relativamente elevados na própria estrutura de betão. Esta humidade deve ter origem num aquífero que envolva a própria caverna (Kim *et al.* 2011).

A baixa permeabilidade permite taxas de fugas de ar inferiores a 1% (com revestimento interior de borracha), para pressões de armazenamento de 5 a 8 MPa (valor médio para operação de CAES) e profundidade de 100 m. Este valor é aceitável para o desenvolvimento de CAES em cavernas em rochas duras (Kim *et al.* 2011).

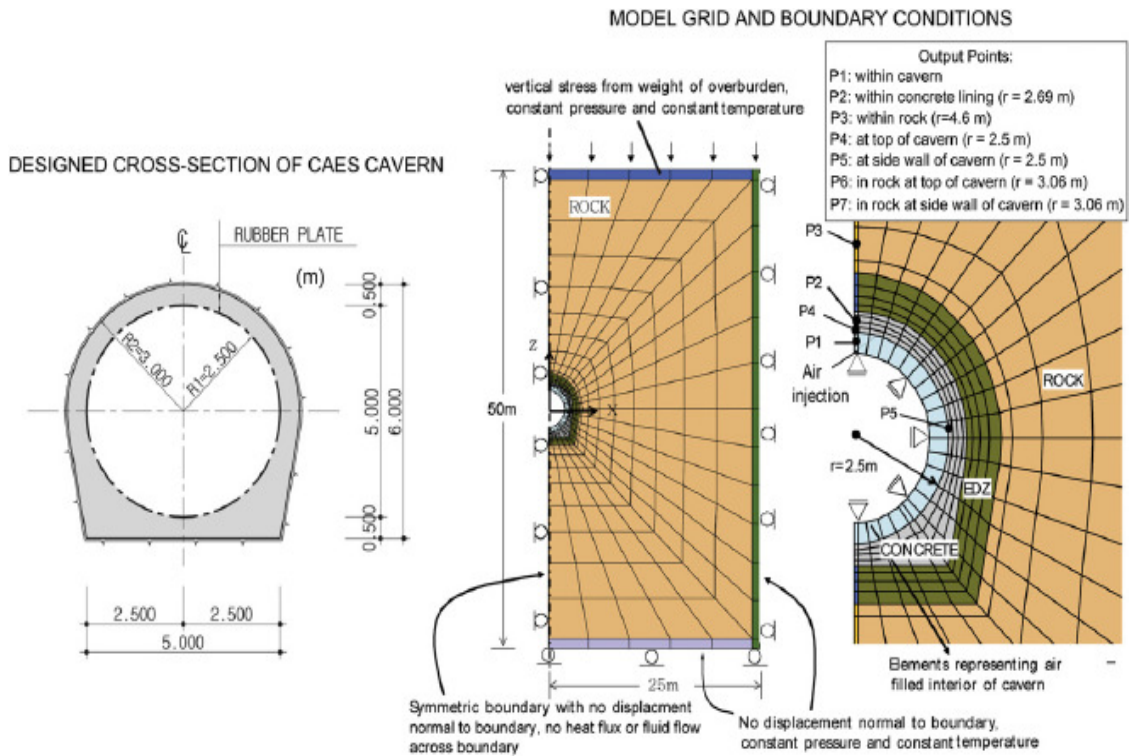


Fig. 3-2 Exemplo de uma secção transversal de um projeto de uma caverna CAES com revestimento de betão e modelo das condições do revestimento (Rutqvist *et al.* 2012).

Impermeabilização interna

O fator de maior relevância para o desenvolvimento de CAES é a contenção de ar no interior da caverna ou de outra estrutura geológica (Rutqvist *et al.* 2012). Com o desenvolvimento do revestimento de betão (superfícies planas na caverna) é possível adicionar um revestimento interno ao betão de capas de aço soldadas ou uma capa de borracha (Rutqvist *et al.* 2012).

O revestimento mais eficiente para o funcionamento/economia é o uso da capa de borracha, pois permite a viabilidade com fugas inferiores a 1%, enquanto o uso de chapas de aço soldadas é muito mais dispendioso e está mais vocacionado para o armazenamento de gás natural, pois impede a totalidade das fugas de gás (Rutqvist *et al.* 2012).

3.2 Critérios para seleção de reservatórios em cavernas em domos salinos

O sal-gema apresenta-se como uma rocha excelente para construção de cavernas, pois é geralmente impermeável, possui resistência semelhante à do betão a forças de compressão, permite reajustamentos plásticos que garantem a selagem de fraturas e espaços vazios e pode ser facilmente extraído por dissolução (Allen *et al.* 1982b). Estas características favorecem o desenvolvimento de sistemas CAES (Allen, 1985 e Adolfson *et al.* 1979 in (Barnes & Levine, 2011)).

O sal-gema não suporta grandes vãos de teto. Assim, a construção de cavernas em domos salinos obedece a geometrias de cavernas altas e estreitas para reduzir ao máximo a dimensão dos tetos (Barnes & Levine, 2011).

Os locais escolhidos devem apresentar uma espessura de sal suficiente e estrutura competente a uma profundidade adequada e sem excesso de insolúveis intercalados no maciço de sal (Allen *et al.* 1982b).

As cavernas devem apresentar-se a profundidade adequada para que a pressão do ar seja inferior à pressão litostática, evitando as fugas e assegurando a estabilidade mecânica da caverna (Kim *et al.* 2011).

Para abertura da caverna é necessário acesso a água (em quantidade e qualidade) para promover a dissolução do sal, e é necessário garantir os meios para a deposição da salmoura resultante da dissolução, por forma a garantir impactos ambientais mínimos (Allen *et al.* 1982b).

3.2.1 Características geológicas

A capacidade estrutural do sal-gema depende do tamanho do grão de sal, pois o grão de pequenas dimensões diminui a sustentabilidade dos tetos (Barnes & Levine, 2011).

Nos domos salinos podem ser encontradas zonas que apresentam alguns riscos para o desenvolvimento de cavernas, como sejam: zonas com sal com baixa competência; zonas com ocorrência de gás; presença de água salgada, ou inclusões, ou explosões de gás. Estes fenómenos representam os principais fatores de instabilidade no maciço de sal (Allen *et al.* 1982b).

A formação de sal-gema pode apresentar zonas de cor escura devido a existência de impurezas (ex.: argilas), ou elevado teor de anidrite. Estas heterogeneidades caracterizam-se por apresentar fraca estabilidade estrutural e maior permeabilidade, prejudicando a estabilidade estrutural da possível caverna de armazenamento.

Se na formação se verificar a descontinuidade destas zonas escuras, ou seja se existir alguma homogeneidade em profundidade, pode ser viável a abertura de cavernas para armazenamento na formação de sal (Allen *et al.* 1982b).

3.2.2 Requisitos hidráulicos

A pressão hidrostática natural faz a água envolver as formações de sal, face à quase nula permeabilidade desta rocha. Porém, a distribuição de pressões encontra-se condicionada pela taxa de dissolução, de saturação da água e da solubilidade da formação de sal (Allen *et al.* 1982b).

Podem ocorrer níveis sedimentares saturados intercalados nas camadas de sal, por vezes hidráulicamente conectados a falhas no topo da formação ou a aquíferos na base da formação de sal (Allen *et al.* 1982b). No entanto, as bolsas de água estagnada em contacto direto com o sal não apresentam perigo para a formação de sal, devido à água se encontrar saturada e não promover a dissolução da formação de sal (Allen *et al.* 1982b).

Por fim, os recursos hídricos disponíveis devem garantir fontes viáveis de água para permitir uma rápida dissolução do sal, viabilizando a construção da caverna (Allen *et al.* 1982b).

3.2.3 Temperatura

A estabilidade do sal-gema depende fortemente da temperatura sendo este o único parâmetro que influencia o fecho (contração das paredes de sal) em cavidades construídas em sal-gema (Allen *et al.* 1982b).

Algumas experiências em laboratório desenvolvidas por Lomenick (1968) concluíram que a 200°C existem graves problemas estruturais nas cavernas de sal-gema mesmo para cargas reduzidas, da ordem dos 13,8 MPa (Allen *et al.* 1982b).

A temperatura em cavidades de sal não deve exceder os 200°C, mas para sistemas CAES este valor deve ser bastante menor, de forma a manter o volume constante da caverna durante o seu período de tempo de vida, na ordem dos 35 anos (Allen *et al.* 1982b).

A tensão de deformação acumulada é o principal indicador da estabilidade da caverna. A convergência da formação de sal responsável pela deformação da caverna nunca deve ser superior a 10% num período de tempo de 35 anos (Allen *et al.* 1982b).

Em cavernas para armazenamento CAES a temperatura máxima admissível é de 80°C, embora a temperatura máxima do ar possa ser superior durante o período de injeção de ar, pois a elevada capacidade e condutividade térmica do sal-gema garantem a manutenção da temperatura no valor máximo admissível (Allen *et al.* 1982b).

4. Caracterização e localização do caso de estudo

A instalação de uma central CAES está dependente de vários fatores que condicionam a viabilidade do projeto de instalação. Dada a complexidade inerente à tecnologia, existem dois tipos de fatores que influenciam a sua instalação, nomeadamente as condições à superfície para construção da central de produção de energia, e as condições do reservatório de armazenamento subterrâneo.

4.1 Condições para implementação das instalações superficiais

Os critérios de proximidade e de segurança à superfície para instalação duma central CAES são os seguintes (Mays *et al.* 2012):

- I. Densidade populacional inferior a 193 hab /km²;
- II. Ausência de massas de água (albufeira, lagos, rios e ribeiros) e de zonas húmidas;
- III. Ausência de áreas protegidas (parques naturais);
- IV. Declive do terreno inferior a 12% (7°);
- V. Baixo risco de deslizamento de terrenos;
- VI. Não inclusão em planície de inundação de 100 anos;
- VII. Distância inferior a uma milha (1,6 km) de uma estrutura geológica adequada ao armazenamento de ar comprimido.

Adicionalmente importa verificar as condições de proximidade às redes de distribuição de energia elétrica e de abastecimento de gás natural.

A tecnologia CAES depende da rede elétrica (Fig. 4-1) para receção e produção de energia elétrica, e da rede de distribuição de gás natural para expansão do ar comprimido armazenado.



Fig. 4-1 Rede elétrica nacional (REN, 2015).

Sendo Portugal um país com uma boa rede de distribuição de gás natural, torna-se relevante avaliar os locais com potencialidade para o desenvolvimento de CAES junto a rede de gás natural nacional (Fig. 4-2).

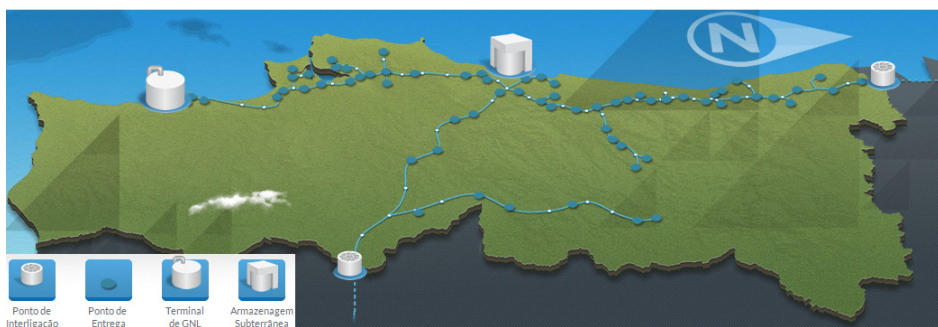


Fig. 4-2 Rede nacional de gás natural (REN, 2015).

A tecnologia CAES permite a gestão eficiente da energia elétrica, dado que, permite armazenar o excesso de produção de energia renovável de forma a suprimir carências na produção da mesma.

Assim, quando se verifica a proximidade de um centro produtor de energia renovável com uma potência instalada elevada, deve ser considerada a possibilidade de implementação de uma central CAES associada a essa fonte de energia (Cavaco, 2013).

4.1.1 Critérios primários para viabilizar a construção da caverna

O local onde se pretende desenvolver a caverna de armazenamento deve possuir três condições básicas para o desenvolvimento da caverna (Allen *et al.* 1982b):

- I. Espessura de sal e profundidade adequada ao desenvolvimento da caverna para armazenamento de ar comprimido;
- II. Disponibilidade adequada de água para lixiviação do sal;
- III. Proximidade a locais ambiental e economicamente viáveis para despejo da salmoura resultante da dissolução do sal-gema.

4.2 Caso de estudo

Cavaco (2013) desenvolveu um estudo com o objetivo de avaliar os locais ótimos para a instalação duma central CAES em Portugal Continental. O estudo consistiu em cruzar os dados referentes aos fatores referidos anteriormente com as geologias adequadas para o armazenamento de ar comprimido, utilizando o *software Quantum GIS*, de forma a identificar os melhores locais para implementação de uma central CAES.

Cavaco (2013), concluiu que a zona de Rio Maior (Fig. 4-3) respeita a globalidade dos fatores indicados anteriormente.

A zona de Rio Maior apresenta uma estrutura geológica adequada (diapiro de Rio Maior) em profundidade e em dimensão, encontra-se na proximidade do parque eólico de Serra dos Candeeiros, com elevada potencia instalada, e tem condições adequadas à superfície.

Devido à existência do parque eólico foi desenvolvida uma boa rede de transporte de energia elétrica, que engloba linhas de média e alta tensão. Finalmente, encontra-se na proximidade um gasoduto que permite o acesso a gás natural (Cavaco, 2013).

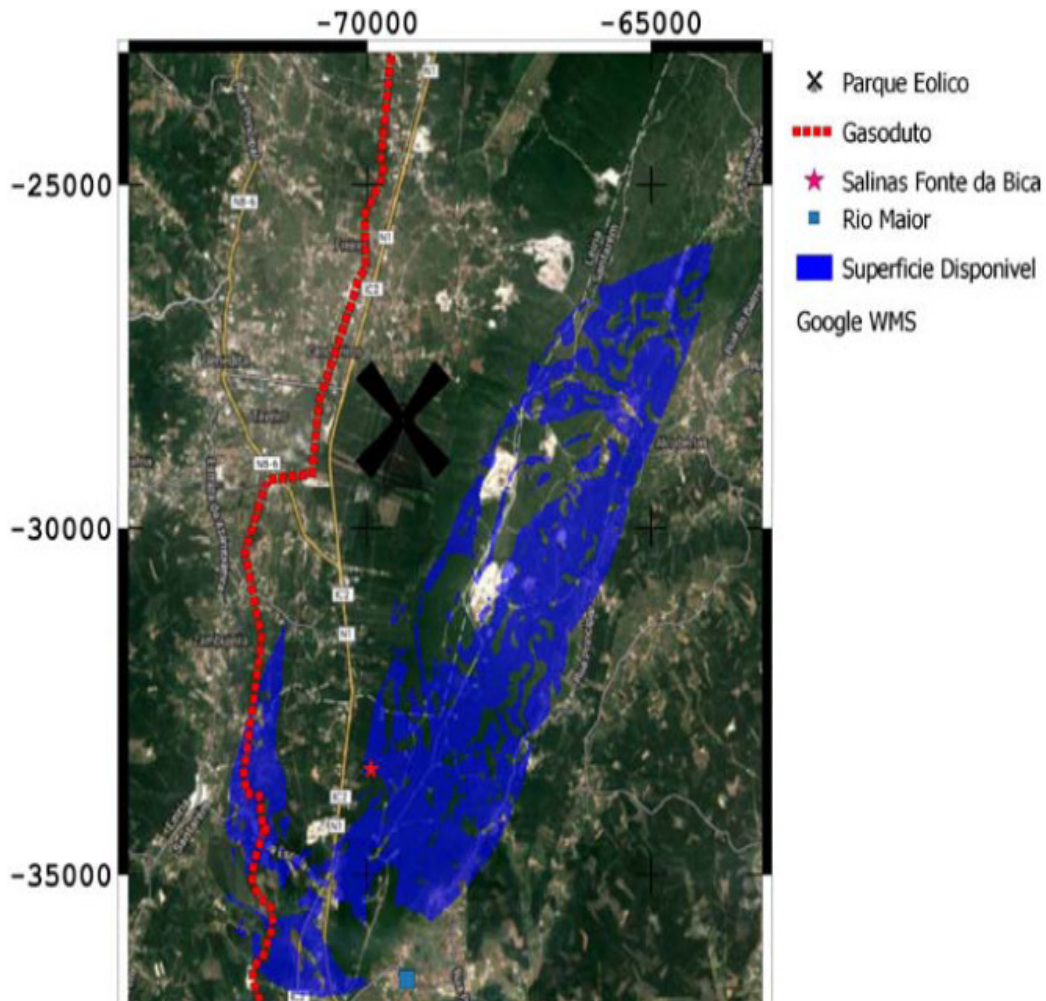


Fig. 4-3 Localização do caso de estudo. Área do diapiro de Rio Maior que reúne os fatores para a construção de uma central CAES, segundo Cavaco (2013) (Cavaco, 2013).

Cavaco (2013) aponta a zona sul do diapiro como a área disponível para o desenvolvimento de uma central CAES junto a Rio Maior, enquanto os fatores de exclusão são, a norte o parque Natural da Serra de Aire e Candeeiros e os elevados declives associados à mesma, e a sul, a proximidade a Rio Maior.

4.2.1 Parque eólico da Serra dos Candeeiros

O parque eólico da Serra dos Candeeiros resulta da união de dois parques eólicos denominados Candeeiros I e Candeeiros II (Fig. 4-4) (Coelho, 2007), constituídos por 37 aerogeradores do modelo V90 de 3 MW de potência nominal, e que totalizam uma potência instalada de 111 MW (Energias Endógenas de Portugal, 2014).

O parque eólico Candeeiros I deu início à sua produção em 2005, localiza-se nas freguesias de Alcobertas e de Rio Maior, no concelho de Rio Maior e é composto por 25 aerogeradores com uma potência nominal de 3 MW, totalizando uma potência de 75 MW (e²p, 2014).

O parque eólico Candeeiros II deu início à sua produção em 2006, localiza-se nos terrenos da cumeada da Serra dos Candeeiro, nas freguesias de Benedita e de Turquel, concelho de Alcobaça, e é constituído por 12 aerogeradores com uma potência nominal de 3 MW, que totaliza uma potência de 36 MW (e²p, 2014).

O parque eólico possui um edifício de comando e uma subestação. O transporte de energia do parque eólico é efetuado no subsolo e posteriormente por via aérea até à subestação de Rio Maior (Coelho, 2007).



Fig. 4-4 Vista aérea do parque eólico da Serra dos Candeeiros (e²p, 2014).

4.2.2 Disponibilidade de água para lixiviação

O acesso a água doce é fundamental para escavação da caverna em sal-gema, pois esta resulta da dissolução controlada da formação de sal de forma a obter o dimensionamento desejado.

A necessidade de água é cerca de 8 vezes o volume da caverna a dimensionar (Allen *et al.* 1982b).

Disponibilidade de água na região

Na avaliação da disponibilidade de água na região foram considerados os dois sistemas aquíferos que envolvem a zona em estudo (Fig. 4-5). A noroeste do local encontra-se o sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho e a sudeste o sistema aquífero da Margem Direita do Tejo.



Fig. 4-5 Localização dos aquíferos existentes na zona de estudo (SNIRH, 2015).

a) Sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho

O sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho estende-se por uma área de cerca de 767,6 km², com um balanço hídrico anual que admite entradas entre os 300 a 350 hm³/ano e saídas da ordem dos 275 hm³/ano (SNIRH). Alguns autores admitem a transferência de água para o aquífero da margem direita do Tejo (Almeida *et al.* 2000).

O sistema de drenagem superficial é praticamente inexistente, enquanto o subterrâneo conta com apenas 5 nascentes de carácter permanente e algumas temporárias (Almeida *et al.* 2000).

Estas 5 nascentes estão localizadas no bordo do Maciço Calcário Estremenho devido ao contacto com rochas de baixa permeabilidade.

A nascente Olhos de Água do Alviela é a que apresenta descarga mais significativa, superior a 1 hm³/dia. Na estação seca apresenta um valor na ordem dos 30000 m³/dia, com uma descarga média de 120 hm³/ano (Almeida *et al.* 2000).

As nascentes do Almonda debitam cerca de 80 a 100 hm³/ano, enquanto as nascentes do rio Liz debitam entre 60 e 70 hm³/ano (Almeida *et al.* 2000).

O caudal observado nos Olhos de Água de Chiqueda varia na ordem do metro cúbico por segundo em períodos de ponta, mas na maior parte do ano varia entre as centenas e dezenas de litros por segundo (Almeida *et al.* 2000).

A nascente dos Olhos de Água de Alcobertas considera-se apenas a sua existência anual, não estando definido o seu caudal (Almeida *et al.* 2000).

b) Sistema aquífero da Margem Direita do Tejo

O sistema aquífero da Margem Direita do Tejo abrange uma área de cerca de 1629 Km², com um balanço hídrico anual que admite entradas na ordem dos 150 a 200 hm³/ano e saídas na ordem dos 92 hm³/ano (SNIRH, 2015).

Este sistema alberga um aquífero carbonatado e um aquífero profundo de características detriticas, considerado na maior parte confinado ou semi-confinado (Almeida *et al.* 2000).

Os calcários pertencentes a este aquífero, denominados como calcários de Almoester, apresentam uma espessura variável, de 200 m em Almoester, mas em Vila Chã de Ourique (Cartaxo) uma sondagem de 400 m não atravessou completamente esta unidade geológica (Almeida *et al.* 2000).

Os calcários de Almoester apresentam uma transmissividade muito variável entre os 0,1 e 1200 m²/dia, embora os valores mais frequentes se situem entre os 10 a 130 m²/dia (Almeida *et al.* 2000).

O aquífero detrítico, denominado Arenito de Ota possui uma espessura média de 200 a 250 m (Almeida *et al.* 2000), mas em casos pontuais (como no Cartaxo) é superior a 360 m. A transmissividade do aquífero situa-se entre os 1 e 4100 m²/dia, mas sendo mais frequente valores entre os 20 e os 160 m²/dia (Almeida *et al.* 2000).

4.2.3 Despejo da salmoura

O rastreio de possíveis locais de rejeição da salmoura revela-se de extrema importância no desenvolvimento de uma caverna em sal. Estes locais devem garantir o despejo de vários milhões de m³ com baixo risco ambiental (Allen *et al.* 1982b).

A interioridade do local de estudo inviabiliza o melhor local de despejo, o oceano que dista cerca de 30 km.

Porém, na zona do local de estudo verifica-se a existência de um aquífero salino superficial e associado a este, as salinas da Fonte da Bica. Assim, existe a possibilidade da injeção da salmoura no aquífero ou mesmo o aproveitamento desta nas salinas.

Salinas e aquífero da Fonte da Bica

As salinas da Fonte da Bica (Fig. 4-6) localizam-se no Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (PNSAC) e em 1997 foram classificadas como imóvel de interesse público (Decreto-lei N^o 67/97), comprovando a singularidade e importância social económica e patrimoniais das salinas (Calado & Brandão, 2009).



Fig. 4-6 Vista aérea das salinas da Fonte da Bica (Calado & Brandão, 2009).

Na Fonte da Bica a ocorrência de sal-gema é em profundidade associada a formações muito espessas (Zbyszewski, 1961). Verifica-se ainda a existência de uma fração de argila disseminada nas formações (Calado & Brandão, 2009).

A formação das águas ricas em cloreto de sódio, aponta para que a salmoura resulte da lixiviação das margas salíferas, por infiltração das águas da chuva (Calado & Brandão, 2009).

A zona provável para infiltração da água da chuva está associada aos calcários do Maciço Calcário Estremenho (Calado & Brandão, 2009).

Na bibliografia analisada existem dados que demonstram um possível rebaixamento do aquífero salino “A água que abastece as marinhas actuais é tirada de um poço central que tem cerca de 6 m de profundidade.” (Zbyszewski, 1961) e “No centro da exploração destaca-se o poço de onde se recolhe água salgada com cerca de 4 metros de diâmetro e 9 metros de profundidade.” (Calado & Brandão, 2009).

Este rebaixamento progressivo pode viabilizar a injeção da salmoura no aquífero, sem descartar a necessidade de estudos para avaliar o volume disponível sem correr riscos de salinizar aquíferos e solos férteis.

A laboração das salinas de Fonte da Bica é normalmente no período de Maio a Setembro, condicionado pelas condições meteorológicas e pelo tempo de evaporação variando entre os 2 a 7 dias condicionado (Calado & Brandão, 2009).

Uma vez que o volume de água tratada depende dos dias de evaporação, aqui contabilizados como 153 dias (Maio a Setembro), e que o período de evaporação são 2 a 7 dias por ciclo, pode estimar-se o volume de salmoura que pode ser dessalinizado num ano.

Dado que a área disponível para evaporação da água é cerca de 25000 m² e que a altura das talhas é aproximadamente cerca de 0,25 m (Calado & Brandão, 2009), podem ser tratados 6250 m³ de água por ciclo.

Considerando a duração limite do ciclo de 2 a 7 dias e o valor médio de 4,5 dias estimou-se a capacidade de dessalinização entre 136875 m³/ano e 478125 m³/ano de água, com uma média de 212500 m³/ano. (Fig. 4-7).

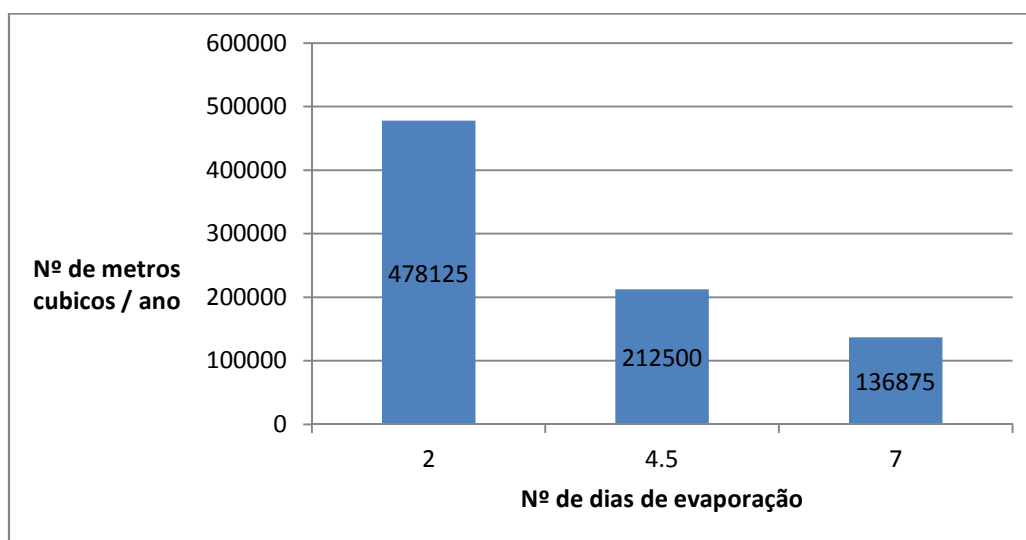


Fig. 4-7 Volume de água tratada nas salinas por ano.

4.3 Sismicidade local

A carta Neotectónica de Portugal continental (Fig. 4-8) (Cabral & Ribeiro, 1988) representa os acidentes tectónicos que evidenciam atividade nos últimos 2 milhões de anos, aproximadamente desde do fim do Pliocénico. Os principais acidentes ativos na região de estudo são a falha do Vale Interior do Tejo, a Falha da Nazaré e a falha associada à instalação do diapiro de Rio Maior (Carvalho *et al.* 2011).

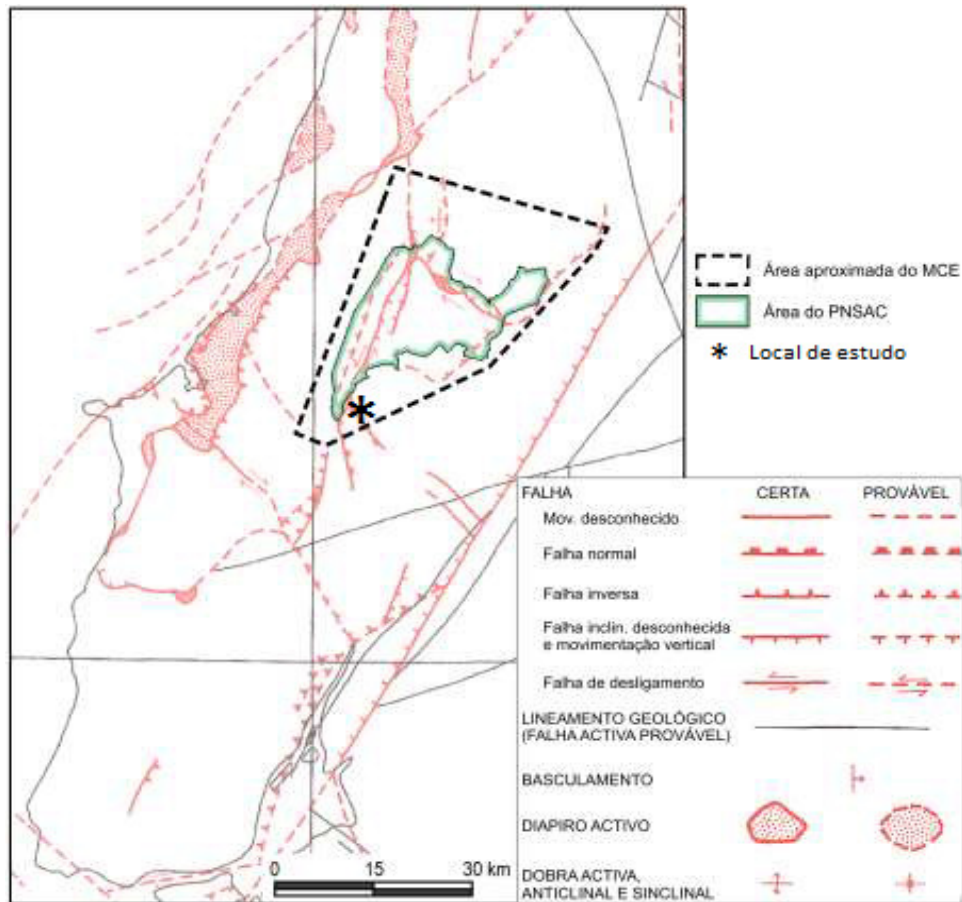


Fig. 4-8 Enquadramento Neotectónica do local de estudo (Carvalho *et al.*2011).

4.3.1 Ação sísmica em Portugal continental

O anexo nacional ao Eurocódigo 8 (NP EN 1998 – 1) considera dois cenários possíveis para ação sísmica em Portugal Continental (in Silva, 2013).

A ação sísmica Tipo 1 refere-se a sismos com hipocentro no limite das placas continentais (interplacas) e caracteriza-se por serem sismos de maior magnitude e distância focal, enquanto a ação sísmica Tipo 2 refere-se a sismos com hipocentro no interior das placas continentais (intraplacas) e caracteriza-se por sismos de menor magnitude e distância focal (Silva, 2013).

Assim, o Eurocódigo 8 considera dois zonamentos referentes a perigosidade sísmica. Para a ação sísmica Tipo 1, o território Continental encontra-se dividido em 6 zonas, sendo a vermelha a de maior perigosidade e a azul-escuro a de menor perigosidade (Fig. 4-9).

O zonamento da ação sísmica Tipo 2 divide o território Continental em 3 zonas, sendo a vermelha a de maior perigosidade e a azul a de menor perigosidade (Fig. 4-9). A área de estudo, Rio Maior, enquadra-se na zona 1.5 (baixo risco sísmico) da ação sísmica do tipo 1 e na zona 2.3 (risco sísmico médio) da ação sísmica do tipo 2.

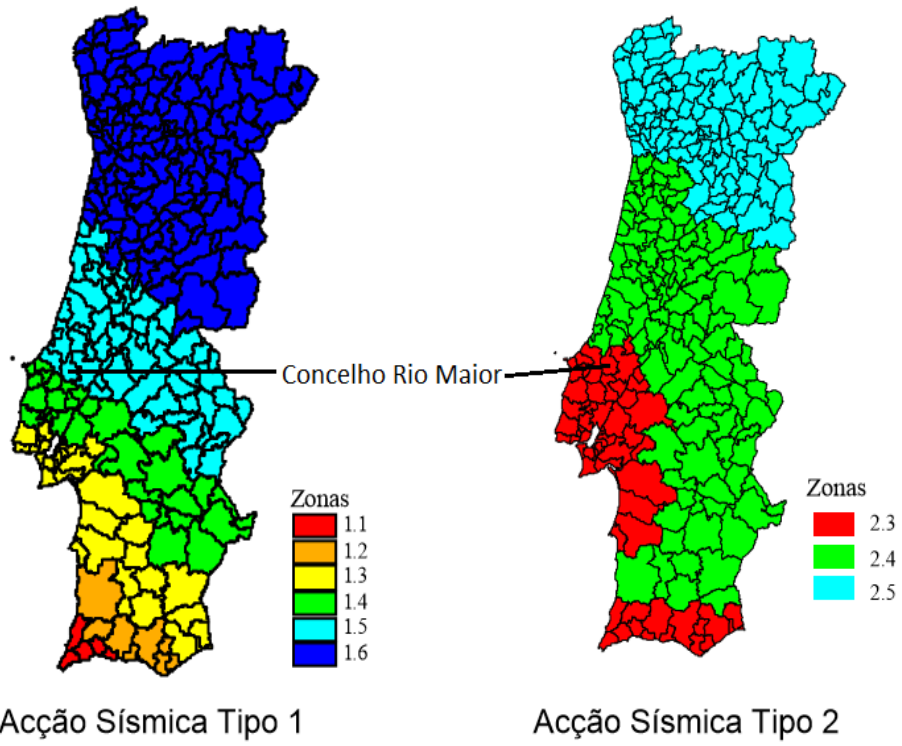


Fig. 4-9 Zonamento Sísmico do território de Portugal Continental (Adaptado in Silva, 2013).

5. Enquadramento geológico do caso de estudo

A Bacia Lusitaniana é uma bacia sedimentar localizada na margem oeste da microplaca Ibérica, e está associada a episódios distensivos responsáveis pela fragmentação da Pangeia durante a formação do Oceano Atlântico Norte, no Mesozoico (Kullberg *et al.* 2006).

Abrange uma área de cerca de 20.000 km², com aproximadamente 200 km segundo a orientação NNW – SSE e cerca de 100 km na perpendicular, onde se depositaram entre 4 a 5 Km de espessura de sedimentos do Mesozoico (Carvalho *et al.* 2011).

A estratigrafia da Bacia Lusitaniana foi descrita admitindo duas importantes sequências sedimentares interrompidas por descontinuidades: i) a fase distensiva da bacia data do Triásico Superior até ao final do Cretácico, onde a maioria das rochas são de origem carbonatada, no Jurássico, e siliciclásticas, no Cretácico; ii) O período compressivo teve início no final do Cretácico até a atualidade, promovido pela colisão da microplaca Ibérica com a placa Africana e Euroasiática. As rochas referentes ao momento compressivo são exclusivamente rochas siliciclásticas (Carvalho *et al.* 2011).

5.1 Magmatismo na Bacia Lusitaniana

Na Bacia Lusitaniana e no limite oeste do Maciço Hespérico verifica-se a existência de três ciclos de atividade magmática Mesozoica (Ferreira & Macedo, 1983; Kullberg, 2000).

O 1º ciclo representa a primeira fase de *rifting* no bordo oeste da microplaca Ibérica. Na Bacia Lusitaniana existe um único ponto onde se observa esta atividade magmática, em Sesimbra, junto a uma formação evaporítica onde aflora um complexo vulcânico sedimentar (Kullberg, 2000).

O 2º ciclo corresponde a um ciclo transicional com corpos filonianos e criptodomas de composição dolerítica, gabróica e diorítica, e data entre os 135 e 130 Ma (Martins, 1991 *in* Kullberg, 2000). Os doleritos ocorrem sobretudo no lado este da bacia, enquanto os gabros e os dioritos ocorrem no lado oeste, associados aos diapiros (Kullberg, 2000). Verifica-se a existência de estruturas magmáticas próximas e paralelas aos diapiros, intersectando o encaixante do Jurássico. A maioria segue a direção NNE – SSW, mas a orientação é NNW – ESW nos filões entre Rio Maior e Porto de Mós (Kullberg, 2000).

O 3º ciclo, de quimismo alcalino, encontra-se representado por filões tescheníticos, nomeadamente associados ao interior do diapiro da Fonte da Bica em Rio Maior, objeto deste estudo (Kullberg, 2000).

5.2 Diapirismo na Bacia Lusitaniana

Na Bacia Lusitaniana (Fig. 5-1) a maioria dos diapiros encontra-se a norte de Falha de Torres Vedras – Montejunto alinhados segundo a direção NNE – SSW (Kullberg, 2000).

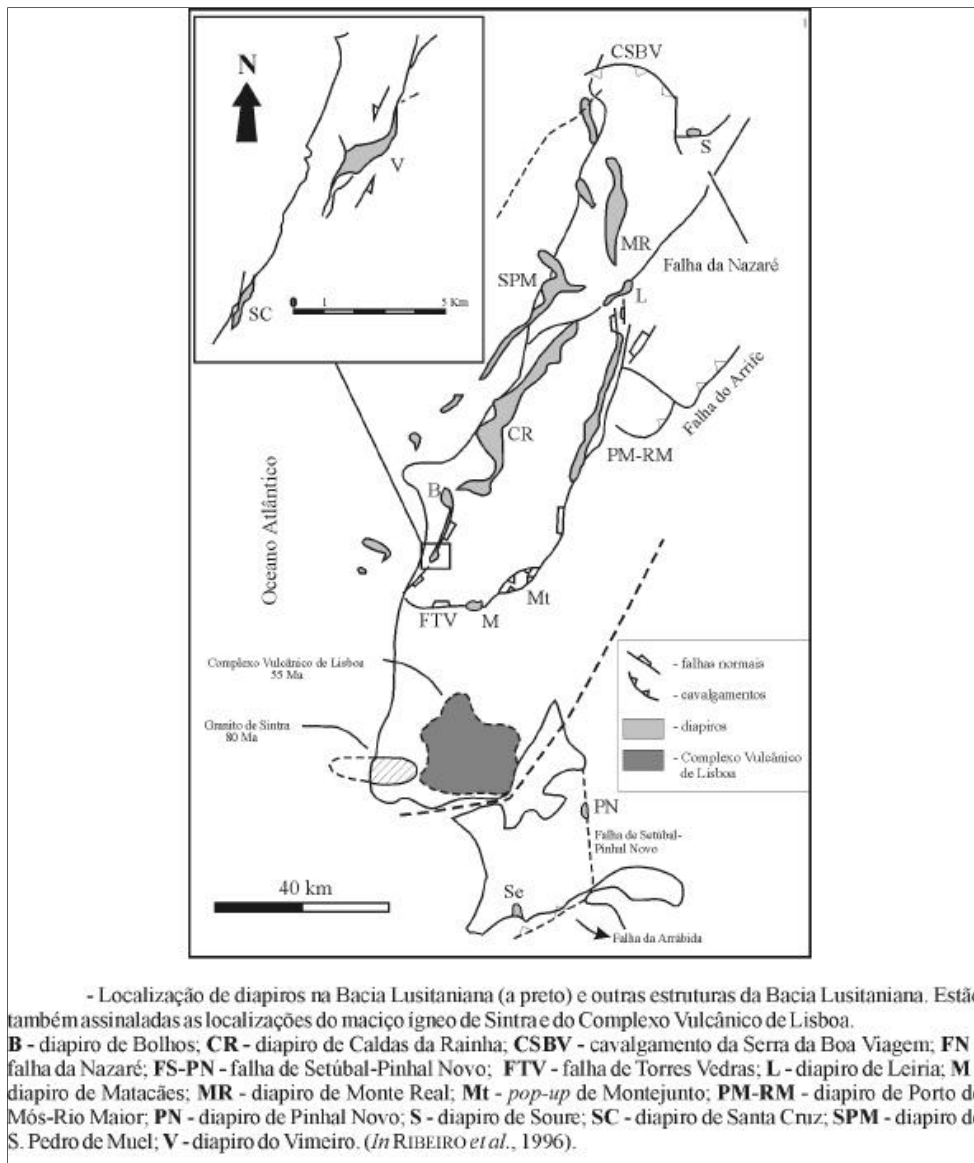


Fig. 5-1 Localização dos diapiros e de outras estruturas da Bacia Lusitaniana (Kullberg, 2000).

A unidade litoestratigráfica responsável pelo diapiro e pelos movimentos basais que definiram a configuração da estrutura tectónica da bacia Lusitaniana denomina-se Margas da Dagorda (Choffat, 1882 in Kullberg *et al.* 2006).

Carateriza-se por ser constituída por argilas e margas evaporíticas do Triásico Superior e Jurássico Inferior, que possuem propriedades físicas de densidade e de reologia especiais (Kullberg *et al.* 2006).

A evolução diápirica da Bacia Lusitaniana (Fig.5-2) ainda apresenta pouco consenso relativamente à dinâmica tectónica sedimentar do Jurássico Superior referente ao setor central da bacia (Kullberg *et al.* 2006).

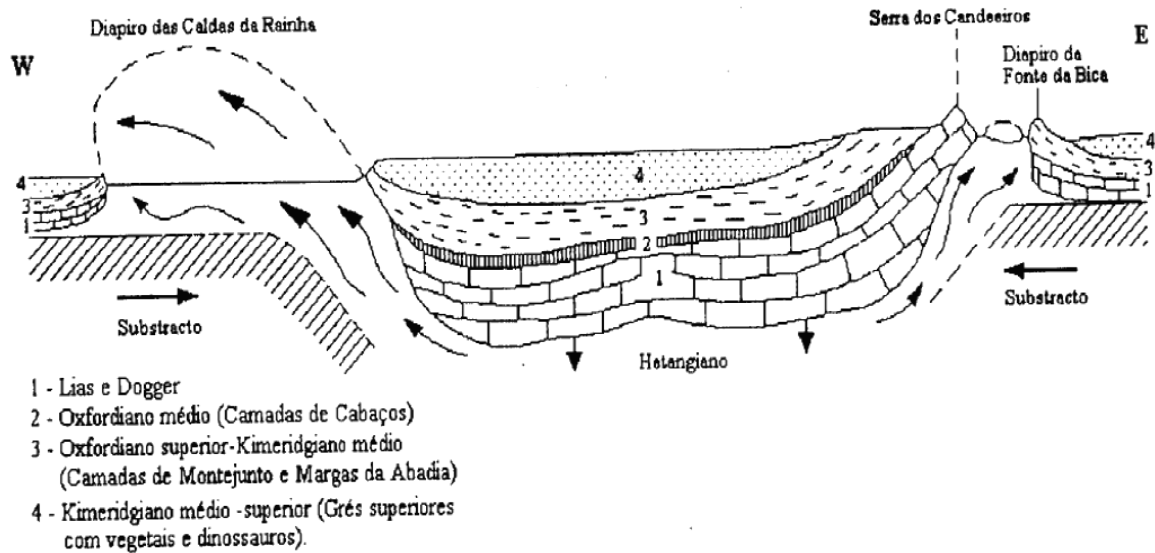


Fig. 5-2 Modelo esquemático da formação dos diapiros das Caldas da Rainha e de Fonte da Bica em Rio Maior (Zbyszewski, 1959 in Fonseca, 1996).

5.2.1 Geologia

No Maciço Calcário Estremenho (Fig. 5-3) a maior parte das rochas aflorantes datam do Jurássico Médio e Superior, existindo ainda rochas do Hetangiano até ao Pliocénico (Carvalho *et al.* 2011).

As rochas do Jurássico médio correspondem a zonas topograficamente elevadas, enquanto, o Jurássico Superior encontra-se na maior parte nas zonas deprimidas (Carvalho *et al.* 2011).

As rochas do hetangiano correspondem aos depósitos de natureza evaporítica com o alinhamento Rio Maior – Porto de Mós e caracterizado por Kullberg, (2000) como uma parede de sal (Carvalho *et al.* 2011).

Os corpos ígneos que afloram nas zonas limite e no interior do Maciço Calcário Estremenho dividem-se em 3 grupos, considerando a estrutura onde se apresentam (Carvalho, 2013).

- I. - Corpos inseridos em falhas com orientação NW – SE a WNW – ESE;
- II. - Corpos inerentes a diapiros;
- III. - Corpos únicos dependentes de aparelho vulcânico.

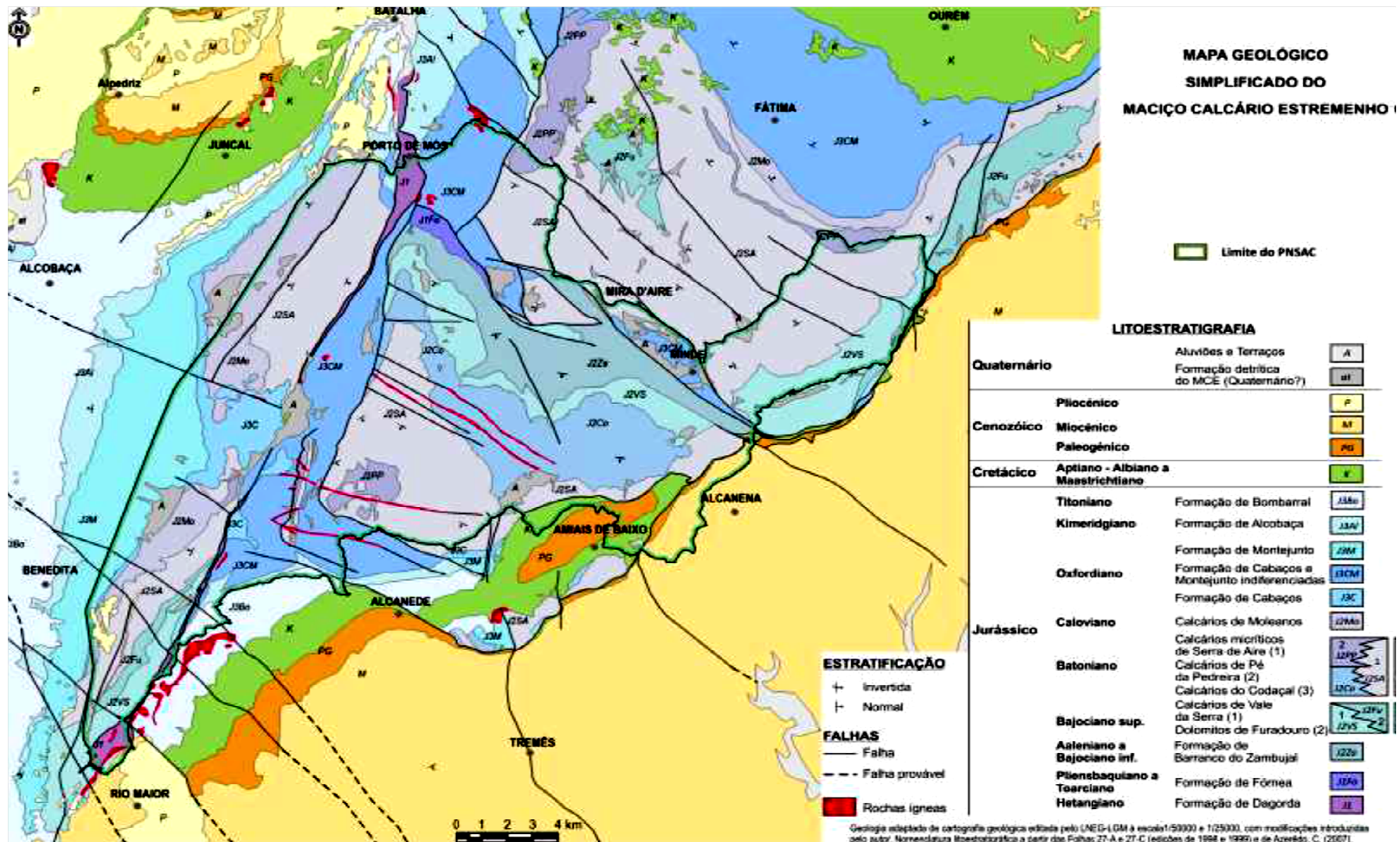


Fig. 5-3 Mapa geológico do Maciço Calcário Estremenho (Fonte: Carvalho *et al.* 2011).

5.2.2 Falhas principais

O Maciço Calcário Estremenho, e a zona de estudo, apresentam duas importantes famílias de falhas orientadas segundo NNE – SSW e NW – SE, e um importante acidente segundo a orientação NE – SW (Carvalho, 2013).

Os acidentes segundo a orientação NNE – SSW são de maior frequência e constata-se 4 falhas de grande importância (Carvalho, 2013):

- I. A falha dos Candeeiros que delimita esta serra no bordo oeste;
- II. A falha de Rio Maior – Porto Mós que delimita a Serra dos Candeeiros a este;
- III. A falha da Mendiga no bordo oeste do Planalto de Santo António;
- IV. A falha de Reguengo do Fetal no limite oeste do Planalto de São Mamede.

Estas estruturas tectónicas durante o Mesozoico comportaram-se como falhas normais em momentos distensivos, mas durante o Cenozoico algumas destas estruturas sofreram inversão, nomeadamente a falha de Rio Maior – Porto de Mós (Kullberg, 2000).

5.3 Diapiro de Rio Maior – Porto de Mós

O diapiro de Rio Maior-Porto de Mós estende-se segundo um alinhamento entre aquelas localidades, representando uma estreita faixa alongada com cerca de 35 Km. Apresenta-se como um diapiro de parede de falha com orientação NNE – SSW, contendo alguns filões no seu interior (Kullberg, 2000).

A oeste do diapiro encontram-se as Serras dos Candeeiros e a de Porto de Mós e a leste, o Planalto de Santo António e de Fátima, sendo a litologia envolvente predominantemente os calcários do Jurássico Médio (Kullberg, 2000).

Na envolvência do diapiro encontram-se ainda corpos ígneos, segundo a orientação NNE – SSW, junto ao limite do diapiro, e segundo WNW – ESE, possivelmente dependentes da falha da Mendiga e sub-paralelos à falha associada ao diapirismo (Kullberg, 2000).

Estas rochas ígneas são na sua maioria basaltos, que cortam as unidades do Jurássico Superior e as unidades mais antigas do Cretácico (Kullberg, 2000).

5.3.1 Tectónica diapírica de Rio Maior – Porto de Mós

O perfil sísmico representado na Fig. 5-4 permitiu concluir que a variação da espessura da formação de Brenha em ambos os lados do diapiro de Rio Maior impulsionou o fenómeno de halocinese.

Deduz-se que o diapiro se desenvolveu paralelamente à falha de Reguengo do Fetal e que a movimentação de ambas as estruturas tenha formado o anticlinal de sal no Jurássico Inferior e parte no Jurássico Médio, representando a atual Serra dos Candeeiros (Carvalho, 2013).

Presume-se que o diapiro de Rio Maior – Porto de Mós terá sido reativado no Jurássico Superior, permitindo a fracturação do coberto por distensão pelicular e a ascensão do sal, impulsionando o desenvolvimento do anticlinal salino na vertical.

Porém, não existem certezas acerca da ocorrência deste evento e sua datação (Carvalho, 2013).

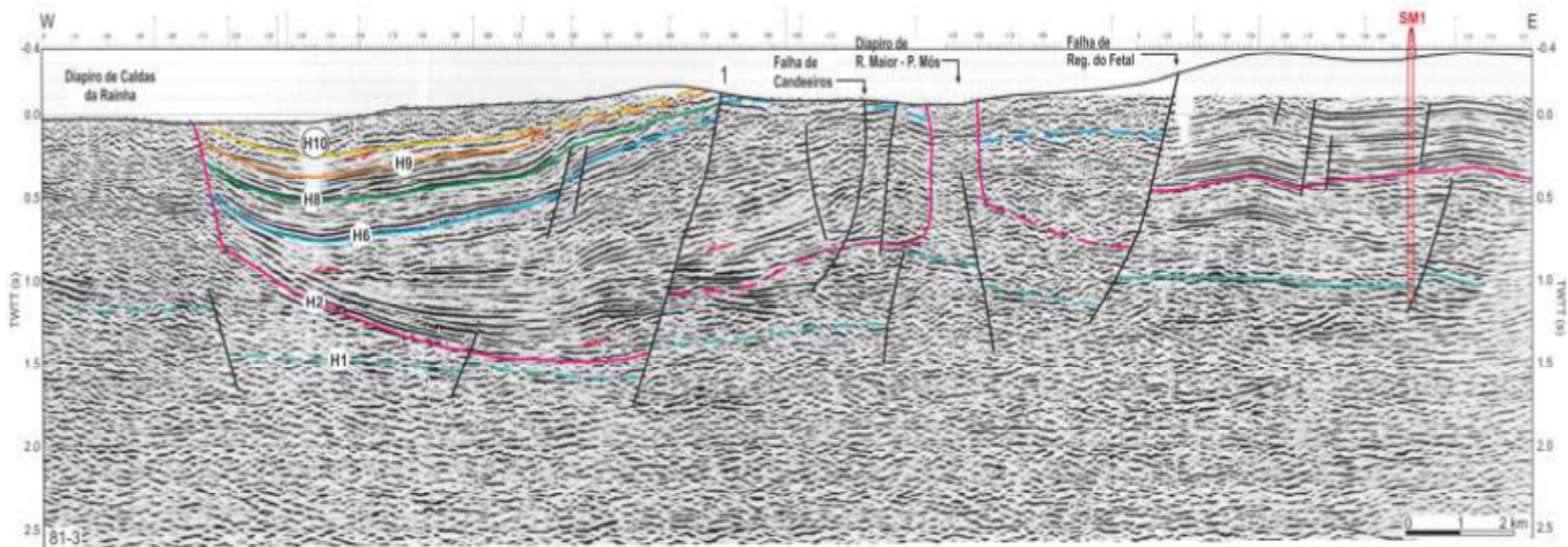


Fig. 5-4 Perfil sísmico e interpretação sismoestratigráfica, com representação da sondagem São Mamede 1 (SM1). H1 a H10: horizontes sísmicos. 1- Falha não reconhecida em superfície. Note-se a posição do diápiro de Rio Maior. Para a relação entre código de cores e estratigrafia, ver Fig.5-5 (Carvalho, 2013).

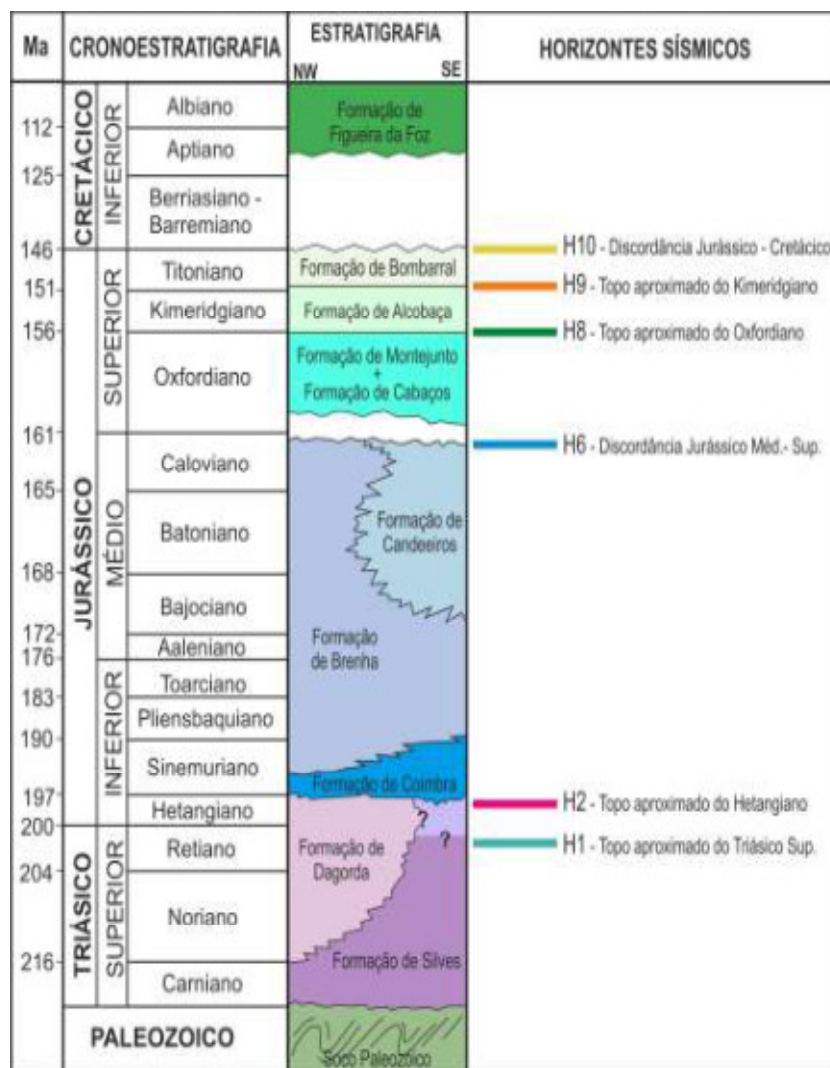


Fig. 5-5 Coluna litoestratigráfica e o código de cores utilizado para a referência dos horizontes sísmicos (litoestratigrafia adaptada de Azerêdo, 1998, DGEG, 2011, e Dinis, 2001) (Fonte: Carvalho, 2013).

5.3.2 Localização potencial de central CAES no diapiro de Rio Maior – Porto de Mós

O potencial local para instalação de uma central CAES encontra-se na extremidade sul do diapiro de Rio Maior - Porto de Mós, junto à cidade de Rio Maior (Fig. 5-6).

Em 1951 realizaram-se duas sondagens na área do diapiro de Rio Maior - Porto de Mós, na zona das salinas da Fonte da Bica, com o objetivo de avaliar a presença do sal-gema. As sondagens foram realizadas junto ao eixo do anticlinal salino, o que possibilitou intersectar este corpo a uma pequena profundidade (Zbyszewski, 1961). Dessas sondagens foram publicados relatórios, que incluem os *logs* litológicos e os resultados de ensaios laboratoriais sobre amostras do sal-gema.

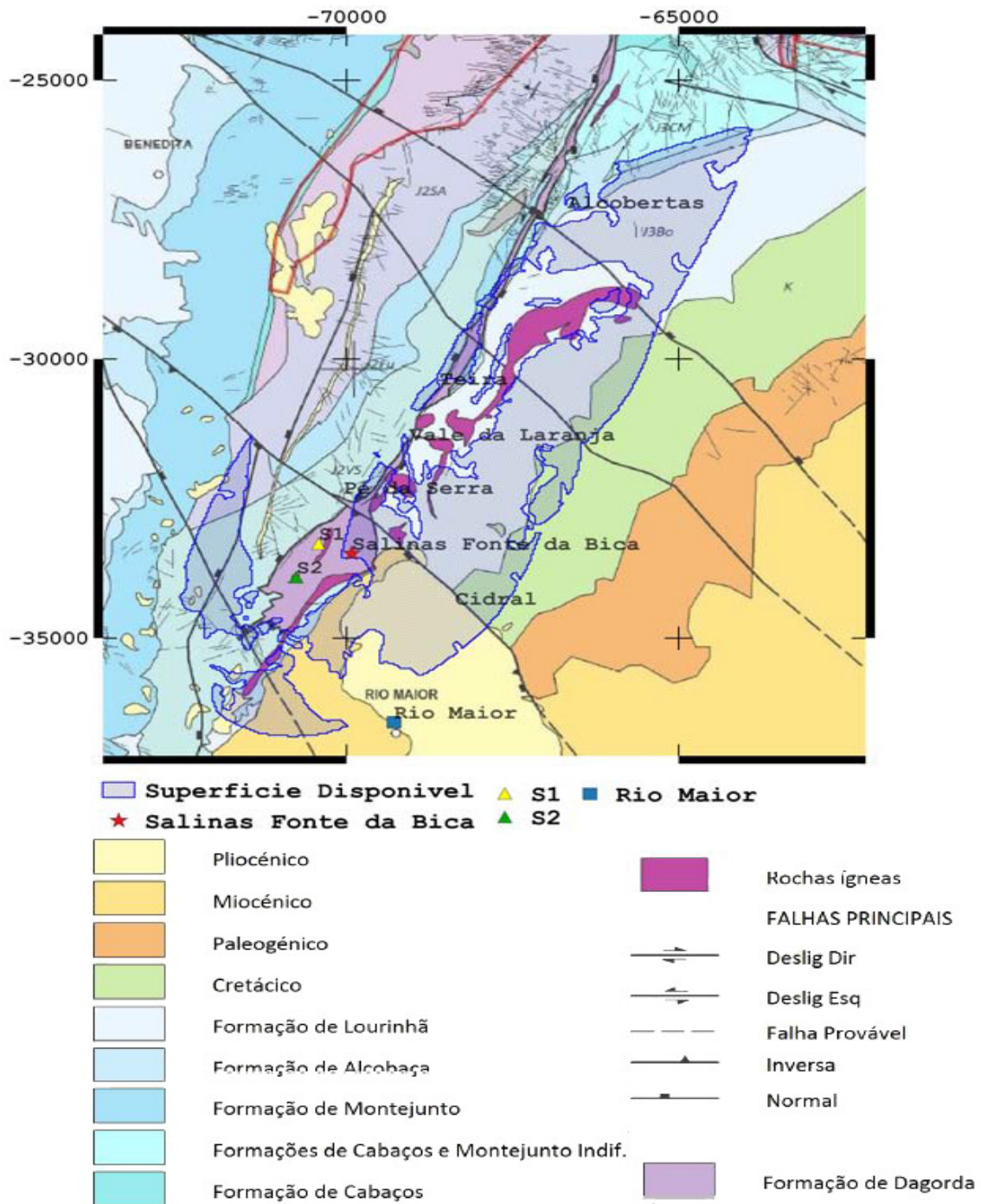


Fig. 5-6 Geologia da zona do diapiro de Rio Maior (Carvalho, 2013 in Cavaco 2013).

Análise das sondagens S1 e S2

Na sondagem S1 (Fig. 5-7) constata-se a existência de um coberto de características margosas até à profundidade de 78,5 m. A partir desta profundidade entra-se no complexo salífero, caracterizado por uma alternância entre sal-gema e brecha salífera, verificando-se esta alternância até à profundidade máxima da sondagem, 352,1 metros.

Na sondagem S2 (Fig. 5-7) o coberto margoso termina a uma profundidade de 69,0 metros, continuando a verificar-se a alternância entre sal-gema e a brecha salífera, por vezes com maior espessura destas unidades. A profundidade máxima da sondagem é de 250,3 metros.

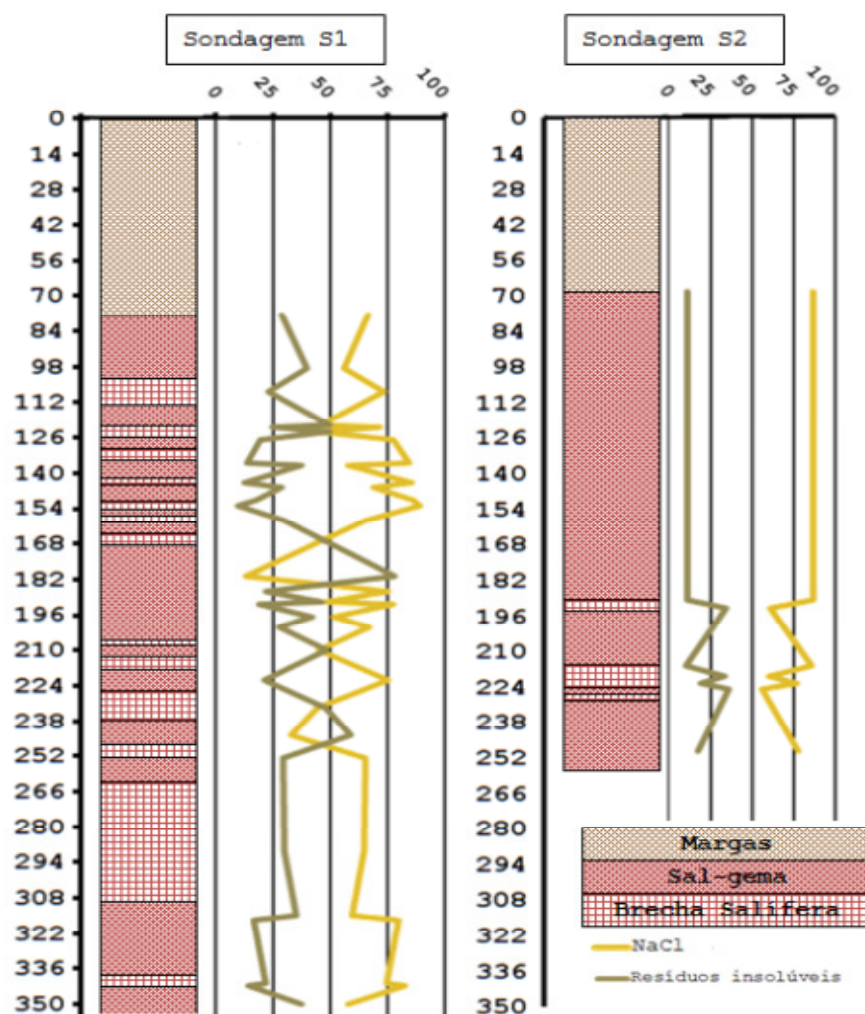


Fig. 5-7 Variação das percentagens de Cloreto de Sódio e de insolúveis ao longo das duas sondagens S1 e S2 (Cavaco, 2013).

Análise química das amostras recolhidas na sondagem S1

Cloreto de Sódio (NaCl)

Na sondagem S1 a percentagem mínima de NaCl observada é de 12,72% na amostra 15 (profundidade 181,90m até 187,65m); a percentagem máxima observada foi de 89,16% na amostra 13 (profundidade 153,9m até 159,20m), correspondendo a uma camada de sal-gema cinzento com laivos róseos e esverdeados (Zbyszewski, 1961). A média da concentração de NaCl nas amostras foi de 61,62%.

Resíduos Insolúveis

Quanto aos resíduos insolúveis, a percentagem mínima é de 9,58% na amostra 13 (profundidade 153,9m até 159,20m), o valor máximo é de 78,51% na amostra 15 (profundidade de 181,90m até 187,65m), correspondendo esta a uma camada de sal com muitas inclusões (Zbyszewski, 1961). A média de resíduos insolúveis é de 33,86%.

Água (humidade)

A percentagem mínima de humidade observada nas amostras é de 0,28% na amostra 12 (profundidade 151,20m até 153,9m), a máxima é de 5,65% na amostra 25 (profundidade 244,8m até 290,0m) e a média de humidade é de 2,89%.

Cloreto de Potássio (KCl)

A percentagem mínima de KCl verificada é de 0,13% na amostra 9 (137,52 m até 144,05 m) e a máxima é de 0,47% na amostra 26 (290,00m até 315,50m), sendo que esta corresponde a uma camada de sal-gema com inclusões de margas e de anidrite (Zbyszewski, 1961).

Cloreto de Cálcio (CaCl₂)

A percentagem mínima de CaCl₂ verificada é de 0,06% na amostra 13 (153,90m até 159,20) e a máxima é de 1,36% na amostra 25 (244,80m até 290,00m), correspondendo a uma camada de brecha salífera (Zbyszewski, 1961).

Sulfato de Cálcio (CaSO₄)

A percentagem mínima de CaSO₄ verificada é de 0,48% na amostra 13 (153,90m até 159,20m) e a máxima é de 2,01% na amostra 17 (191,00m até 192,20m), sendo esta uma brecha salífera. A percentagem máxima observada corresponde à existência de uma maior quantidade de anidrite nesta camada (Zbyszewski, 1961).

A tabela referente aos dados da sondagem S1 constitui o anexo B.

Análise química das amostras recolhidas na sondagem S2

Cloreto de Sódio (NaCl)

A percentagem mínima de NaCl verificada é de 56,66% na amostra 6 (222,50m até 225,00m) e a máxima é de 87,10% na amostra 1 (69,00m até 190,00m), correspondendo esta a uma camada de sal-gema cinzento com inclusões (Zbyszewski, 1961). A percentagem a média de sal-gema na sondagem é de 84,10%.

Resíduos Insolúveis

A percentagem mínima de insolúveis na sondagem S2 é de 10,55% na amostra 3 (193,50m até 216,00m) e a máxima é de 36,07% na amostra 6 (222,50m até 225,00m). A percentagem média de resíduos insolúveis é de 13,48%.

Água (humidade)

A percentagem mínima de humidade verificada é de 0,92% na amostra 1 (69,00m até 190,00m) e a máxima é de 5,97% na amostra 6 (222,50m até 225,00m), correspondendo esta a uma camada de brecha salífera de grandes elementos (Zbyszewski, 1961). A humidade média na sondagem é de 1,59%.

Cloreto de Potássio (KCl)

A percentagem mínima de KCl verificada é de 0,15% na amostra 6 (222,50m até 225,00m) e a máxima é de 0,31% na amostra 7 (225,00m até 250,30m), correspondendo a uma camada de sal róseo com inclusões (Zbyszewski, 1961).

Cloreto de Cálcio (CaCl₂)

A percentagem mínima de CaCl₂ verificada é de 0,19% na amostra 3 (193,50m até 216,10m) e a máxima é de 0,81% na amostra 4 (216,00 até 220,00m), correspondendo a uma camada de brecha salífera (Zbyszewski, 1961).

Sulfato de Cálcio (CaSO₄)

A percentagem mínima de CaSO₄ verificada é de 0,24% na amostra 2 (190,00m até 193,50m) e a máxima é de 0,74% na amostra 4 (216,00m até 220,00m), correspondendo a uma camada de brecha salífera (Zbyszewski, 1961).

A tabela referente aos dados da sondagem S2 constitui o anexo C.

Conclusões referentes às sondagens S1 e S2

O estudo das duas sondagens na zona de Rio Maior – Fonte da Bica permite retirar as seguintes conclusões:

I. Conclusões de ordem geológica

O complexo salífero encontra-se a pequena profundidade, na sondagem S1 a 78,50m e na sondagem 2 a 69,00m.

A camada superficial de características margosas oferece proteção ao complexo salífero, tem uma espessura média de cerca de 75m perto ao eixo do anticlinal, e é constituída maioritariamente por margas com intercalações de calcários dolomíticos distribuídos aleatoriamente ao longo da sua espessura (Zbyszewski, 1961).

O complexo salífero é bastante homogéneo, principalmente na sondagem S2, enquanto na sondagem S1 observa-se a abundante intercalação de brechas salíferas (Zbyszewski, 1961).

Sendo o complexo salífero de características brechóides, de inclinações variáveis mas sempre fortes, a existência de preenchimento de fendas dos calcários envolventes, prova que se trata de um complexo salífero movimentado por tectónica diapirica (Zbyszewski, 1961).

Verifica-se ainda a existência de várias impregnações betuminosas, sobretudo como inclusões margosas no meio do sal (Zbyszewski, 1961).

II. Conclusões de ordem química

Verifica-se a ausência de sais de magnésio, e os sais de potássio não ultrapassam os 0,5%. Quanto ao cloreto de cálcio e ao sulfato de cálcio só têm valores superiores a 1% na sondagem S1 (Zbyszewski, 1961).

Os resíduos insolúveis são essencialmente constituídos por intercalações de margas, argilas e calcários (Zbyszewski, 1961).

A percentagem de resíduos insolúveis é bastante superior na sondagem S1, sendo a média ao longo da sondagem de 33,86% e na sondagem S2 de 13,48%.

A percentagem de cloreto de sódio na sondagem S1 é bastante menor em relação à S2, tendo um valor médio de 61,62%, enquanto na sondagem S2 a média ao longo do complexo salífero é de 84,10%.

Gradiente geotérmico

A temperatura nas formações depende do gradiente geotérmico e da temperatura média anual à superfície da formação.

O gradiente geotérmico representa a taxa de aumento da temperatura com a profundidade, e varia espacialmente devido ao fluxo regional, bem como da condutividade térmica das rochas (Bernardes *et al.* 2011).

Bernardes et al (2011) apresenta mapas de temperatura às profundidades de 800m, 1000m e 1500 que englobam a zona de estudo (anexos D e E).

Considerando as temperaturas médias registadas de 1981 a 2010 na estação climatológica de Santarém obtém-se uma temperatura média à superfície de 17,02°C (IPMA).

Tabela 5-1 Resumo dos dados disponíveis para o cálculo do gradiente geotérmico

Profundidade (m)	Temperatura mínima (Cº)	Temperatura máxima (Cº)
0	17,02	17,02
800	45	50
1000	50	60
1500	70	80

Dado que a área em estudo abrange duas isotérmicas, o gradiente geotérmico pode ser estimado utilizando os dois valores (Fig. 5-8 e Fig. 5-9), mas mantendo a temperatura superficial constante.

O gradiente geotérmico assim estimado situa-se entre 35°C/km e 42,1°C/km.

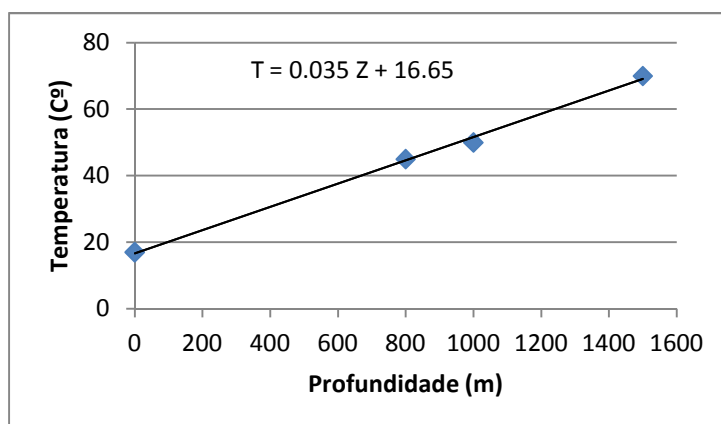


Fig. 5-8 Cálculo do gradiente geotérmico (estremo mais baixo das linhas isotérmicas).

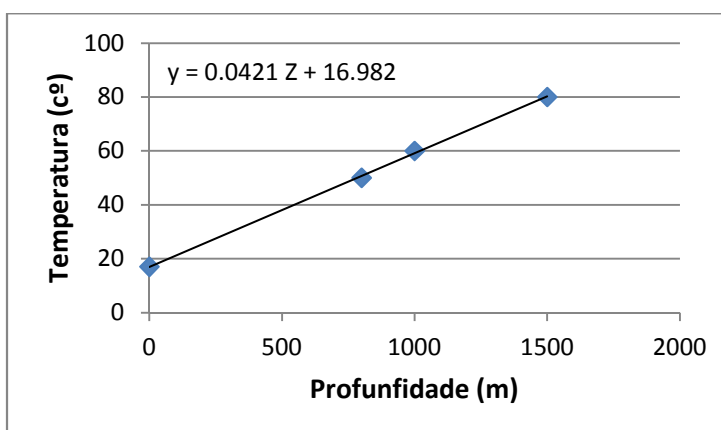


Fig. 5-9 Cálculo do gradiente geotérmico (estremo mais elevado das linhas isotérmicas).

5.3.3 Circulação subterrânea

A aplicação de isótopos estáveis de cloro, permitiu desenvolver um modelo provável para a circulação da água subterrânea (Fig.5-10) junto às salinas de Fonte da Bica em Rio Maior (Eggenkamp *et al.* 2013).

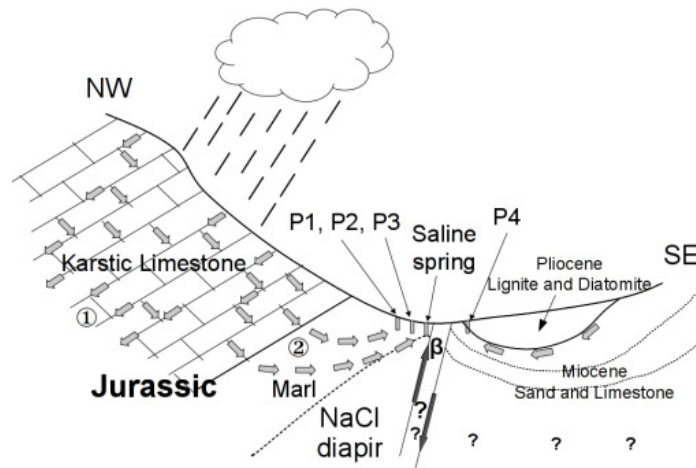


Fig. 5-10 Modelo Hidrológico para as salinas de Fonte da Bica. (P1, 2, 3, 4) Poços de água doce. β Corpo ígneo de basalto (Eggenkamp *et al.* 2013).

A água da chuva infiltra-se nos calcários do Jurássico na Serra dos Candeeiros. A maior parte desta água flui para oeste, representando a recarga das nascentes termais de Caldas da Rainha (Eggenkamp *et al.* 2013).

No entanto, parte desta água move-se através da sequência dos calcários e margas, devido às características impermeáveis das formações mais profundas de sal-gema, induzindo o fluxo de água subterrânea para leste (Eggenkamp *et al.* 2013).

As águas que circulam a maior profundidade (Fig. 5-11) entram em contacto com o sal-gema do diapiro, promovendo a sua dissolução e enriquecendo a concentração em NaCl (Eggenkamp *et al.* 2013).

A água que circula a profundidades menores (Fig. 5-11), acima do diapiro não entra em contacto com a formação de sal-gema, mantendo-se com características de água doce, pois não se misturam devido à diferença de densidades, o que é comprovado pela presença de poços de água doce perto das salinas de Fonte da Bica (Eggenkamp *et al.* 2013).

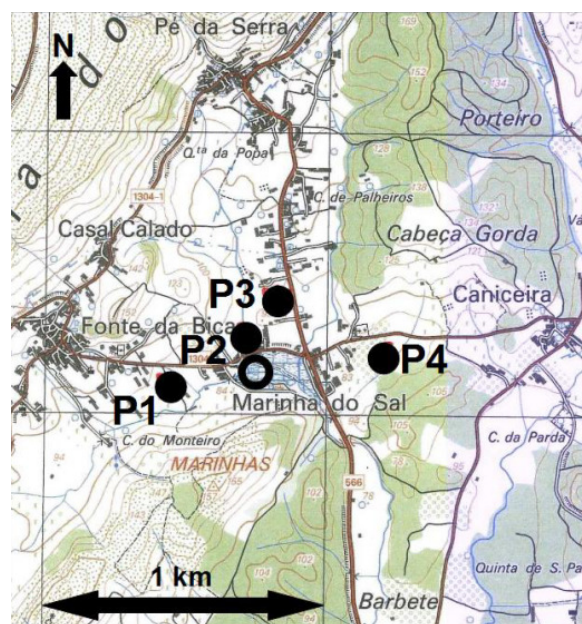


Fig. 5-11 Mapa topográfico com os locais de amostragem do trabalho realizado por Eggenkamp *et al.* 2013. Poços água doce (●) (P1, P2, P3 e P4); Poço de água salina (○). Adaptado do Instituto Geográfico do Exército (2005) (Eggenkamp *et al.* 2013).

A leste da falha de Rio Maior – Porto de Mós as águas circulantes proveem de recarga nas colinas a sudeste das salinas da Fonte da Bica (Eggenkamp *et al.* 2013).

Junto à falha encontra-se um corpo ígneo de basalto (Fig. 5-10) que atua como isolante das águas provenientes de leste, impedindo o contacto com as águas proveniente de oeste da falha, o que é comprovado pela composição dos isótopos de cloro na água (Eggenkamp *et al.* 2013).

6. Critérios para dimensionamento duma caverna em sal para CAES

A heterogeneidade da formação de sal-gema influencia a resistência do sal e condiciona o projeto de construção da caverna em relação à espessura de sal acima da caverna para contenção do ar pressurizado (Allen *et al.* 1982b).

A profundidade da caverna depende das propriedades do sal existente no local e das premissas base definidas para a central CAES à superfície (Allen *et al.* 1982b).

6.1 Condicionamentos geológicos

6.1.1 Impurezas da formação de sal-gema

A existência de importantes concentrações de potássio e de outras impurezas na formação de sal pode condicionar o desenvolvimento de cavernas em algumas formações de sal para operação CAES (Allen *et al.* 1982b).

A presença de camadas insolúveis de anidrite ou de potássio podem provocar anisotropias importantes ao longo do desenvolvimento da caverna. Durante a construção aquelas heterogeneidades podem ruir e colocar em risco a tubagem de recolha da salmoura (Allen *et al.* 1982b).

6.1.2 Instabilidade da rocha de cobertura

As rochas acima da formação de sal podem apresentar zonas altamente permeáveis, que permitem a acumulação de lamas de perfuração (Allen *et al.* 1982b).

As acumulações podem induzir uma rápida corrosão nas tubagens, bem como no complexo margoso que ligam a caverna à superfície (Allen *et al.* 1982b).

A rocha de cobertura pode ser de características cavernosas e a acumulação de lamas pode condicionar a estabilidade a longo prazo da caverna de sal (Allen *et al.* 1982b).

6.1.3 Deformações por deslizamento

Raramente as cavernas entram em colapso devido à pressão das formações envolventes, mas quando se verificam certas condições de pressão e temperatura, e dependendo do tempo, a caverna pode colapsar (Allen *et al.* 1982b).

Nas cavernas para CAES, o ar comprimido no interior permite compensar as tensões laterais a que as estão sujeitas. Durante a despressurização este equilíbrio não é tão forte e pode permitir o fechamento da caverna (Allen *et al.* 1982b).

Para condicionar o fechamento da caverna aponta-se para uma taxa de despressurização de 1 MPa por hora, o que evita a instabilidade da caverna (Allen *et al.* 1982b).

A determinação do estado de tensão da formação de sal, antes da construção, é fundamental, de forma a controlar e a prever o fechamento da caverna e da redução do volume disponível (Allen *et al.* 1982b).

6.1.4 Subsidiência

A construção de uma caverna provoca movimentos e alteração nos campos de tensões da rocha envolvente e conseqüente acréscimo das tensões à superfície, o que pode causar movimentos de subsidiência (Chang e Nair, 1970 in Allen *et al.* 1982b).

A fracturação da rocha na proximidade da caverna não se reveste de grande importância na subsidência da superfície, no entanto, se se verificar a propagação desta fraturação até à superfície existe um claro risco de colapso, na forma de crateras ou de queda de blocos (Lewis, 1974; Allen *et al.* 1982b).

Normalmente, a fracturação não se propaga até à superfície, a menos que a formação de sal no topo da caverna seja corrompida e sofra dissolução. Assim, é importante prever a taxa de subsidência e os fluxos de água antes da criação da caverna (Allen *et al.* 1982b).

6.2 Orientações base para o desenvolvimento da caverna

As especificações seguintes são consideradas apenas como indicativas para a viabilidade de construção de uma caverna para armazenamento de ar comprimido.

6.2.1 Pressão

A profundidade mínima para o topo das cavernas é de 610 metros, o que permite o armazenamento de hidrocarbonetos em cavernas a uma pressão de 12,4 MPa em cavernas de sal (Allen *et al.* 1982b).

Sendo a tecnologia CAES mais exigente, a pressão de 10 MPa parece ser mais adequada para uma profundidade de 610 metros, aquando do ciclo de pressão máxima nas cavernas. Assim, a profundidade do topo das cavernas, nunca deve ser inferior a cerca de 610 metros (Thoms e Martinez 1979 in Allen *et al.* 1982b).

Em resumo, uma pressão de 1 MPa é o admissível por cada 61 m de profundidade (Allen *et al.* 1982b).

6.2.2 Dimensionamento

O dimensionamento de alguns fatores revela-se de grande importância, segundo (Golder Associates 1979 in Allen *et al.* 1982b) estes são:

- Resistência ao cisalhamento octaédrico;
- Tensão horizontal;
- Profundidade das cavernas;
- Distância entre o topo da formação de sal até ao topo das cavernas (d);
- Comprimento máximo do vão das cavernas (s);

6.2.2.1 Resistência ao cisalhamento octaédrico

Alguns trabalhos apresentam diferentes valores para a resistência ao cisalhamento octaédrico, onde se destacam os seguintes valores 3,8 a 5,2 MPa (Serata e Cundey, 1979) 3,45 MPa (King, 1971) e 1,04 MPa (Baar 1970, 1971). Baar (1977) indica, que os valores para a resistência de cisalhamento octaédrico calculado em laboratório não se aplicam em campo (in Allen *et al.* 1982b).

6.2.2.2 Tensão horizontal

Serata e Mcnamara (1980) definem excesso de tensão lateral, como um valor teórico definido pela fórmula $(3K_0/\sqrt{2})$, sendo o K_0 , a resistência ao cisalhamento octaédrico. Para $K_0 = 4,5$ MPa o excesso de tensão lateral é de 9,55 MPa. Porém, a tensão radial limite aumenta rapidamente quando a tensão lateral excede os 90% do seu valor teórico, pelo que o valor admitido para a pressão vertical é de 8,6 MPa (Allen *et al.* 1982b).

Especificações mais conservadoras para a mesma profundidade, restringem a tensão vertical a 83% da pressão horizontal (Allen *et al.* 1982b).

Por exemplo, a uma profundidade de 800 m, a pressão litostática exercida pelas camadas sobrejacentes ao sal-gema seria de 16,96 MPa (considerando uma rocha densa a sobrecarregar o sal), e o valor permitido para a tensão horizontal seria 20,35 MPa. (Allen *et al.* 1982b).

6.2.3 Profundidade da caverna

A profundidade máxima das cavernas deve ser de 1220 metros em circunstâncias normais e nunca deve ser ampliada para lá desta profundidade a não ser que o estado de tensão *in situ* permita (Allen *et al.* 1982b).

A profundidade de 915 m é indicada como o valor mais favorável e conservador para a estabilidade das cavernas, permitindo um armazenamento de ar comprimido a 9,69 MPa em formações não homogêneas e de 15,0 MPa em formações homogêneas, sendo estes valores médios (Allen *et al.* 1982b).

Recomenda-se uma profundidade máxima para a base das cavernas de 1220 metros, o que permite um armazenamento a uma pressão de 12,93 MPa para uma rocha de sal-gema não homogênea e de 20 MPa para uma rocha de sal homogênea (Allen *et al.* 1982b).

6.2.4 Espessuras das paredes de sal

Nos casos em que se considere mais do que uma cavidade construída por dissolução do sal-gema, a razão entre distância (S) e o diâmetro (D) das cavernas deve ser 4 para cavernas que operem à mesma pressão (Allen *et al.* 1982b).

$$\frac{S}{D} \geq 4 \quad (6.1)$$

A distância (S) é medida entre os centros das cavernas.

Recomenda-se que a espessura entre duas cavernas de diâmetros diferentes tenha no mínimo uma razão de 4 com o diâmetro da caverna maior e que essa razão nunca seja inferior a 3 (Allen *et al.* 1982b).

6.2.5 Dimensionamento da espessura de sal acima da caverna e do vão

A razão entre a espessura de sal acima do topo das cavernas (d) e o comprimento do vão da caverna (s) nunca deve ser inferior a 2,5 (Allen *et al.* 1982b).

$$\frac{d}{s} \geq 2,5 \quad (6.2)$$

Recomenda-se que a espessura de sal acima do topo da caverna deva ser pelo menos 150 metros. Este valor é também recomendado como valor mínimo para as paredes laterais das cavernas, e o comprimento (diâmetro) do teto não deve exceder os 60 metros.

A relação entre a espessura de sal acima do topo da caverna e o comprimento do teto da caverna deve ser pelo menos 2,5 (Allen *et al.* 1982b).

6.2.6 Relação altura/diâmetro da caverna

A forma definida para uma caverna de sal desenvolvida por dissolução é uma forma cilíndrica na vertical, pois permite uma melhor utilização do corpo de sal (Allen *et al.* 1982b).

A relação altura (H) e diâmetro (D) foi estudada para valores entre 5 e 20. Verificou-se que o fechamento da caverna a profundidades de 1220m é rápido e pode gerar instabilidades, devido às propriedades visco-plásticas do sal. Assim, Allen *et al.* (1982b) recomenda a seguinte relação entre altura e diâmetro da caverna.

$$\frac{H}{D} \leq 5 \quad (6.3)$$

6.3 Fatores de funcionamento da caverna

6.3.1 Temperatura

A temperatura condiciona fortemente a formação de sal, aumentando o seu comportamento visco plástico, sendo o principal fator de fechamento da caverna.

Como referido no ponto 3.2.3 recomenda-se que a formação onde se insere a caverna de sal não ultrapasse os 80 °C (Allen *et al.* 1982b).

6.3.2 Pressão máxima na caverna

A pressão de ar no interior da caverna depende da profundidade a que se encontra e da pureza da formação de sal. A pressão máxima admitida é de 16,39 kPa por metro de profundidade. Considera-se que este valor é 77% da pressão máxima admitida pela formação confinante constituída por 100% de halite, para um fator de segurança de 23%, que deve ser reforçado com a constatação da redução da pureza da halite (Allen *et al.* 1982b).

Para uma formação não homogénea, a pressão do ar deve ser equivalente a 10,6 kPa por metro de profundidade, isto é, 50% da pressão máxima admissível para uma formação com 100% de halite (Allen *et al.* 1982b).

6.3.3 Taxa de despressurização

A rápida despressurização condiciona a estabilidade da caverna e promove um rápido fechamento da caverna.

Recomenda-se que a despressurização seja lenta e limitada ao máximo de 1 MPa por hora (Allen *et al.* 1982b).

7. Projeto conceptual

A informação geológica e geotécnica sobre a zona de estudo não é de molde a permitir o dimensionamento detalhado da componente de armazenamento geológico de um sistema CAES. Ainda assim, e com o intuito de demonstrar os critérios a utilizar, efetua-se neste capítulo um dimensionamento conceptual que poderá orientar trabalhos posteriores.

O dimensionamento de um projeto de uma caverna pode considerar dois modos de operação: i) pressão constante na caverna; ii) pressão variável na caverna (ver secção 2.6).

O projeto de uma caverna de pressão variável torna o projeto menos exigente a nível da mecânica das rochas e mais simples de realizar (Allen *et al.* 1982b).

O volume de rocha a dissolver também é menor, reduzindo os custos associados. Assim, o projeto de uma caverna de pressão variável deve ser considerado em fases iniciais para comprovar a viabilidade da construção de uma caverna CAES (Allen *et al.* 1982b).

Para o desenvolvimento do projeto considerou-se uma caverna de pressão variável e pressão constante à entrada da turbina, correspondendo ao método usado nas centrais de Huntorf e McIntosh.

Este método consiste na utilização de válvulas para manter o ar de entrada na turbina a uma pressão constante, independentemente da variação da pressão na caverna (Succar & Williams, 2008).

7.1 Profundidade da caverna

Considerando que o valor mais favorável e conservador para a estabilidade da base da caverna é até aos 915 m (ponto 6.2.5), e que o diâmetro máximo admitido é de 60 m, a altura máxima é definida, de acordo com a equação (7.5), como sendo $H=300$ m.

A altura de 300 metros é o valor máximo admitido por uma caverna CAES, admitindo-se assim uma profundidade para o topo da caverna de 615 metros.

Como o conhecimento da formação de sal-gema em estudo se encontra limitado a duas sondagens e como estas são de reduzida profundidade para as necessidades de construção de uma caverna CAES, admite-se que os valores médios de teores de sal e insolúveis constatados em cada sondagem se verificam ao longo da formação.

Assim, conclui-se que o local da sondagem S2 é o ideal para a construção da caverna, dado que apresenta valores médios mais favoráveis (halite de 84,10% e resíduos insolúveis de 13,48%).

Admite-se ainda que a formação neste local é composta apenas por duas formações; um complexo margoso até uma profundidade de 69,0 metros e uma formação de sal-gema dos 69,0 m até a uma profundidade de pelo menos até aos 1500 metros (limite mais que suficiente para a construção da caverna).

7.2 Energia armazenada por unidade de volume

A viabilidade de CAES tem como primeiro objetivo identificar a quantidade de energia elétrica que pode ser armazenada por unidade de volume (E_{gen} / V_s), que pode ser calculada de acordo com a formulação de Succar & Williams (2008).

$$\frac{E_{gen}}{V_s} = \frac{\alpha * M_w * P_{s2}}{R_G * T_{s2}} \left(\beta + 1 - \left(\frac{P_b}{P_2} \right)^{\frac{K_2-1}{K_2}} \right) \left(1 - \left(\frac{P_{s1}}{P_{s2}} \right)^{\frac{1}{K_s}} \right) \quad (7.1)$$

Em que E_{gen} / V_s = energia armazenada por unidade de volume (kwh / m³), M_w = peso molecular do ar (kg/mol), P_{s2} = Pressão máxima de armazenamento (MPa), R_G = constante universal dos gases ideais (KJ / K), T_{s2} = temperatura no interior da caverna (K), P_b = pressão atmosférica (MPa), P_2 = pressão na entrada da turbina (MPa), K_2 = razão entre capacidade calorífica na turbina LP, P_{s1} = Pressão mínima de armazenamento (MPa), K_s = Razão entre capacidade calorífica no armazenamento.

$$\alpha = \eta_M \eta_G C_{p2} T_2 \left(1 + \frac{m_F}{m_A} \right) \quad (7.2)$$

em que η_M = eficiência mecânica da turbina (%), η_G = eficiência do gerador elétrico (%), C_{p2} = calor específico do ar à pressão P_2 (KJ / kgK), T_2 temperatura da turbina LP (K), m_F / m_G = razão entre o fluxo de *fuel* e ar na turbina.

$$\beta = \frac{C_{p1} T_1}{C_{p2} T_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_1-1}{k_1}} \right] \quad (7.3)$$

em que C_{p1} = calor específico do ar à pressão P_1 (KJ / kgK), T_1 = temperatura da turbina HP (K), P_1 = pressão na entrada da turbina HP (MPa), C_{p2} = calor específico do ar à pressão P_2 (KJ / kgK), T_2 = temperatura da turbina LP (K), P_2 = pressão na entrada da turbina LP (MPa), K_1 = razão entre capacidade calorífica na turbina HP.

7.2.1 Pressão litostática

As duas sondagens (S1 e S2) realizadas no local de estudo demonstram a existência de um complexo margoso a cobrir a formação de sal. Considerou-se que o complexo margoso possui uma densidade média $\rho_{margas} = 2550 \text{ kg/m}^3$ (valor médio de densidade das margas) e a formação de sal seria constituída por 100% de halite de densidade $\rho_{halite} = 2160 \text{ kg/m}^3$, de forma a facilitar os cálculos. Os valores de densidade estão de acordo com Deer *et al.* 1992.

A pressão litostática pode se estimada como:

$$P = g (\sum_i \rho_i * H_i) \quad (7.4)$$

Em que P = Pressão litostática (Pa), g = Aceleração da gravidade (9,8 m / s²). H =espessura da camada ($H_{margas}=69\text{m}$; $H_{sal-gema}=546 \text{ m}$), e ρ = densidade da camada, e i se refere aos diferentes materiais que compõem a sequência estratigráfica.

A aplicação desta equação permite calcular uma pressão litoestática de 13,3 MPa a uma profundidade de 615 metros.

7.2.2 Pressão mínima de armazenamento (P_{s1})

O valor de pressão mínima representa o valor mínimo para manter a convergência da caverna dentro dos limites aceitáveis de estabilidade (ERSE, 2008).

Os critérios definidos para o cálculo da pressão mínima são referentes ao armazenamento de gás natural em cavernas de sal definidos por Costa & Amaral, 2008 (in Costa, 2013). A pressão mínima deve ser entre 30% a 50% da pressão litoestática no topo da caverna. Admitido o valor de médio 35%, obtêm-se $P_{s1} = 4,66 \text{ MPa}$.

A utilização de valor de 50% da pressão litostática para P_{s1} inviabilizaria o armazenamento, pois o valor de pressão máxima tem em consideração um importante fator de segurança devido à formação de sal não ser homogênea.

7.2.3 Pressão máxima de armazenamento (P_{s2})

Nas sondagens S1 e S2 referidas anteriormente a percentagem de resíduos insolúveis é de 33,86% e de 13,48% respetivamente, o que demonstra que o sal-gema não é homogêneo.

De acordo com o definido no ponto 6.3.2, a pressão máxima na caverna para formações de sal não homogêneo é de 10,6 kPa por metro. Como a profundidade do topo da caverna é de 615 metros, temos que $P_{s2} = 6,5$ MPa.

7.2.4 Temperatura no interior da caverna (T_{s2})

Considerando os dois valores de gradiente geotérmico, definidos anteriormente, 35,00 e 42,10°C/Km, e a profundidade média da caverna pode-se estimar a temperatura no interior da caverna em regime estacionário, de acordo com a seguinte fórmula:

$$T_{s2} = H_m * \delta_g + T_s \quad (7.5)$$

em que T = temperatura no interior da caverna (°C), H_m = profundidade média da caverna (m), δ_g = gradiente geotérmico (°C/m), T_s = temperatura média à superfície (17,02 °C).

Considerando o topo da caverna definido a 615 m e o valor máximo para a altura da caverna de 300 m, obtém-se $H_m=765$ m. Se adotarmos o gradiente geotérmico médio $\delta_g = 0,0386$ °C/m, obtemos por aplicação da equação 7.3 um valor $T_{s2} = 46,55$ °C ou $T_{s2} = 319,7$ K.

7.2.5 Eficiência conjunta da turbina e do gerador ($\eta_M \eta_G$)

O equipamento usado para a ponderação deste valor é da marca SMARTCAES, que define a eficiência conjunta da turbina e do gerador em 83% (Dresser-Rand. 2010).

7.2.6 Constantes e dados das turbinas

As restantes constantes e parâmetros requeridos para utilização na equação 7.1 referem-se aos dados das turbinas ou a características termodinâmicas do ar (que se assumiu como um gás diatómico, com razão entre capacidades caloríficas equivalentes a 1,4). Estes dados estão indicados nas tabelas 7-1 a 7.3.

Tabela 7-1 Constantes inerentes ao cálculo

Constantes	Símbolo	Unidades	Valor
Pressão atmosférica	P_b	MPa	0,1013
Peso molecular do ar	M_w	Kg / mol	0,02897
Constante universal dos gases ideais	R_g	KJ / K	0,008314
Razão entre capacidade calorífica na turbina HP	K_1	-	1,4
Razão entre capacidade calorífica na turbina LP	K_2	-	1,4
Razão entre capacidade calorífica no armazenamento	K_s	-	1,4

Tabela 7-2 Valores referentes às turbinas (consideram-se equivalentes às da central de Huntorf).

Turbinas	Parâmetros	Símbolos	Unidades	Valor
Turbina de Baixa Pressão (LP)	Temperatura na turbina	T_2	K	1098
	Pressão na entrada da turbina	P_2	MPa	1,1
	Calor específico do ar à pressão P2	C_{p2}	KJ / (kgK)	1,160076
	Razão entre fluxo de <i>fuel</i> e ar na turbina	M_f / M_a	-	0,018
Turbina de Alta Pressão (HP)	Temperatura na turbina	T_1	K	823
	Pressão na entrada da turbina	P_1	MPa	4,6
	Calor específico do ar à pressão P1	C_{p1}	KJ / (kgK)	1,1108679

Tabela 7-3 Parâmetros

Parâmetros	Símbolos	Unidades	Valor
Alfa	α	kJ / Kg	1058,2417
Beta	β	-	0,4285

Após definição e estabelecimento de todos os parâmetros é então possível estimar a energia armazenada por unidade de volume por substituição dos valores na equação 7.1, estimando-se que $E_{gen}/V_s = 4,10 \text{ kWh/m}^3$.

7.3 Volume da caverna

O volume da caverna necessária para obter uma determinada potência armazenada é dado por:

$$V_c = \frac{P \cdot t}{(E_{gen}/V_s)} \quad (7.6)$$

em que V_c = Volume da caverna (m^3); t = tempo (em horas) de produção; P = Potência da central (KW), E_{gen} / V_s = Energia armazenada por unidade de volume (KWh/m^3).

7.3.1 Tempo de produção da Central CAES

Como referido anteriormente, o objetivo da tecnologia CAES é equilibrar a produção de energia eólica.

A Fig. 7-1 ilustra o dia de maior procura de energia em 2012. Verifica-se uma forte quebra na contribuição de energia eólica das 7 até às 17 horas, recuperando até às 22 horas. O fosso de produção situa-se entre as 7 horas e 22 horas, o que totaliza 15 horas.

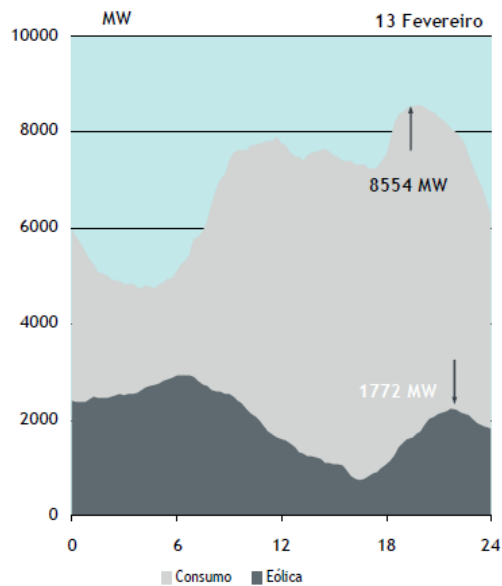


Fig. 7-1 Consumo de energia no dia 13 de Fevereiro de 2012 (REN. 2013)

A Fig. 7-2, mostra a produção média de energia eólica ao longo do dia, verificando-se um fosso da produção abaixo dos 30% das 8 às 24 horas, ou seja, um período de 16 horas.

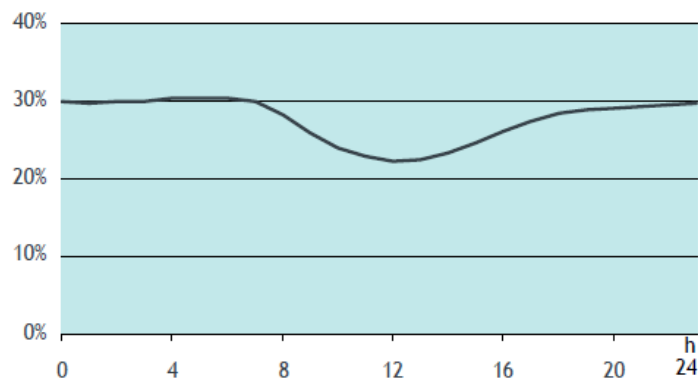


Fig. 7-2 Produção média de energia eólica ao longo do dia em 2012 (REN.2013).

Ambos os gráficos indicam que a redução da contribuição da energia eólica ocorre no tradicional período de trabalho das empresas e dos serviços, ou seja quando há maior consumo de energia elétrica.

A média da duração destas quebras de produção é de cerca de 15,5 horas.

No gráfico da Fig. 7-2, às 18 horas o valor de produção encontra-se já perto dos 30%. Assim, o período de maior quebra de produção é das 8 às 18 horas o que totaliza 10 horas.

O valor médio entre os intervalos de 10 e 15,5 h será o valor ideal para a produção da central CAES. Assim admite-se que o tempo de produção (ou descarga) de energia para a central é de $t = 12$ horas.

Potência da central CAES

Dada à proximidade do parque eólico da Serra dos Candeeiros, o ideal será aliar esta central CAES ao parque eólico, permitindo a gestão da produção da energia.

Como o parque eólico conta com uma potência máxima instalada de 111MW a central deve ter um valor similar de potência, ou seja, $P=111$ MW.

A substituição dos parâmetros relevantes na equação 7.4 permite estabelecer que é necessária uma caverna com um volume efetivo de $V_c = 321951$ m³.

Uma vez que os insolúveis existentes no sal-gema irão diminuir o volume efetivo disponível para armazenamento, o volume da caverna a construir deverá ser superior a V_c .

Dado que o volume de insolúveis na sondagem S2 é de 13,48%, admitindo que este teor se mantém constante em profundidade, então o volume total da caverna deve ser $V_t = 43399 + V_c$ m³. Logo o volume total da caverna deve ser $V_t = 365350$ m³.

7.4 Geometria da caverna

Tendo em consideração o cálculo do volume total, é suficiente a utilização de uma única caverna, pois são garantidos todos os fatores de estabilidade. Assim, basta ter em consideração a relação altura / diâmetro ≤ 5 .

Sendo o $V_t = 365350$ m³ e o raio 30 metros, para uma caverna de forma cilíndrica a área da base do caverna (cilindro) é $A_b = 2826$ m² e a altura da caverna volume de V_t corresponderá à altura do cilindro e será de $h = 129,3$ m. A relação entre altura e diâmetro será de 2,16, respeitando o critério $h / D \leq 5$.

A figura 7-3 ilustra a geometria da caverna. A caverna foi definida como um cilindro na vertical com diâmetro de 60 m e altura de 129,3 m, entre as profundidades de 615 m e 744,3 m.

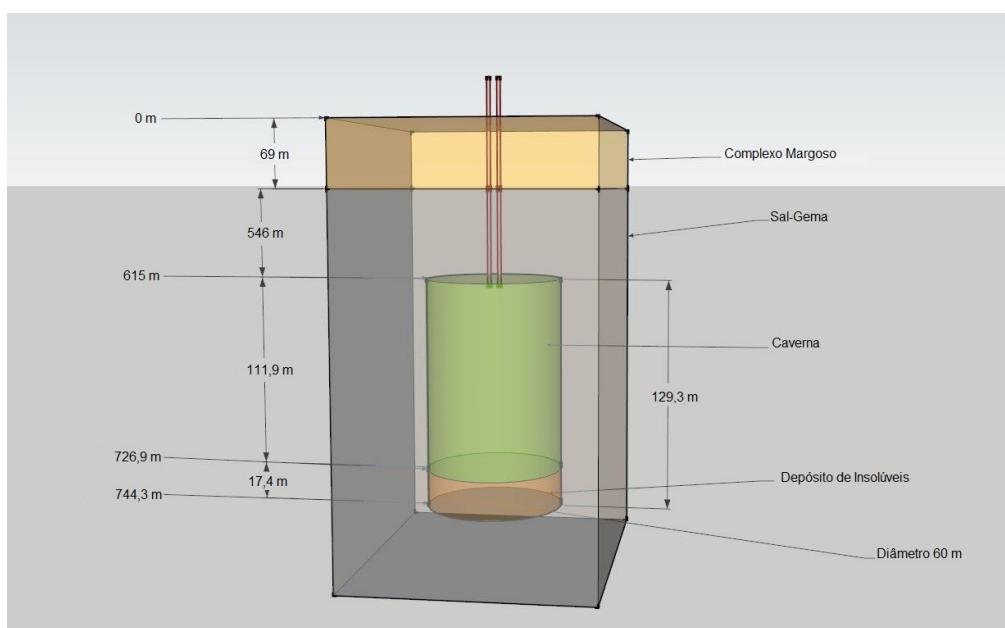


Fig. 7-3 Esquema representativo da caverna definida no maciço.

7.5 Volume de água necessário para a dissolução

Como descrito anteriormente (ponto 4.2.2) o volume expectável de água a usar para construir a caverna é cerca de 8 vezes o volume total da caverna. Assim, o volume de água necessário é de $V_{\text{água}} = 2922800$ m³.

Este será também o volume expectável de salmoura a tratar ou a rejeitar.

7.6 Observações

O projeto baseia-se na geometria de um cilindro perfeito na vertical, o que seria de grande dificuldade de ser desenvolvido pelo método de dissolução. Assim sendo, esta geometria de caverna é apenas teórica.

No cálculo da temperatura no interior da caverna, considerou-se o valor médio de 765 m de profundidade, e a profundidade máxima da caverna projetada é de 744.3 m, logo existe um erro inerente ao cálculo do volume por esta razão.

A redução da temperatura favorece a energia armazenada por unidade de volume, logo o volume real necessário da caverna é menor que o calculado, considerando os mesmos valores de pressão máxima e mínima e alterando o valor da temperatura no interior da caverna.

Considerando o valor médio da altura da caverna projetada (679,65 metros), obtém-se uma temperatura de 316,4 K e conseqüentemente o seguinte valor para a energia armazenada por unidade de volume de $E_{gen} / V_s = 4,14 \text{ kWh /m}^3$.

Obtendo-se assim o seguinte valor para o volume total.

$$V_t = 361821m^3$$

Este valor indica que o volume total seria 1 % menor que o definido no projeto caverna para CAES.

8. Programa de prospeção

O programa de prospeção é definido por diferentes graus de detalhe, combinando métodos indiretos de geofísica e métodos diretos de perfuração, permitindo a melhor caracterização possível para o desenvolvimento da caverna (Allen *et al.* 1982b).

8.1 Triagem inicial

Quando definida a área possível para a construção da caverna em sal, deve-se proceder à compilação da totalidade da informação disponível referente aos aspetos geológicos, tectónicos, topográficos, hidrológicos e sismológicos, de forma a comprovar a possível viabilidade da construção (Portaria n.º 181/2012).

Comprovada a viabilidade teórica, deve-se verificar e avaliar os efeitos das atividades extrativas (extração de salmoura e outras) existentes na camada de proteção da formação de sal e do domo salino, de forma a avaliar a movimentos de subsidência e caso tenha existido, comprovar a interrupção destes movimentos (Allen *et al.* 1982b).

Deve ser ainda efetuado um estudo rigoroso contendo todos os registos históricos e entrevistas a moradores locais, para a determinação atual do estado de utilização da camada de proteção do sal e do domo salino (Allen *et al.* 1982b).

8.1.1 Informação disponível

Estrutura

Como indicado anteriormente, o complexo salino apresenta-se com características brechóides, com inclinações variáveis mas sempre fortes, preenchimento de fraturas dos calcários e a existência de margas de sal secundário, o que prova que este foi movimentado por tectónica diapirica (Zbyszewski, 1961b).

8.2 Métodos geofísicos

A prospeção sísmica, quer de refração, quer de reflexão, têm demonstrado bons resultados na localização e na delimitação dos domos salinos (Billings 1972 in Allen *et al.* 1982b).

No entanto, os métodos gravimétricos também demonstraram sucesso na deteção de formações de sal, normalmente associadas a anomalias gravíticas negativas, induzidas pela baixa densidade do sal em relação às formações adjacentes (Allen *et al.* 1982b).

A aplicação de métodos de resistividade elétrica justifica-se pelo facto dos domos salinos apresentarem uma resistividade elevada devido à reduzida presença de água subterrânea. No entanto, este método pode indicar baixas resistividades devido à existência de formações superiores com características de baixa resistividade (Allen *et al.* 1982b).

Para o mapeamento tridimensional dum corpo de sal a sísmica é o melhor método, pois os estratos superiores e envolventes podem ser mapeados por reflexão, enquanto os limites estruturais mais profundos e mais inclinados da formação devem ser mapeados por refração e também por reflexão (Allen *et al.* 1982b).

8.2.1 Planeamento do uso dos métodos geofísicos

Os métodos geofísicos propõem-se a obter informação de forma a responder às seguintes questões:

- Onde se encontram os limites do domo salino?

- Qual a estrutura do topo da formação de sal?
- Como se distribui a formação salina em profundidade?
- Quais as zonas mais e menos favoráveis ao desenvolvimento da caverna (percentagem de halite na formação)?
- Onde se encontram localizados os corpos ígneos e quais as suas geometrias?

A aplicação de métodos de resistividade elétrica é descartada devido à existência provada de aquíferos de água e de água salgada no caso da Fonte da Bica,

Assim, no plano de prospeção é considerada a aplicação conjunta de três métodos: a gravimetria, magnetometria e a sísmica.

c) Gravimetria

A determinação do campo gravitacional depende de fatores como a latitude, elevação, topografia, marés e as variações de densidade abaixo da superfície (Marin, 2006).

No caso em estudo a exploração dos dados referentes à variação da densidade pode permitir determinar a existência da formação de sal e os seus limites, com anomalias negativas e positivas para os corpos ígneos (basaltos) e um valor base nos calcários envolventes.

Este método só é viável quando conjugado com outros métodos geofísicos e com o conhecimento geológico prévio da área (Marin, 2006).

d) Magnetometria

A prospeção magnética permite definir pequenas modificações na intensidade do campo magnético terrestre e determinar a distribuição arbitrária de corpos rochosos magnetizados em profundidade (Marin, 2006).

Os mapas magnéticos referentes ao local de estudo, quando avaliados podem fornecer informações sobre a espessura de sedimentos ou camadas e determinar os locais dos corpos ígneos, dado que estes são constituídos por basaltos.

Um segundo campo de avaliação refere-se à identificação de depósitos de argila em zonas específicas no maciço de sal (Allen *et al.* 1982b). Os minerais de argila apresentam na sua constituição ferro o que induz o magnetismo, sendo a esmectite e a montmorilonite os minerais de argila com maior teor em ferro (Sampaio, 2006).

A magnetometria pode induzir interpretações ambíguas, sendo aconselhado o uso complementar de outros métodos de prospeção (Marin, 2006).

e) Sísmica

A avaliação sísmica consiste na emissão de ondas sísmicas de origem artificial em profundidade no maciço, sendo captado os ecos (por geofones ou hidrofones) depois de percorrerem certas distâncias no interior do maciço, sendo estas refletidas ou refratadas em discontinuidades (Marin, 2006).

A velocidade de propagação das ondas sísmicas depende das propriedades das rochas particularmente das ondas P (ondas longitudinais) sendo estas as mais rápidas e as primeiras a serem registadas. A velocidade de propagação das ondas sísmicas depende das densidades e das propriedades elásticas das rochas (Sharma, 1997).

Na sismica de refração, a informação obtida é geralmente de grandes áreas, produzindo informação pouco detalhada das zonas abaixo da superfície, enquanto na sismica de reflexão é considerado o comportamento das ondas sísmicas depois de penetrarem no maciço e de as ondas serem refletidas nas descontinuidades onde existem mudanças nas propriedades físicas das rochas (Marin, 2006).

Os métodos sísmicos aplicados ao local em estudo permitiriam antever a estrutura das formações e as descontinuidades desde que se verifique uma importante alteração na velocidade das ondas sísmicas, definindo possíveis estruturas contínuas como camadas, falhas e corpos ígneos (Santos, 2013).

A sismica 3D consiste num levantamento sísmico em linhas paralelas (sismica 2D) afastadas a mesma distância entre si, permitindo uma melhor avaliação da área em estudo (Marin, 2006).

8.3 Perfuração

A zona acima da formação de sal deve ser estudada para que os aquíferos livres e confinados, que envolvem a formação sejam isolados de todos os poços e furos (Allen *et al.* 1982b).

O programa de perfuração tem como objetivo averiguar os seguintes pontos.

- 1- Confirmar a existência da estrutura de sal definida pelos métodos geofísicos.
- 2- Avaliar a rocha de cobertura, quanto à constituição mineralógica, porosidade e permeabilidade, aderência desta à formação de sal e a existência de substâncias corrosivas.
- 3- Avaliar a formação de sal, quanto à constituição mineralógica, tamanho do cristal e o contacto deste, definir zonas de menor qualidade e/ou tendências, determinação de propriedades mecânicas.
- 4- Execução de diagrfias;
- 5- Medição do estado de tensão *in situ*

A perfuração inclinada pode ser usada para melhor definir os limites laterais do domo salino.

Estes limites ainda podem ser mapeados recorrendo a uma fonte sonora no interior dum furo e com os geofones, medir o tempo de viagem das ondas sísmicas do furo para o limite e vice-versa (Allen *et al.* 1982b).

8.3.1 Planeamento da campanha de perfuração

O planeamento da campanha de prospeção de perfuração deve ser fundamentada por dados resultantes da prospeção geofísica e pelos fatores definidos para a construção de uma caverna CAES.

A área projetada para a superfície do domo salino necessário para a construção da caverna é estimada em cerca de 101736 m². Este valor resulta da consideração do valor máximo do raio da caverna (30 metros) e do valor mínimo de sal-gema a envolver a caverna, cerca de 150 metros.

Assim, áreas de estudo de secção circular com áreas inferiores a 0,1 km², não devem ser consideradas no programa de perfuração pois estas não apresentam viabilidade para um projeto CAES.

Os dados resultantes da geofísica devem permitir selecionar as áreas onde se deve desenvolver uma campanha de perfuração. Esses dados devem permitir excluir as zonas do domo que não apresentem as profundidades e as espessuras definidas para a construção da caverna. Devem permitir também a exclusão de zonas onde apareçam corpos ígneos, e inferir, se possível, as zonas de melhor qualidade (80 a 90 % de halite) e as zonas de menor qualidade (zonas com argilas, outros tipos de sais e restos de calcários resultantes da instalação do domo).

O cruzamento da informação permitirá definir as áreas do domo onde se verifica as áreas superiores a 101736 m², com as profundidades e espessuras exigidas e onde se verifica o sal-gema de melhor qualidade.

Definição da campanha de perfuração

Na prospeção sistemática as sondagens são distribuídas segundo linhas paralelas entrecruzadas formando malhas regulares (Fig. 8-1). Estas malhas são definidas de forma a adequem--se ao corpo geológico a estudar (Catarino, 2009).

O uso deste tipo de malha tem como objetivo potenciar um estudo minucioso da área, onde geralmente o conhecimento já é bastante forte, que permite afirmar que existe um corpo mineral com as características pretendidas, o que justifica a aplicação deste método que é bastante dispendioso (Neto & Rocha, 2010).

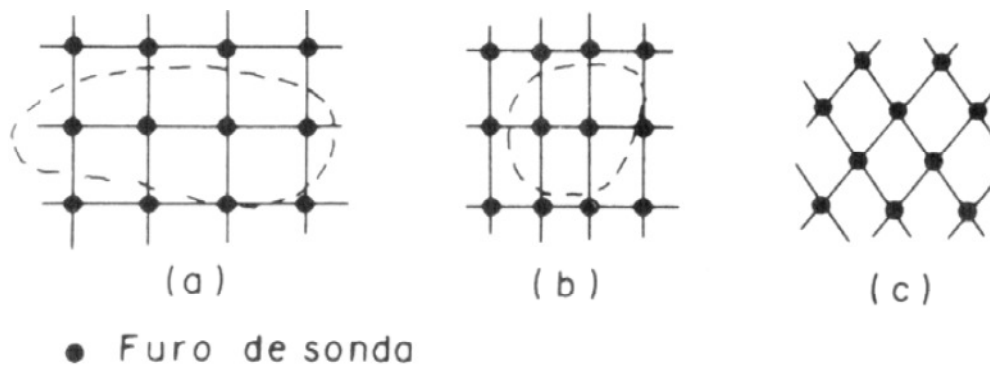


Fig. 8-1 Malhas regulares de sondagem: (a) quadrada; (b) retangular; (c) romboédrica (Catarino, 2009).

A densidade das malhas depende da formação e da sua homogeneidade e da fase de prospeção (Catarino, 2009).

A densidade de malha (A_i) considera a área em estudo (A) com o número de sondagens a realizar (n) expressa pela seguinte fórmula (Maranhão, 1985 in Catarino, 2009).

$$A_i = \frac{A}{n} \quad (8.1)$$

O tipo de sondagem que melhor se adequa a este projeto é a sondagem à rotação mecânica, pois permite a recolha de testemunhos contínuos para o estudo petrográfico (Fig. 8-2) (textura estrutura, mineralogia e etc.) e permite perfurações superiores a 100m (Neto & Rocha, 2010).

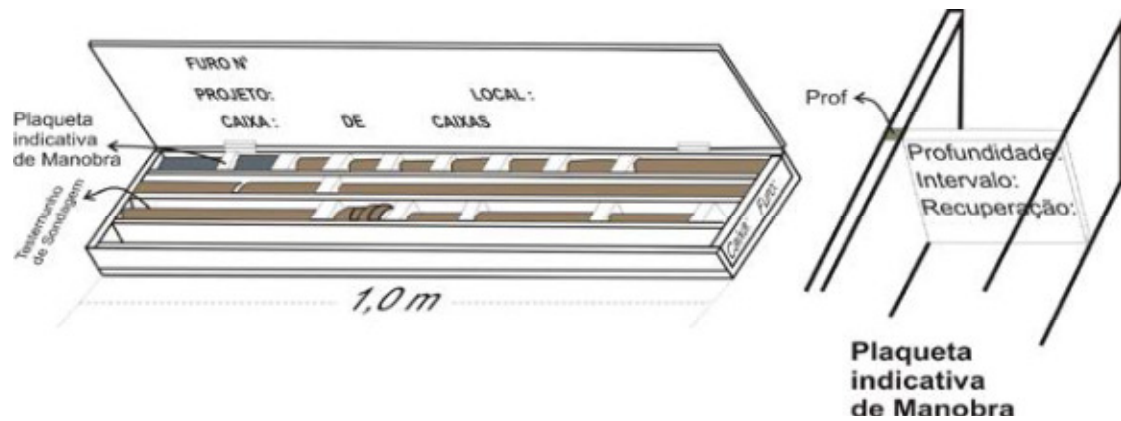


Fig. 8-2 Caixa de sondagem para acondicionar os testemunhos recolhidos (Neto & Rocha, 2010).

Diagrafias

As diagrafias geofísicas representam um registo contínuo de vários parâmetros geofísicos ao longo de um furo de sondagem, com aquisição dos dados por instrumentos instalados num cabo ou acoplados à coluna de perfuração, (Lima, 2012).

As diagrafias registam várias propriedades radioativas, elétricas e acústicas, em função da profundidade e das características de cada litologia.

Os perfis de furo de sondagem resultantes fornecem informações diretas e indiretas de várias propriedades da formação, como a porosidade, permeabilidade, litologia etc., e caracterizam-se por apresentarem elevada resolução vertical (Lima, 2012).

Os principais perfis geofísicos são os da temperatura, densidade neutrões, radiométricos, resistividade elétrica, indução eletromagnética, acústica e de potencial espontâneo (Lima, 2012).

8.4 Caracterização da rocha de sal

O procedimento definido por Allen *et al.* 1982b prevê que a caracterização da rocha de sal englobe os seguintes testes:

- 1- Análise microscópica (óptica e eletrónica).
- 2- Difração de raio X.
- 3- Espectrometria de raio X.
- 4- Análises químicas.
- 5- Avaliação de propriedades físicas e mecânicas.
- 6- Identificação de minerais acessórios.
- 7- Análise de diferencial térmico.

A caracterização da rocha também deve ser realizada *in situ*, dando-se o principal foco à caracterização mecânica da rocha, em particular ao tamanho do cristal e sua localização na formação (Allen *et al.* 1982b).

A investigação laboratorial tem como objetivo caracterizar a rocha a nível mecânico, sendo esta uma componente muito importante para o dimensionamento da caverna de armazenamento de ar comprimido (Bary *et al.* 2002).

Os cálculos teóricos determinam se a formação salina pode acondicionar uma caverna, e dependem do conhecimento da estrutura e da resistência do sal (Fig. 8-3 e Fig. 8-4), que ajuda a confirmar a localização ideal para acondicionar a caverna, bem como a distância entre cavernas e a pressão de funcionamento de forma a garantir a estabilidade da caverna (Bary *et al.* 2002).

A composição mineralógica e a textura do sal pode afetar o processo de dissolução e deve ser bem caracterizada para otimizar o processo de dissolução (Bary *et al.* 2002).

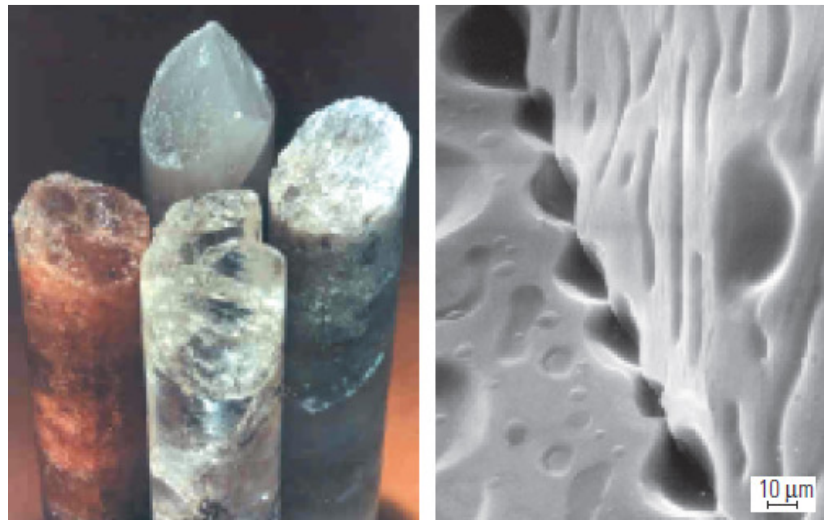


Fig. 8-3 Núcleos salinos (esquerda) e microfotografia (direita) para os estudos de dissolução (Bary *et al.* 2002).



Fig. 8-4 Resultados de laboratório realizados para determinar a resistência e a propriedades de deformação do nucleos salinos . Os nucleos da frente mostram deformação plastica e os de atrás mostratram deformação fragil (fraturas) (Bary *et al.* 2002).

8.5 Custos de prospeção

Os custos inerentes à prospeção são referentes às fases de triagem inicial, prospeção geofísica, perfuração e trabalho de laboratório.

Os custos da triagem inicial estão associados a contratação de uma equipa de técnicos especializados, aquisição de documentos e de equipamento para a realização do trabalho que prove a viabilidade do local para avançar para a fase seguinte.

A fase de prospeção geofísica também tem custos associados às técnicas que são consideradas para este levantamento da área em estudo (anexo Fig. 11-4) (neste caso gravimetria, magnetometria e sísmica) e na interpretação dos dados.

Tabela 8-1 Custos das técnicas geofísicas

Método geofísico	Custos	Área em estudo (Km ²)	Custo final (da área) Em euros
Gravimetria	60.000 € / km ²	4,471	268.260
Magnetometria	96.000 € / km ²		429.216
Sísmica de reflexão	28.000 € / km ²		125.188

O custo total (técnicas geofísicas) = 822.664 (€).

O custo da campanha de perfuração depende do número de furos e das profundidades dos furos.

Neste caso, em que as profundidades espectáveis dos furos de sondagem são elevadas, não se justifica o uso de malhas, devido ao número elevado de furos, o que acarretaria custos inoportáveis à campanha de perfuração.

No entanto, o uso de malhas para o estudo do complexo margoso pode-se justificar, caso exista a necessidade de um estudo minucioso do complexo margoso, dado que a espessura é reduzida.

Admitindo que o estudo resultante dos métodos geofísicos definiu uma área com cerca de 500 metros de lado, definiu-se para o estudo 3 furos com 800 metros de profundidade, distribuídos de uma forma triangular, para permitir uma extrapolação espacial da formação em estudo e que permite conter os custos.

Tabela 8-2 Custos associados à perfuração

	Objetivos	Preço tabelado (€)	Número de metros a furar	Preço final (€)
	Estaleiro, engenharia civil, transformação do local etc.	500.000	2400	500.000
	Perfuração (Mobilização, perfuração, combustível)	2.000/m		4,8 M
Serviços de apoio	Supervisão logística	150.000		150.000
	Supervisão Técnica (bits de broca, cabeça de poço, caixa, operações de cimentação)	480/m		1,15 M
	Lamas de perfuração	120/m		288.000
	Instrumentos de pesca	40/m		96000
	Medição / Logging durante a perfuração (MWD / LWD)	40/m		96000

Nesta fase o custo total é de 7.08 milhões de euros.

Tabela 8-3 Custos dos logs de sondagens e diagrapia geofísica

Objetivos	Preço tabelado (€)	Número de metros	Custo final (€)
Aquisição de dados incluindo porosidade, salinidade da água, permeabilidade, pressão de formação e amostragem de fluidos, perfilagem sísmica, a qualidade de aderência do cimento	560/m	2400	1.34 M
Processamento e interpretação dos dados	56/m		134.400
Estudo das lamas	20/m		48.000
Outros (abastecimento de água, tratamento de líquidos e sólidos e disposição, comunicações)	80/m		192.000
Seguros	150.000		150.000
Teste de injeção	80/m		192.000
Manutenção para uso futuro do poço para monitorização (opcional)	20/m		48.000

O custo total nesta fase é de 2.1 milhões de euros.

Para o estudo em laboratório, apenas se considerou 20% da totalidade das amostras recolhidas.

Tabela 8-4 Custos associados a trabalho em laboratório

	Objetivos	Preço tabelado (€)	Número de metros	Custo final (€)
Laboratório	Inclui toda a amostragem de testemunho (~ 9m), no reservatório e rocha de cobertura, a fim de executar descrições do testemunho, mineralogia, estudo petrofísico (porosidade, densidade, permeabilidade, permeabilidade relativa,) e ensaios geotécnicos (módulo de elasticidade, as propriedades de resistência, as propriedades de poro-elásticas)	120/m	480	57.600

O custo total desta fase é de 57.600 euros.

Assim, o custo total da campanha de prospeção de cerca de 10,1 milhões de euros.

9. Conclusões

O desenvolvimento rápido do setor de produção de energia renovável, como resposta às alterações climáticas, tem criado novos desafios na gestão da energia elétrica na rede, devido à intermitência inerente à produção de energia renovável.

Em Portugal, o setor de energia eólica já representa cerca de 25% da produção de energia elétrica, o que acarreta dificuldades na gestão da energia e desperta o interesse pelas tecnologias de armazenamento de energia.

O armazenamento de energia na forma de ar comprimido (CAES) constitui a única alternativa às centrais hidroelétricas por bombagem para o armazenamento de energia a grande escala. A tecnologia CAES é considerada mais vantajosa a nível ambiental, mais eficiente (cerca de 20% na relação custos / capacidade) e os custos do armazenamento são 1/3 dos custos das centrais hidroelétricas por bombagem.

A tecnologia baseia-se no armazenamento do ar comprimido em rochas porosas em formações de sal-gema e em rochas duras.

Este trabalho abordou a viabilidade do armazenamento de ar comprimido em formações de sal na zona de Rio Maior.

A formação considerada é o domo salino de Rio Maior, onde se encontram excelentes fatores de viabilização de uma central CAES, dos quais se destacam a proximidade a um gasoduto, a proximidade ao parque eólico da Serra dos Candeeiros, a existência de uma formação salina com profundidades ideais, a proximidade à rede elétrica de alta tensão, boas condições à superfície para instalação da central e a salinas da Fonte da Bica que permite o tratamento da salmoura.

A definição do local para o projeto de dimensionamento da caverna era limitado, devido à existência de apenas 2 sondagens e à reduzida informação disponível do domo salino. Era fundamental o conhecimento do valor dos resíduos insolúveis para o dimensionamento da caverna. Assim, o local definido como ideal para projetar a caverna, coincide com o da sondagem S2, pois este local apresenta maior concentração de halite (84,10%) e menor concentração de insolúveis (13,48 %).

O dimensionamento da caverna teve em conta o intervalo de profundidade definido como melhor para a construção de cavernas CAES entre os 610 metros e os 915 metros.

A caverna definida tem a forma de cilindro na vertical, encontra-se entre os 615 m e os 744,3 m, de diâmetro tem 60 metros e possui um volume total de 365350 m³, o que permite um armazenamento de energia por unidade de volume de 4,10 KWh/m³.

O projeto possui a capacidade de armazenamento de energia de 1332 MWh e capacidade de produzir 111MW de potência.

O volume de água necessária para construção da caverna é de 2922800 m³. Este volume é o expectável para salmoura a tratar, tendo em conta que o valor médio de água tratada nas salinas de Fonte da Bica é de 212500 m³, o que representa apenas 7,3% do volume total de salmoura a tratar. Assim, é importante avaliar novas soluções para o despejo e tratamento da salmoura, bem como avaliar a capacidade de armazenamento de salmoura inerente ao aquífero salino.

O plano de prospeção definido considera os custos referentes às técnicas geofísicas, campanha de perfuração, estudo de logs de sondagem e diagrfias geofísicas e de laboratório, o que totaliza cerca de 10,1 milhões de euros.

10. Bibliografia

- Abelho, S. (2011). *Armazenamento de Energia Eléctrica: Cenários para o Sistema Eléctrico Português*. Tese de Mestrado em Energias Renováveis – Conversão elétrica e Utilização Sustentável. Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 9 pp.
- Almeida, B. (2013). *Localização de Parques Eólicos e Ornamento do Território*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Planeamento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 1 a 17 pp.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R. e Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia. Instituto da Água. 320 a 337 e 604 a 614 pp.
- Allen, R. D., Doherty, T. J. e Fossum, A. F. (1982a). *Geotechnical Issues and Guidelines for Storage of Compressed Air in Excavated Hard Rock Caverns*. Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S.. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Allen, R. D.; Doherty, T. J. Thorns; R. L., (1982b). *Geotechnical Factors and Guidelines for Storage of Compressed Air in Solution Mined Salt Cavities*, Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S.. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Allen, R.D., Doherty, T. J., Erikson, R. L. e Wiles, L.E. (1983). *Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous Rock Reservoirs*. Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S.. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Arsie, I., Marano, V., Rizzo, G. e Moran, M. (2009). *Integration of Wind Turbines With Compressed Air Energy Storage*.
- Barnes, F. S. e Levine, J. G. (2011). *Large Energy Storage Systems – Handbook*.
- Bary, A., Crotogino, F., Prevedel, B., Berger, H., Brown, K., Frantz, J., Sawyer, W., Henzell, M., Mohmeyer, K., Ren, N., Stiles, K., Xoing, H. (2002). *Almacenamiento Subterráneo de gas Natural*
- Bernardes, L., Pereira, N. e Carneiro, J. (2011). Relatório Final; Actividade 3; Tarefa 3.1 – Análise dos elementos de prospecção geofísica; - caracterização geotérmica; Estudo de Viabilidade da Captura e Armazenamento de CO₂ na Central Termoeléctrica do Pego. (KTejo).
- Calado, C e Brandão, J. M. (2009). *Salinas Interiores em Portugal: o Caso das Marinhas de Rio Maior*. Associação Portuguesa de Geólogos.
- Carvalho, J. M. F., Midões, C., Machado, S., Sampaio, J., Costa, A. e Lisboa, V. (2011). *Maciço Calcário Estremenho – Caracterização da situação de Referência*. (LENG) Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Carvalho, J. M. F. (2013). *Tectónica e Caracterização da Fracturação do Maciço Calcário Estremenho, Bacia Lusitaniana – Contributo para Prospecção de Rochas Ornamentais e Ordenamento da Atividade Extrativa*. Tese de doutoramento em geologia - geologia económica e do ambiente. Faculdade de ciências – Departamento de geologia – Universidade de Lisboa.
- Catarino, B. (2009). *Modelagem tridimensional de uma jazida mineral prospectada por sondagens e objectivando a sua exploração a céu aberto*. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

Cavaco, L. E. (2013). *Definição de reservatório geológicos para armazenamento de energia em ar comprimido e sinergias com produção de energia*. Tese de Mestrado em Energia e Ambiente. Universidade de Évora – Escola de ciências da Terra e da Vida – Departamento de Física.

Coelho, C.I.A. (2007). *Avaliação dos Impactes Ambientais dos Parques Eólicos em Áreas Protegidas: O Caso de Estudo do Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros*. Tese de Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente. Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa. 77 e 78 pp.

Comissão Europeia (2014). *Compreender as políticas da União Europeia – Ação Climática*. (Serviços das Publicações da União Europeia, 2014 Luxemburgo.

Costa, P. V. M. (2013). *Uso estratégico de espaço subterrâneo para estocagem de gás em cavernas abertas por dissolução de rocha salina*. Tese de Mestrado em Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Crotogino, F., Mohmeyer, K.U. e Scharf, R. (2001). *Huntorf CAES: More Than 20 Years of Successful Operation*. Meeting Orlando, Florida, USA. 15 – 18 April 2001.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. (Tradução de Carlos A R Macedo -1991). *Minerais constituintes das rochas - uma introdução*. Fundação Calouste Gulbenkian (Lisboa), pp: 640-696 pp.

Dresser-Rend (2010). *Compressed Air Energy Storage (CAES)*.

Eggenkamp, H. G. M., Marques, J. M. e Graça, H. (2013). *Application of stable chlorine isotopes to develop a conceptual model for the origin of the ground water circulating near the "salinas" at Rio Maior (Central Portugal)*. Comunicações geológicas (2013) 100, 1, 49 – 53; 2013 LNEG – Laboratório Nacional de geologia e Energia.

Electric Power Research Institute (2003). *Comparison of Storage Technologies for Distributed Resource Applications*. Danville.

Energias Endógenas de Portugal (e²p) (2013). *Parques Eólicos em Portugal*. INEGI & APREN. Lisboa.

Energias Endógenas de Portugal (2014). *Resumo – Serra dos Candeeiros (Eólica)*. 29/08/2014

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (2008). *Metodologia dos estudos para a determinação da capacidade no armazenamento subterrâneo de gás natural*.

European Association for Storage of Energy & European Energy Research Alliance. (2013). *Joint EASE / EERA Recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030*.

Fonseca, D. M. S. F. M. (1996). *Estudo Petrológico e geoquímico dos Carvões de Rio Maior*. Tese de Doutoramento em geologia. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia.

International Energy Agency. (2009). *Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids*.

Kim, H. M., Rutqvist, J., Ryu, D. W., Choi, B. H., Sunwoo, C. e Song, W. K. (2011). *Exploring the Concept of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Lined Rock Caverns at Shallow Depth: A Modeling Study of Air Tightness and Energy Balance*.

- Konrad, J., Carriveau, R., Davison, M., Simpson, F. e Ting, D.S.K. (2012). *Geological Compressed Air Energy Storage as an Enabling Technology for Renewable Energy in Ontario, Canada*. International Journal of Environmental Studies. London.
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., Callapez, P., e Martins, L. (2006). *A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectonica*. In *Geografia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha e J. C. Kullberg, Eds) univ. Évora, pp. 317 – 368.
- Lima, L. (2012). *Análise de Atributos Sísmicos para Modelagem da Porosidade Efetiva do Campo de Namorado, Bacia de Campos*. Tese de bacharel em geologia. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociencias.
- Marin, T. (2006). *Análise Energo Ambiental de Exploração e Exploração do Gás Natural*. São Paulo.
- Mays, G. T.; Belles, R. J.; Blevins, B. R.; Hadley, S. W.; Harrison, T. J.; Jochem, W. C.; Neish, B. S.; Omitaomu, O. A.; Rose, A. N., (2012). *Application of Spatial Data Modeling and Geographical Information Systems (GIS) for Identification of Potential Siting Options for Various Electrical Generation Sources, May 2012*; Oak Ridge National Laboratory; UT-Battelle; Electric Power Research Institute (EPRI); U.S. Department Of Energy.
- Mcgrail, B. P., Cabe, J., Davidson, C., Knudson, F. S., Bacon, D., Bearden, M., Chamness, M., Horner, J., Reidel, S., Schaef, T., Spane, F. e Thorne, P. (2013). *Compressed Air Energy Storage: Grid-Scale Technology for Renewable Integration in the Pacific Northwest*. Pacific Northwest National Laboratory.
- Miranda, A. (2011). *Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 4 e 10 a 14 pp.
- Nakhankim, M., Marean, J., Chiruvolu, M., Pater, M., Byrd, S. e Schainker, R. (2009). *Second Generation of CAES Technology – Performance, Operations, Economics, Renewable Load Management, Green Energy*. Power – Gen International, Las Vegas Convention Center, Las Vegas, NV, December 8-10, 2009.
- Neto, M & Rocha, A. (2010). *Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração*. Editora do IGRN-RN
- Neumiller, J. L. (2009). *Reservoir Simulation of Combined Wind Energy and Compressed Air Energy Storage in Different Geologic Settings*. The degree of Master of Science (Petroleum Engineering). Faculty of the Colorado School of Mines.
- Portaria nº 181 / 2012 de 8 Junho. (*Anexo – Regulamento de Armazenamento Subterrâneo de Gás Natural em Formações Salinas Naturais*).Diário da Republica, 1ª serie – Nº 111 – 8 Junho de 2012. Ministério da Economia e do Emprego. Lisboa.
- Raju, M. e Khaitan, S. K. (2011). *Modeling and Simulation of Compressed Air Storage in Caverns: A Case Study of the Huntorf Plant*.
- Redes Energéticas Nacionais (REN) (2013). *A Energia Eólica em Portugal 2012*.
- Rheinisch - Westfälisches Elektrizitätswerk, (2010). *ADELE – Adiabatic Compressed – Air - Energy Storage for Electricity Supply*.

Rutqvist, J., Kim, H. M., Ryu, D. W., Synn, J. H. e Song, W. K. (2012). *Modeling of Coupled Thermodynamic and Geomechanical Performance of Underground Compressed Air Energy Storage in Lined Rock Caverns*.

Sampaio, E. (2006). *Mineralogia do solo*. Departamento de geociências, Universidade de Évora

Santos, R. (2013). *Avaliação geofísica geológica de uma porção de quebra de talude da Bacia de Jequitinhonha*. Tese de Mestrado em Geofísica. Universidade Federal do Pará.

Sharma, P. V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN: 0 521 57240 1, 475 pp

Silva, J. P. R. (2013). *Influência da Consideração da Ação Sísmica no Custo da Reabilitação de uma Estrutura Existente*. Tese de mestrado em Engenharia Civil – Especialização em construções civis. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. 44 pp.

Succar, S. e Williams, R. H. (2008). *Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications For Wind Power*. Princeton Environmental Institute – Princeton University.

Zbyszewski, G. (1961). *Jazida de Sal-gema de Fonte da Bica (Rio Maior)*. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal. 223 a 236 pp.

Zschocke, A. (2012). *Compressed Air Energy Storage – One Promising Technology in the Future Energy Storage Business*. E. ON Innovation Center Energy Storage, Workshop, Sevilla, 15.11.2012.

E2P.INEGI (2014) - Website www.e2p.inegi.up.pt consultado em 5 de Abril de 2014.

IPMA (2015) - Website www.ipma.pt consultado em 23 de fevereiro de 2015.

REN (2015) - Website www.ren.pt consultado em 24 de Março de 2015.

SNIRH (2015) - Website www.snirh.pt consultado em 12 de Janeiro de 2015.

11. Anexos

Tabela 11-1 Análises químicas da sondagem S1 de Fonte da Bica

(Resultados expressos em percentagem)

Amostras	Profundidade (m)	NaCl	KCl	CaCl₂	CaSO₂	Resíduos insolúveis	H₂O
1	78,50 – 99,00	66,48	0,26	0,41	0,99	28,91	2,92
2	99,00 – 108,60	56,14	0,27	0,25	1,02	40,06	2,20
3	108,60 – 121,60	73,64	0,32	0,36	1,11	22,74	1,72
4	121,60 – 122,50	45,74	0,28	0,36	1,50	49,59	2,70
5	122,50 – 124,40	71,74	0,28	0,89	1,27	24,49	1,49
6	124,40 – 127,30	44,30	0,30	1,05	1,23	49,94	3,30
7	127,30 – 136,27	77,84	0,37	0,61	0,75	19,37	1,22
8	136,27 – 137,62	84,42	0,22	0,61	0,83	13,41	0,64
9	137,62 – 144,05	57,68	0,13	0,75	1,03	38,28	2,29
10	144,05 – 146,60	85,66	0,33	0,44	0,75	12,64	0,32
11	146,60 – 151,20	68,94	0,27	0,19	1,55	28,74	0,44
12	151,20 – 153,90	86,68	0,13	0,27	0,37	17,78	0,28
13	153,90 – 159,20	89,16	0,32	0,06	0,48	9,58	0,48
14	159,20 – 181,90	65,22	0,28	0,86	1,09	29,98	2,68
15	181,90 – 187,00	12,72	0,26	1,16	2,00	78,51	5,46
16	187,00 – 191,00	75,16	0,43	0,30	1,01	21,65	1,51
17	191,00 – 192,20	47,98	0,40	0,42	2,01	46,00	3,48
18	192,20 – 197,80	77,96	0,34	0,92	1,12	18,54	1,53
19	197,80 – 201,50	51,62	0,38	1,00	1,18	42,00	3,96
20	201,50 – 210,30	67,06	0,33	1,14	1,03	27,30	3,30
21	210,30 – 222,00	44,98	0,19	1,14	1,05	48,42	4,42
22	222,00 – 233,00	75,14	0,29	0,42	1,35	20,95	1,92
23	233,00 – 235,50	44,44	0,36	0,86	1,54	48,23	4,74
24	235,50 – 244,80	64,46	0,27	0,86	1,35	29,48	2,74
25	244,80 – 290,00	32,86	0,34	1,36	1,02	58,90	5,65
26	290,00 – 315,50	64,82	0,47	1,02	1,22	30,10	2,49
27	315,50 – 317,70	59,60	0,23	0,72	1,36	35,02	3,15
28	317,70 – 342,90	80,14	0,34	0,58	1,15	16,69	1,27
29	342,90 – 343,60	74,78	0,22	0,64	0,86	21,48	2,10
30	343,60 – 350,15	83,24	0,15	0,44	0,84	14,12	1,26
31	350,15 – 352,10	57,68	0,42	0,86	0,84	37,17	3,34

Fonte: (Zbyszewski, 1961b).

Tabela 11-2 Análises químicas da sondagem S2 de Fonte da Bica

(Resultados expressos em percentagem)

Amostras	Profundidade	NaCl	KCl	CaCl₂	CaSO₂	Resíduos	H₂O
1	69,00 – 190,00	87,10	0,29	0,22	0,30	11,28	0,92
2	190,00 – 193,50	61,20	0,22	0,58	0,24	34,75	3,17
3	193,50 – 216,00	86,24	0,26	0,19	0,45	10,55	2,42
4	216,00 – 220,00	60,22	0,16	0,81	0,74	33,87	4,29
5	220,00 – 222,50	77,62	0,22	0,33	0,55	19,23	2,12
6	222,50 – 225,00	56,66	0,15	0,72	0,50	36,07	5,97
7	225,00 – 250,30	78,24	0,31	0,24	0,67	17,65	2,95

Fonte: (Zbyszewski, 1961b).

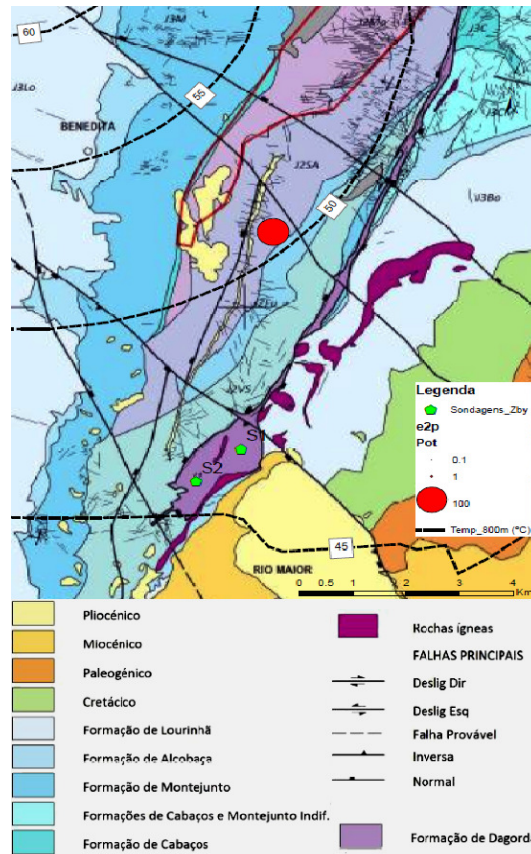


Fig. 11-1 Temperatura à profundidade de 800 metros (Bernardes *et al.* 2011).

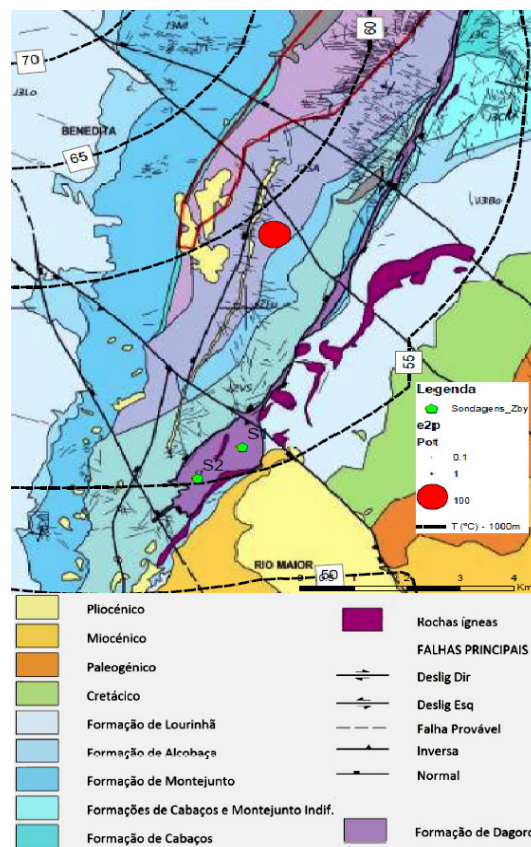


Fig. 11-2 Temperatura à profundidade de 1000m (Bernardes *et al.* 2011).

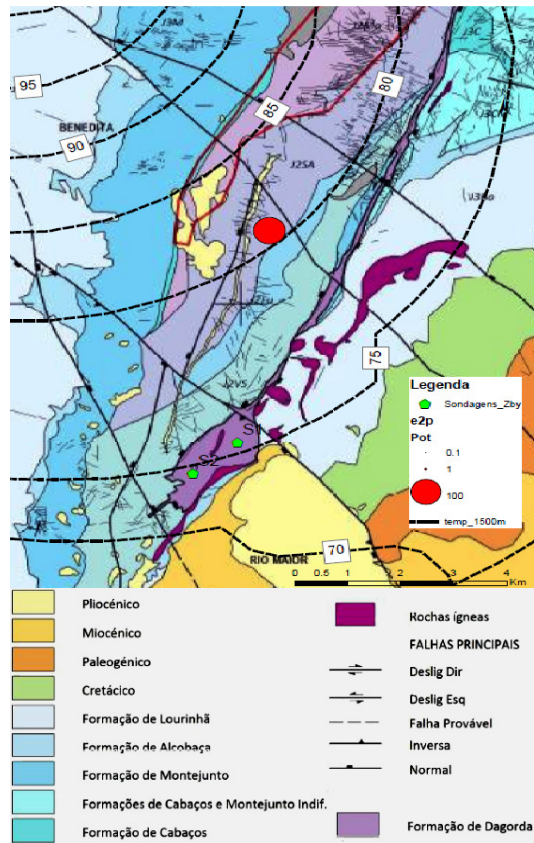


Fig. 11-3 Temperatura à profundidade de 1500m (Bernardes *et al.* 2011).

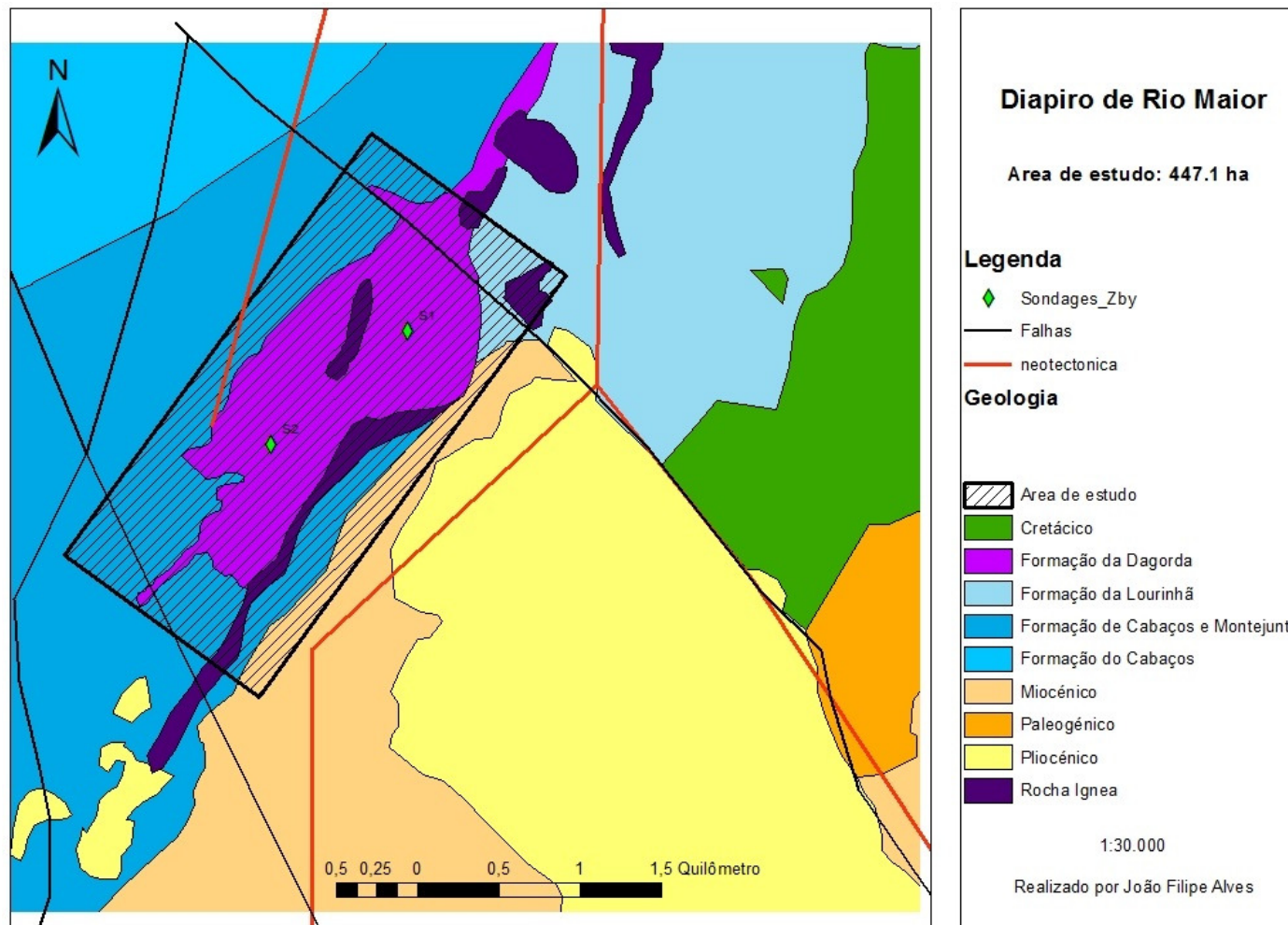


Fig. 11-4 Mapa do local em estudo.