



TÉCNICO
LISBOA

Análise termodinâmica a uma central geotérmica

Maria Oliveira Dias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Aires José Pinto dos Santos
Prof. Edgar Caetano Fernandes

Júri

Presidente: Prof. Carlos Frederico Neves Bettencourt da Silva

Orientador: Prof. Aires José Pinto dos Santos

Vogal: Dr. Ana Filipa da Silva Ferreira

Janeiro 2021

Agradecimentos

Ao longo destes 5 anos, em particular nestes últimos 11 meses, o trabalho foi imenso, árduo e extremamente desafiante. No entanto, não teria chegado ao fim deste percurso sem o apoio de diversas pessoas:

Aos meus orientadores, Professor Aires Santos e Professor Edgar Fernandes, por me terem acompanhado e por toda a paciência que tiveram comigo, ao me ouvirem e esclarecerem todas as minhas dúvidas e questões.

Ao Engenheiro Paulo Félix da empresa EDP, S.A. e aos Engenheiros Carmen Carepa e Nuno Vieira da empresa EDA Renováveis S.A., por todos os dados e informações que me deram respeitantes não só à central geotérmica do Pico Alto, mas também às centrais geotérmicas do Pico Vermelho e da Ribeira Grande.

A todos os professores da Universidade dos Açores e do Instituto Superior Técnico, por me terem ajudado ao longo deste processo, por me terem ensinado grande parte do que sei hoje respeitante à Engenharia Mecânica, fazendo com que concluísse o meu curso com sucesso.

À minha mãe e à minha irmã, por toda a paciência que tiveram comigo ao longo deste caminho. Por todas as chamadas, por todos os abraços de apoio que me fizeram nunca desistir e, principalmente, por me mostrarem que a vida não é só a faculdade.

A toda a minha restante família, em particular o meu tio Duarte, por me terem ajudado quando mais precisei e por estarem sempre preocupados comigo em todos os aspetos.

A todos os meus amigos que me acompanharam nesta jornada, por terem estado comigo todos os dias, sempre com uma conversa motivacional. A jornada foi claramente melhor por terem estado comigo, seja em dias de estudo, seja em dias de festa.

À onda que se tornou estrela, quero agradecer por me ter acompanhado em toda a minha vida. Não está aqui para ver o término de mais uma etapa, mas sei que está feliz, de sorriso no rosto, e a comemorar como bem ela o sabia fazer.

Por fim, mas mais importante, ao meu pai, por me ter ajudado em tudo o que podia. Sei que não está fisicamente presente, mas esteve em pensamento todos os dias, e acredito que esteja muito orgulhoso e feliz por mais uma etapa concluída.

Resumo

No atual contexto de alterações climáticas, o aproveitamento da energia geotérmica tem cada vez maior relevância. O facto de ser uma energia renovável evita os inconvenientes associados ao uso de combustíveis fósseis, nomeadamente a emissão de poluentes.

A sua exploração tem aumentado globalmente, especialmente em regiões de origem vulcânica, como é o caso do Arquipélago dos Açores. Neste arquipélago destacam-se as ilhas de São Miguel e Terceira, localizando-se centrais geotérmicas em ambas.

Esta dissertação tem como principal propósito analisar o funcionamento termodinâmico de uma central geotérmica – com o auxílio de um algoritmo desenvolvido em MATLAB – considerando a degradação térmica dos seus poços, baseada nas condições de projeto da central geotérmica do Pico Alto, na ilha Terceira.

O ciclopentano, fluido de trabalho atualmente utilizado na central, foi comparado com o R141b e o n-Pentano, ambos referenciados em artigos como fluidos que conduzem a bons resultados no funcionamento de uma central geotérmica. Nesta comparação, chegou-se à conclusão que, nas condições atuais de funcionamento, o ciclopentano é a escolha mais adequada. Além disso, fazendo uma análise de sensibilidade à pressão máxima do ciclo e ao sobreaquecimento, foi possível perceber o impacto de ambas as variáveis no ciclo termodinâmico. A existência de uma temperatura de reinjeção mínima condiciona o valor da pressão máxima do ciclo. Por outro lado, a comparação entre um ciclo saturado e um ciclo sobreaquecido mostrou que o sobreaquecimento melhora consideravelmente a potência útil do ciclo e o rendimento entre [13,7; 33,3]%, permitindo também aumentar a temperatura de reinjeção.

Palavras-chave: Central geotérmica, Ciclo binário, Degradação dos poços geotérmicos, Açores

Abstract

In the current situation of climate change, the use of geothermal energy is becoming increasingly important. As a source of renewable energy, it avoids the problems related with the use of fossil fuels, namely the pollutants emissions.

Its exploration is growing globally and is especially applied in regions with volcanic origin, such as the Azores Islands, namely on São Miguel and Terceira.

The main purpose of this master thesis is the thermodynamic analysis of a geothermal power plant – through use of an algorithm developed in MATLAB – taking into account the geothermal wells degradation, based on the design conditions of Pico Alto geothermal power plant, on Terceira island.

The cyclopentane, working fluid currently used, was compared with R141b and n-Pentane, both fluids referenced in articles as fluids that present good results in the operation of a geothermal power plant.

In this analysis, it was concluded that, under the current working conditions, the cyclopentane is the most suitable choice. In addition, by doing a sensitivity analysis for the maximum cycle pressure and superheating, it was possible to understand the impact of both variables in the thermodynamic cycle.

The existence of a minimum reinjection temperature imposes a limit to the maximum pressure value.

On the other hand, the comparison between a saturated cycle and a superheated cycle, showed that, superheating improves the cycle's useful power and the efficiency with values of [13,7;33,3]%, as well as increasing the reinjection temperature.

Keywords: Geothermal power plant, Binary cycle, Geothermal wells degradation, Azores

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de figuras	xii
Índice de tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Revisão bibliográfica	4
2.1 Energia geotérmica	4
2.2 Energia geotérmica no mundo	6
2.2.1 Portugal	7
2.3 Centrais geotérmicas	9
2.3.1 Produção de eletricidade	9
2.3.2 Processo de reinjeção	12
2.3.3 Degradação do reservatório geotérmico	13
3 Descrição e modelação do sistema	15
3.1 Central geotérmica em estudo	15
3.2 Modelação e simulação	16
3.2.1 Análise termodinâmica	16
3.2.2 Condições impostas e dados adquiridos	23
3.2.3 Descrição do algoritmo	25
4 Resultados	27
4.1 Degradação dos poços geotérmicos	27
4.2 Análise de sensibilidade	32
4.2.1 Efeito da variação da pressão máxima do ciclo	32

4.2.2	Efeito do sobreaquecimento	32
5	Conclusões	36
5.1	Trabalhos futuros	36
	Referências	39

Índice de figuras

2.1	Energia geotérmica, adaptado de [3].	4
2.2	<i>Enhanced Geothermal System</i> , adaptado de [4].	5
2.3	Distribuição das diferentes utilizações diretas de energia geotérmica, incluindo bombas de calor [6].	5
2.4	Central geotérmica de Larderello [8].	6
2.5	Produção de eletricidade, através da geotermia, no mundo ao longo dos anos [9].	7
2.6	Ranking dos países com maior produção de eletricidade a partir da energia geotérmica em 2018 [10].	7
2.7	Localização do Arquipélago dos Açores, adaptado de [11].	8
2.8	Ilha de São Miguel [12].	8
2.9	Ilha Terceira [12].	8
2.10	Tecnologias de conversão em função da entalpia específica do reservatório geotérmico, adaptado de [14].	9
2.11	Capacidade instalada das diferentes tecnologias no mundo [15].	9
2.12	Número de unidades instaladas das diferentes tecnologias no mundo [15].	9
2.13	Central de vapor seco, adaptado de [14].	10
2.14	Central de <i>single flash</i> , adaptado de [14].	10
2.15	Central de <i>double flash</i> , adaptado de [14].	10
2.16	Central de ciclo binário, adaptado de [14].	11
2.17	Poço de produção e poço de reinjeção numa central, adaptado de [17].	12
3.1	Esquema de separação e mistura dos três poços de produção da central geotérmica em estudo.	15
3.2	Esquema de funcionamento da central geotérmica em estudo.	16
3.3	Diagrama <i>T-s</i> da central geotérmica em estudo.	16
3.4	Esquema da bomba.	17
3.5	Esquema do recuperador de calor.	18
3.6	Esquema do pré-aquecedor de vapor.	18
3.7	Esquema do pré-aquecedor de <i>brine</i>	19
3.8	Esquema do evaporador.	19

3.9	Esquema da turbina.	20
3.10	Esquema do aerocondensador.	20
3.11	Esquema do processo de reinjeção.	22
3.12	Temperatura e caudal mássico de vapor de água (ponto A1) e <i>brine</i> (ponto B1) em função dos anos de vida da central geotérmica.	24
3.13	Algoritmo desenvolvido em MATLAB.	25
4.1	Diagrama $p-h$ no ano 1.	29
4.2	Taxa de destruição de exergia dos componentes no ano 1.	31
4.3	Potência útil do ciclo em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.	31
4.4	Rendimento energético em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.	31
4.5	Rendimento exergético em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.	32
4.6	Temperatura de reinjeção em função da pressão máxima do ciclo.	32
4.7	Potência útil do ciclo em função da pressão máxima do ciclo.	32
4.8	Rendimento energético e exergético em função da pressão máxima do ciclo.	33
4.9	Potência útil do ciclo e rendimento energético em função da temperatura de reinjeção.	33

Índice de tabelas

3.1	Parâmetros assumidos no algoritmo.	23
3.2	Dados iniciais utilizados no algoritmo.	24
4.1	Variação de ΔT e x_1 para o ciclopentano no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 6,55 bar.	27
4.2	Variação de x_1 para o R141b no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 4,80 bar.	28
4.3	Variação de x_1 para o n-Pentano no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 4,15 bar.	28
4.4	Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o ciclopentano como fluido do ciclo.	29
4.5	Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o R141b como fluido do ciclo.	30
4.6	Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o n-Pentano como fluido do ciclo.	30
4.7	Variação da pressão máxima do ciclo ao longo dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.	31

Nomenclatura

g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H	Altura de aspiração [m]
A	Área [m ²]
C_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]
\dot{m}	Caudal mássico [kg/s]
Y_d	Constante de Stodola [1/m ² .s ² .K]
R	Constante do gás [J/mol.K]
$V^2/2$	Energia cinética [J]
u	Energia interna específica [J/kg]
gz	Energia potencial [J]
h	Entalpia específica [kJ/kg]
s	Entropia específica [J/kg.K]
e	Exergia específica [J/kg]
\dot{q}	Fluxo de calor [W/m ²]
\dot{E}	Fluxo de exergia [MW]
x	Fração de caudal mássico de fluido de trabalho que entra nos pré-aquecedores
p	Pressão [bar]
\dot{E}_d	Taxa de destruição de exergia [MW]
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor [MW]
\dot{W}	Taxa de transferência de trabalho [MW]
T	Temperatura [°C]

t	Tempo [s]
\mathbf{n}	Vetor normal à superfície
\mathbf{V}, \mathbf{v}	Vetor velocidade
V	Volume [m ³]
v	Volume específico [m ³ /kg]

Símbolos gregos

ϕ	Coeficiente de caudal mássico [m.s. \sqrt{K}]
ρ	Densidade [kg/m ³]
Δ	Diferença entre valores
η	Rendimento [%]
$\dot{\sigma}$	Taxa de produção de entropia [MW/K]

Subscritos

C	Aerocondensador
ar	Ar (8, 9)
B	Bomba
ciclo	Ciclo termodinâmico completo
<i>off</i>	Condições não nominais
d	<i>Design</i>
en	Energético
<i>in</i>	Entrada
amb	Estado ambiente
0	Estado morto
ex	Exergético
FT	Fluido de trabalho/fluido do ciclo
i	Fluido de trabalho/fluido do ciclo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)
j	Fluido geotérmico (A1, A2, A3, B1, B2)
f	Fluxo
b	Fronteira do volume de controlo

s	Isentrópico
min	Mínimo
nom	Nominal
R	Recuperador de calor
inj	Reinjeção
<i>out</i>	Saída
sa	Sobreaquecimento
T	Turbina

1. Introdução

1.1 Motivação

O recurso generalizado a combustíveis fósseis, desde o início da revolução industrial, ameaça a sobrevivência dos ecossistemas marinhos e terrestres, com consequências sociais e económicas devastadoras, a curto prazo. As diversas cimeiras do clima têm alertado para a necessidade de uma redução drástica das emissões de dióxido de carbono, na ordem dos 50%, o que exige uma reconversão urgente dos sistemas de produção de energia, dando primazia à utilização de energias renováveis.

Na cimeira de Paris em 2015, criou-se a *Global Geothermal Alliance* [1] com o objetivo de promover a utilização de energia geotérmica. Esta organização conta com 40 países, incluindo Portugal. Nas palavras dos seus organizadores [2]: "*The Global Geothermal Alliance (GGA), launched today, is set to achieve a 500% increase in global installed capacity for geothermal power generation and a 200% increase for geothermal heating by 2030. The world contains vast geothermal energy potential, proven across nearly 90 countries. But almost 90% of this remains untapped with roughly 12 GW installed so far. What was an idea just over a year ago, the GGA is now a strong partnership of over 40 countries and institutions (including IRENA, France, Iceland Kenya, New-Zealand) with the action plan in place to meet the set goal.*".

Entre as diversas energias com menor impacto ambiental, destaca-se a energia geotérmica. A energia produzida através do calor proveniente do interior da Terra tem, em relação a outras energias renováveis, a vantagem de um funcionamento sem intermitências, ao contrário do que acontece na energia eólica ou solar (tanto térmica, como fotovoltaica).

Como é expectável, nem todos os países tem a possibilidade de explorar a geotermia, a qual é especialmente indicada em regiões de origem vulcânica. Neste sentido, o Arquipélago dos Açores reúne todas as condições necessárias à exploração deste recurso, a qual ocorre desde 1980, com a primeira central na ilha de São Miguel.

O Arquipélago dos Açores encontra-se na junção de três placas tectónicas. É constituído por nove ilhas, distantes entre si, o que justifica que a energia geotérmica seja uma prioridade na produção descentralizada de energia.

Por fim, a motivação na escolha deste tema surgiu pelo interesse em perceber e prever como a central geotérmica em estudo, baseada em condições de projeto de uma central geotérmica recente, irá funcionar ao longo dos anos, tendo em consideração a degradação dos poços geotérmicos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é analisar, ao longo do seu tempo útil de vida, o funcionamento de uma central geotérmica, considerando a degradação térmica dos poços, baseada nas condições de projeto da central geotérmica do Pico Alto, na ilha Terceira. Não se pretende fazer a análise termodinâmica desta central, dado que não se conhecem as atuais condições de funcionamento.

De modo a ter em conta a degradação dos poços, é necessário variar a temperatura e o caudal mássico do fluido geotérmico.

Para além disso, analisou-se o comportamento da central variando outros parâmetros, como o fluido do ciclo, a pressão máxima do ciclo e os graus de sobreaquecimento. Os resultados das respetivas alterações foram comparados com as condições inicialmente definidas, de modo a verificar se as escolhas foram corretas ou se é mais vantajoso proceder à sua alteração.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos, cada um organizado e estruturado de forma a explicar, da melhor maneira, como todo o estudo foi realizado.

No presente capítulo encontra-se a motivação para a escolha deste tema, bem como os objetivos do mesmo.

No próximo capítulo, intitulado "Revisão bibliográfica", é realizado um enquadramento teórico, onde se apresentam alguns conceitos fundamentais, bem como uma pequena descrição da utilização da energia geotérmica a nível mundial e, em especial, no Arquipélago dos Açores. Por último, são referidos alguns aspetos importantes não só respeitantes à instalação das centrais geotérmicas, como também ao seu funcionamento.

No capítulo 3, "Descrição e modelação do sistema", é apresentado o esquema de funcionamento da central geotérmica em análise, as equações de balanço energético e exergético de cada um dos componentes e do ciclo a nível global, as condições impostas e os dados adquiridos e, por fim, o algoritmo desenvolvido, tendo em conta a degradação dos poços geotérmicos.

No capítulo 4, analisam-se os resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 5 expõem-se as conclusões finais, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Energia geotérmica

A energia geotérmica é uma energia renovável proveniente do interior do planeta. O magma ao entrar em contacto com as águas subterrâneas em circulação (por exemplo, água proveniente da precipitação), provoca o seu aquecimento, originando reservatórios de água quente sob pressão (Figura 2.1). Em regiões vulcânicas, esta água pode chegar à superfície na forma de vapor, podendo igualmente ser extraída através de perfurações.

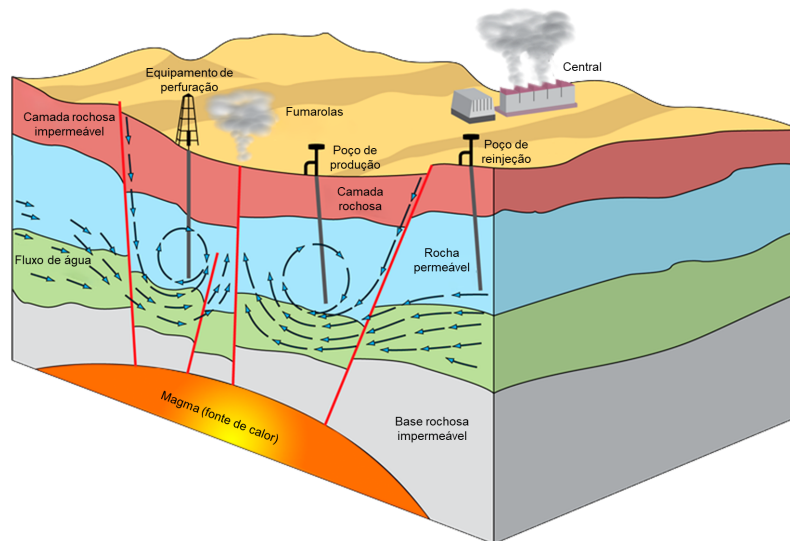


Figura 2.1: Energia geotérmica, adaptado de [3].

No entanto, este aproveitamento não é uniforme em todo o planeta, uma vez que nem todas as regiões têm a mesma capacidade de acordo com a sua natureza geológica, o que implica que a profundidade máxima da perfuração varia com a região em estudo, no intervalo [0,5; 2,0] km.

Tratando-se de zonas da crosta terrestre a profundidades elevadas, o conhecimento das movimentações dos fluidos não é rigoroso e, como tal, é difícil de prever o comportamento do reservatório ao longo dos anos. Para colmatar esta lacuna, realizam-se testes à superfície. Destes testes, salienta-se o *audio-magnetotellurics* (AMT), onde é feita uma análise da condutividade elétrica à camada rochosa, detetando-se facilmente se existe um reservatório geotérmico. Também é de referir o teste aos gradientes de temperatura dos poços, em que, tal como o próprio nome indica, é feita uma medição dos gradientes de temperatura dos poços já construídos.

Com o objetivo de aumentar a viabilidade deste tipo de exploração, utiliza-se o método *Enhanced Geothermal System*, no qual se promove a formação de reservatórios geotérmicos (Figura 2.2). Este processo consiste em realizar fraturas em rochas quentes e secas, onde se injeta água proveniente da central, o que permite o seu posterior aquecimento e formação de um reservatório geotérmico.

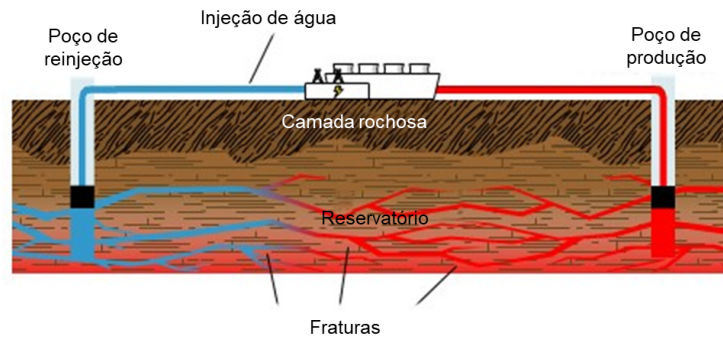


Figura 2.2: *Enhanced Geothermal System*, adaptado de [4].

As características de cada reservatório variam entre si, podendo o fluido geotérmico apresentar diferentes tipos de estados físicos, tais como vapor sobreaquecido (também designado por vapor seco), vapor saturado, uma mistura de líquido saturado e vapor saturado ou líquido comprimido. A parte líquida do fluido geotérmico, denominada por *brine*, é constituída por elevadas concentrações de sais e enxofre, sendo este último característico de regiões com atividade vulcânica.

Consoante a temperatura a que se encontra o reservatório geotérmico, estes podem designar-se por recursos de alta entalpia, para temperaturas superiores a 220 °C, recursos de média entalpia, para temperaturas entre 100 °C e 220 °C, ou recursos de baixa entalpia, onde as temperaturas são inferiores a 100 °C [5]. De acordo com o tipo de recurso, a energia geotérmica pode ter diferentes aplicações como, por exemplo, na produção de eletricidade ou em uso direto. Este último caso refere-se a recursos de baixa entalpia. As diversas aplicações do uso direto, no mundo, em 2015 encontram-se representadas na Figura 2.3.

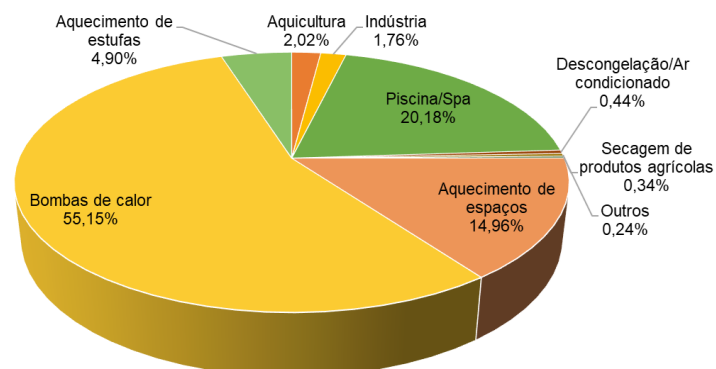


Figura 2.3: Distribuição das diferentes utilizações diretas de energia geotérmica, incluindo bombas de calor [6].

A energia geotérmica, apesar de possuir custos iniciais elevados, a principal desvantagem associada a esta energia, é uma forte concorrente à energia proveniente de combustíveis fósseis devido às

suas inúmeras vantagens [7]:

1. Limpa: apesar de as centrais geotérmicas libertarem, para a atmosfera, dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), entre outros, as quantidades emitidas são muito inferiores, com uma diminuição de, aproximadamente, [97; 99]% comparativamente com as centrais térmicas com combustíveis fósseis, para iguais potências;
2. Sustentável: a água utilizada no sistema é reinjetada no reservatório geotérmico;
3. Flexível: facilmente se aumenta a potência de energia elétrica produzida com os componentes instalados;
4. Manutenção reduzida: os componentes que integram a central possuem, maioritariamente, elevado tempo de vida e, portanto, não necessitam de manutenção/substituição frequente.

2.2 Energia geotérmica no mundo

Desde o início da humanidade que o calor proveniente do interior da Terra tem vindo a ser utilizado pelo Homem para diversos fins.

Inicialmente, era utilizado para cozinhar, para obter conforto ou para fins medicinais. Com o passar dos anos, foi possível aproveitá-lo também na produção de energia elétrica.

A primeira experiência de conversão para eletricidade surgiu em 1904, em Larderello (Figura 2.4). Com o decorrer dos anos, surgiram vários melhoramentos tecnológicos e começaram a ser construídas centrais geotérmicas em todo o planeta.



Figura 2.4: Central geotérmica de Larderello [8].

Atualmente, a produção de eletricidade através da geotermia existe em todo o mundo, aumentando progressivamente de ano para ano, como se observa na Figura 2.5.

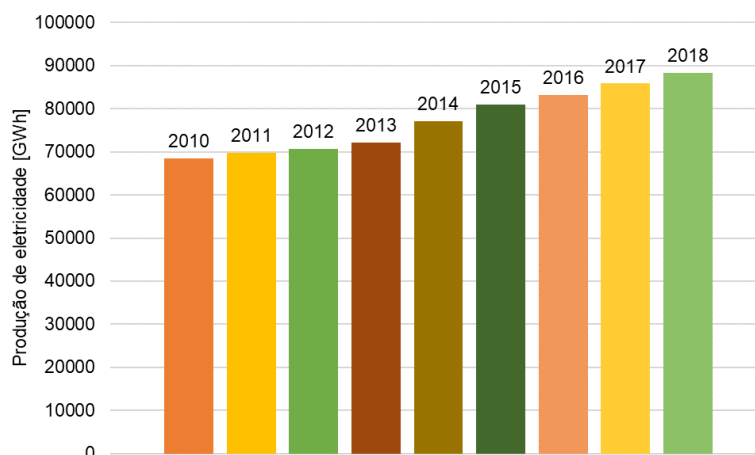


Figura 2.5: Produção de eletricidade, através da geotermia, no mundo ao longo dos anos [9].

Entre os maiores produtores de eletricidade a partir do calor geotérmico em 2018, de acordo com a Figura 2.6, há a salientar países como os Estados Unidos da América, Indonésia, Filipinas, Nova Zelândia e Turquia.

No ano anterior, em 2017, a Turquia não estava incluída nos cinco países com maior produção de eletricidade a partir da energia geotérmica, mas sim a Itália, que ficou em sexto lugar no ranking mundial em 2018.

Para países como Islândia, Nova Zelândia ou Filipinas, a energia geotérmica tem uma grande contribuição na produção de eletricidade, o que permite reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

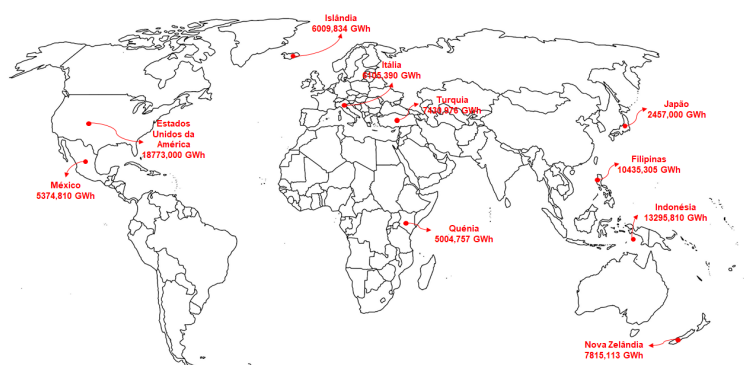


Figura 2.6: Ranking dos países com maior produção de eletricidade a partir da energia geotérmica em 2018 [10].

2.2.1 Portugal

Em Portugal, a produção de eletricidade por fontes geotérmicas restringe-se à Região Autónoma dos Açores.

O Arquipélago dos Açores situa-se no Oceano Atlântico, na junção de três placas tectónicas: Norte Americana, Euro-asiática e Africana, formando a "Junção Tripla dos Açores" (Figura 2.7). Devido à sua localização, é frequente uma intensa atividade sísmica e vulcânica.

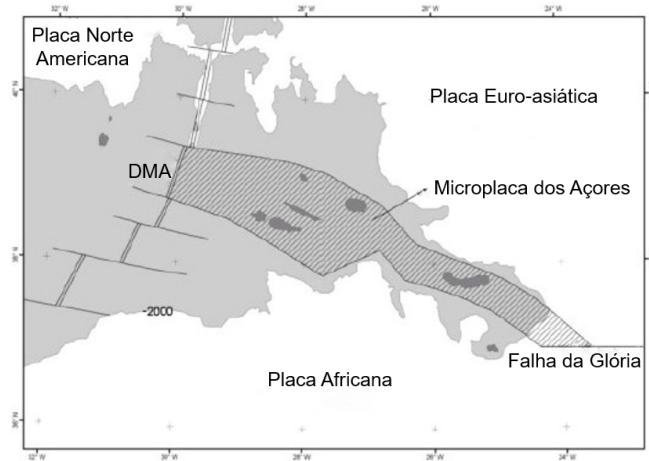


Figura 2.7: Localização do Arquipélago dos Açores, adaptado de [11].

Um aspeto importante nestas nove ilhas é o facto de estarem isoladas e distanciadas entre si, o que favorece a descentralização energética.

Em termos de aproveitamento da energia geotérmica, das nove ilhas existentes no arquipélago, há a destacar duas: a ilha de São Miguel e a ilha Terceira, representadas nas Figuras 2.8 e 2.9, respetivamente. Em ambas existem centrais geotérmicas em operação, pertencentes à empresa EDA Renováveis, S.A.

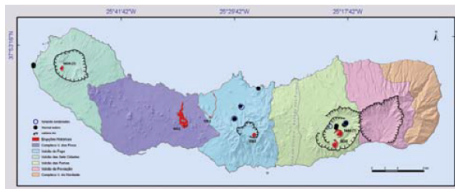


Figura 2.8: Ilha de São Miguel [12].

Em São Miguel, a utilização da energia geotérmica para produção de eletricidade teve início em 1980, com a central piloto do Pico Vermelho.

Em 1994, surgiu a primeira fase de exploração da central geotérmica da Ribeira Grande, com dois poços de produção e uma capacidade instalada de 5 MW. Após quatro anos, iniciou-se a segunda fase de exploração, com cinco poços de produção e um de reinjeção, aumentando a ca-

pacidade da central para 13 MW.

Em 2006, a central geotérmica do Pico Vermelho foi reestruturada, com cinco poços de produção e dois de reinjeção e uma capacidade de 10 MW.

Atualmente, a capacidade instalada é de 27,8 MW, estando previsto o aumento da capacidade de produção de ambas as centrais para 30 MW [13], até 2021.

Em 2018, a energia geotérmica produzida em São Miguel representou cerca de 42,0% do consumo da ilha e cerca de 23,1% do consumo total das nove ilhas.

Relativamente à ilha Terceira, é nesta que se situa a central que serviu de exemplo para este estudo, a central geotérmica do Pico Alto. Funciona desde agosto de 2017, quando teve início a primeira fase de ex-

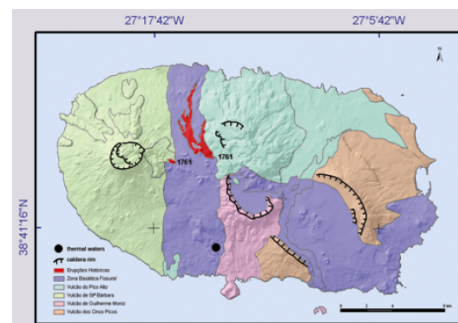


Figura 2.9: Ilha Terceira [12].

ploração, com três poços de produção e um de reinjeção e uma capacidade de 4 MW. Prevê-se uma segunda fase de exploração, com vista a aumentar a capacidade da central para cerca de 10 MW, até 2021.

A produção desta central representou, em 2018, 10,8% do consumo da ilha e 2,6% do consumo de todo o arquipélago.

2.3 Centrais geotérmicas

2.3.1 Produção de eletricidade

A produção de eletricidade através do calor proveniente do interior do planeta pode ser realizada com diferentes ciclos, consoante as características do fluido geotérmico. Assim sendo, podemos destacar três tipos de tecnologias, nomeadamente vapor seco, vapor *flash* e ciclo binário (Figura 2.10).

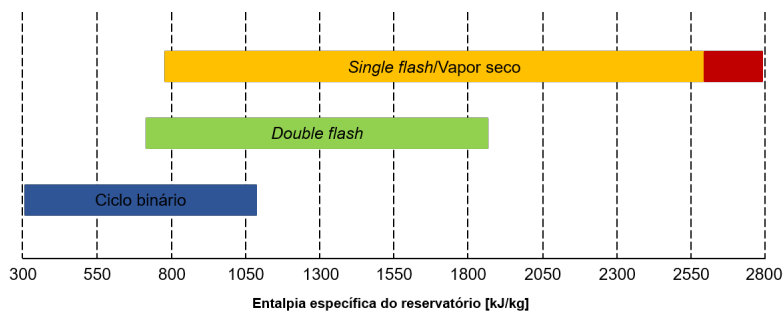


Figura 2.10: Tecnologias de conversão em função da entalpia específica do reservatório geotérmico, adaptado de [14].

De acordo com as últimas inovações respeitantes à energia geotérmica, a tecnologia de conversão que possui maior capacidade instalada é a de vapor *flash*, seguida da de vapor seco e da de ciclo binário.

Quanto ao número de centrais instaladas, destaca-se o ciclo binário, uma vez que, por não necessitar de entalpias tão elevadas, pode ser utilizado mais frequentemente.

As percentagens tanto da capacidade instalada, como do número de unidades em operação, podem ser consultadas nas Figuras 2.11 e 2.12, respetivamente.

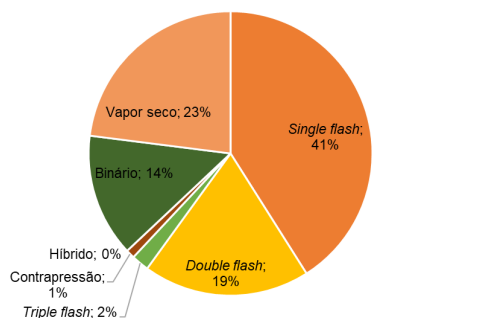


Figura 2.11: Capacidade instalada das diferentes tecnologias no mundo [15].

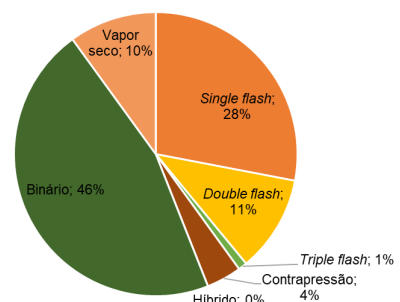


Figura 2.12: Número de unidades instaladas das diferentes tecnologias no mundo [15].

Centrais de vapor seco

Como já foi referido, a tecnologia de vapor seco é aplicada para temperaturas muito elevadas, ou seja, para elevadas entalpias.

De acordo com a Figura 2.13, o fluido geotérmico, após sair do reservatório, passa por um componente que remove a humidade, sendo o vapor encaminhado, posteriormente, para a turbina, onde expande, produzindo-se eletricidade num gerador. Passa, em seguida, por um condensador, ligado a uma torre de refrigeração, sendo finalmente reencaminhado para o poço de reinjeção.

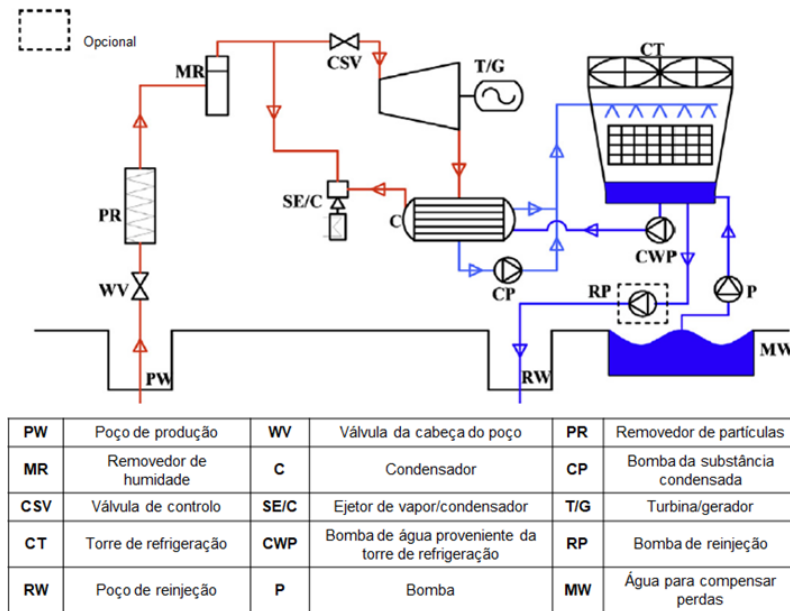


Figura 2.13: Central de vapor seco, adaptado de [14].

Centrais de vapor flash

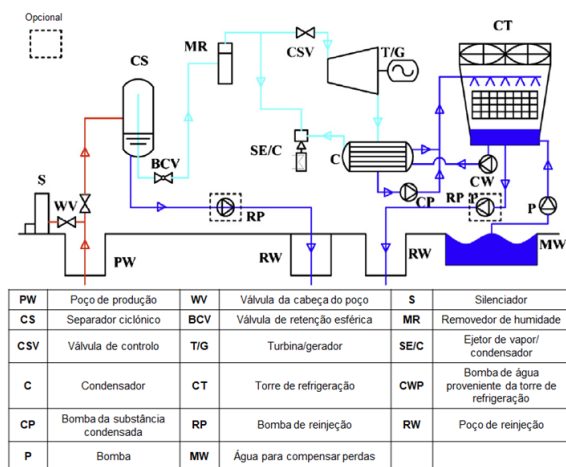


Figura 2.14: Central de *single flash*, adaptado de [14].

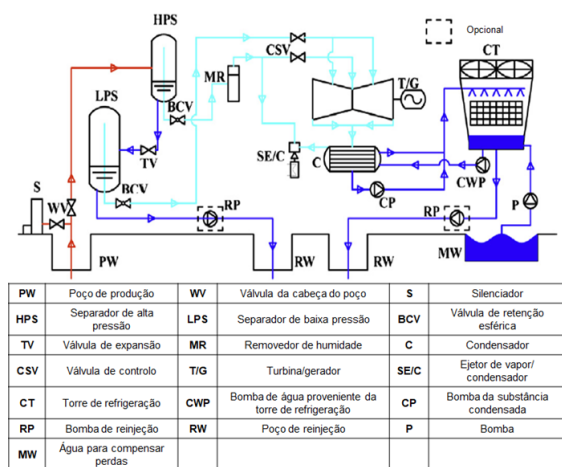


Figura 2.15: Central de *double flash*, adaptado de [14].

Em centrais de vapor *flash*, o fluido geotérmico está, predominantemente, na fase líquida.

Neste tipo de centrais, o fluido após ser extraído do poço de produção, passa por um separador (câmara de *flash*), onde o vapor de água saturado se separa do líquido saturado. Em seguida, o vapor expande na turbina, e passa pelo condensador, completando o ciclo.

Consoante a separação ocorre apenas numa câmara de *flash* (Figura 2.14) ou em duas câmaras em série (Figura 2.15), tem-se, respetivamente, centrais designadas por *single flash* ou *double flash*.

Centrais de ciclo binário

Como já foi mencionado, as centrais que operam com ciclo binário são utilizadas quando a entalpia do fluido geotérmico é baixa. O esquema de funcionamento destas centrais encontra-se representado na Figura 2.16.

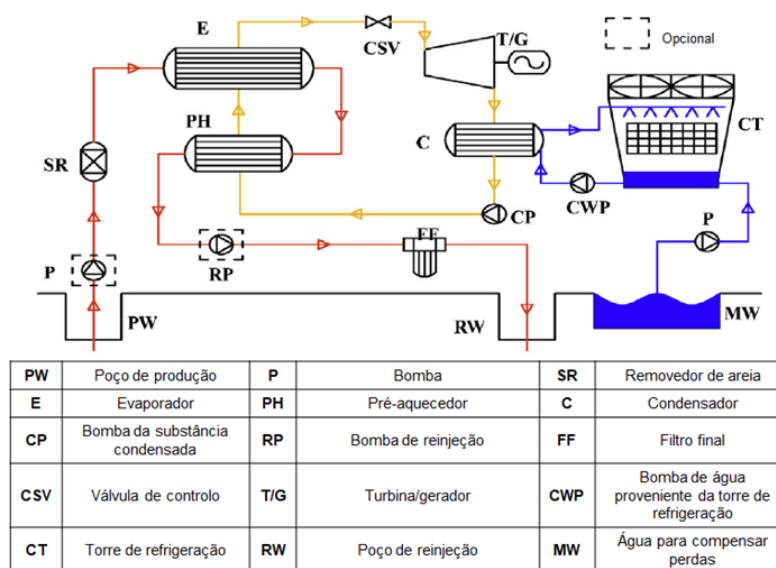


Figura 2.16: Central de ciclo binário, adaptado de [14].

Estas centrais funcionam com a utilização do Ciclo Orgânico de Rankine, o qual, ao contrário dos outros dois ciclos, utiliza o seu próprio fluido, sem que haja mistura com o fluido geotérmico. Este último, após a transferência de calor, é reencaminhado para o reservatório geotérmico através do poço de reinjeção.

As centrais das ilhas de São Miguel e Terceira funcionam com um ciclo binário.

O fluido do ciclo deve satisfazer diversas exigências, tais como [5, 16]:

1. Ser seguro e estável quimicamente;
2. Não ser corrosivo, tóxico e inflamável;
3. Possuir baixo ponto de ebulição;
4. Ter um calor latente e específico elevado;
5. Possuir densidade elevada tanto na fase líquida, como na fase gasosa;
6. Ter boas propriedades no que diz respeito à transferência de calor;

7. Estar disponível no mercado a baixo custo.

2.3.2 Processo de reinjeção

Em todas as centrais geotérmicas existentes, o processo de reinjeção é fundamental por diversas razões.

Com o passar dos anos e com a possível exploração excessiva da central, o reservatório geotérmico degrada-se, perdendo qualidades, como pressão e temperatura ideais, deixando de ser rentável a sua exploração. Com a implementação do poço de reinjeção, o fluido geotérmico, após percorrer o ciclo termodinâmico, é novamente injetado no reservatório, de forma a assegurar a pressão e a temperatura ótimas, tal como representado na Figura 2.17.

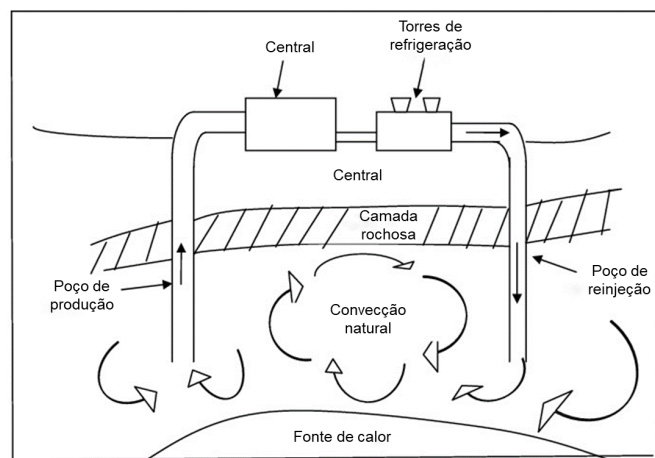


Figura 2.17: Poço de produção e poço de reinjeção numa central, adaptado de [17].

Para além disso, há que salientar o impacto ambiental da implementação de um poço de reinjeção, na medida em que, com este poço, ocorre também a injeção da maioria dos gases não condensáveis, como dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogénio (H_2S). Sendo a maioria dos gases reinjetados juntamente com o fluido geotérmico, a libertação de gases para a atmosfera é reduzida, sendo, por isso, considerada uma central limpa. É de acrescentar que, ao serem reinjetados, ajudam o reservatório a manter a sua pressão, melhoram a sua produtividade e inibem a formação de sílica [18].

É importante salientar que a localização dos poços é um dos parâmetros mais importantes do sistema de reinjeção, pelo que é fundamental aferir a localização dos poços de reinjeção relativamente aos poços de produção. Consoante as características do reservatório geotérmico, bem como do tipo de central a implementar, os poços podem estar próximos entre si, denominados por *infield*, ou afastados, por valores superiores a 2 km, designados por *outfield* [19].

Por fim, em relação à temperatura de reinjeção, esta apresenta um intervalo com limites inferiores e superiores um pouco rígidos, uma vez que [20]:

1. Pode ocorrer a formação de sílica, o que provoca danos nas condutas;
2. Pode prejudicar o processo de transferência de calor com o fluido de trabalho, comprometendo o rendimento de toda a central;

3. Pode degradar o reservatório geotérmico.

2.3.3 Degradação do reservatório geotérmico

Tal como mencionado, ao longo dos anos de vida da central geotérmica, devido à exploração do reservatório, os valores iniciais de pressão e temperatura alteram-se, impossibilitando o seu uso para a produção de eletricidade.

Todos os reservatórios possuem características ótimas para serem explorados, que variam consoante as zonas geográficas. Como tal, é necessário perceber quais são estas propriedades ideais e mantê-las durante o maior número de anos, para que a central esteja em constante funcionamento.

Existem centrais que exploram todos os seus poços ao máximo, tornando o tempo de recuperação do reservatório bastante superior ao tempo de exploração, acabando por esgotar o reservatório e tornando inviável a sua utilização. Há, porém, outras centrais onde se faz uma utilização rotativa dos diversos poços, evitando-se, deste modo, a sua sobre-exploração.

Um aspeto de grande relevância no que diz respeito à degradação dos poços é o controlo da temperatura no processo de reinjeção. Tal como já foi referido, a injeção de fluido a temperaturas muito baixas (inferiores a 70 °C) reduz a temperatura do reservatório, influenciando o comportamento do mesmo a longo prazo. Desta forma, é necessário haver um controlo rigoroso desta variável, de modo a preservar os poços geotérmicos.

3. Descrição e modelação do sistema

3.1 Central geotérmica em estudo

A central geotérmica em estudo, tal como referido anteriormente, foi analisada tendo por base a central geotérmica do Pico Alto. Esta possui três poços de produção (Figura 3.1) e um poço de reinjeção. Funciona com um ciclo binário, tendo o ciclopentano como fluido de trabalho.

Em cada um dos poços de produção, o fluido geotérmico à saída do poço vai para um separador, onde ocorre a separação entre vapor de água e *brine*. Em seguida, o *brine* de cada poço passa por uma bomba e, após ser misturado, entra no sistema de produção da central. As etapas de separação, mistura e entrada no sistema de produção acontecem, de forma semelhante, para o vapor de água.

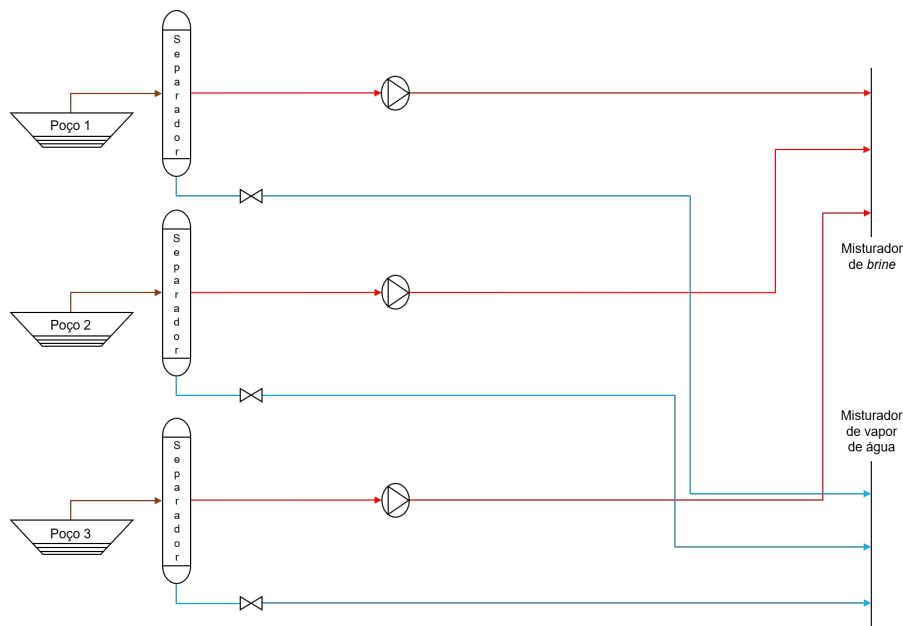


Figura 3.1: Esquema de separação e mistura dos três poços de produção da central geotérmica em estudo.

De acordo com as condições de projeto da central geotérmica do Pico Alto, foi feita a modelação da central geotérmica em estudo, representada na Figura 3.2.

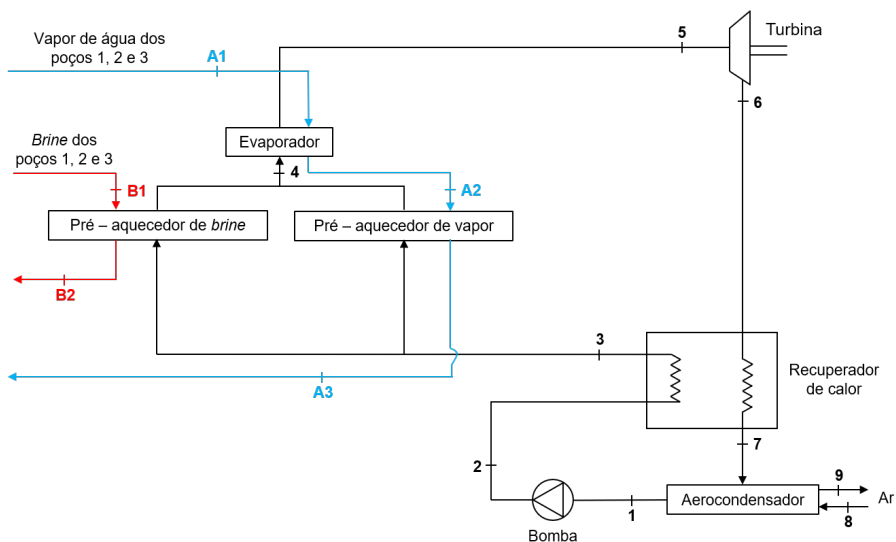


Figura 3.2: Esquema de funcionamento da central geotérmica em estudo.

Como mostra a Figura 3.2, o fluido geotérmico transfere energia, sob a forma de calor, para o fluido do ciclo, no evaporador e em dois pré-aquecedores. Após a passagem por estes permutadores, o fluido geotérmico vai para o poço de reinjeção.

Quanto ao fluido de trabalho, após receber calor do fluido geotérmico, passa por uma turbina radial, onde se dá uma expansão do fluido, com redução de pressão e entalpia. Em seguida, segue para um recuperador de calor, onde se faz um pré-aquecimento antes de entrar nos permutadores já referidos. O ciclo transfere energia, na forma de calor, para o exterior, num aerocôndensador com convecção forçada de ar.

Para melhor compreensão da Figura 3.2 e da seção que se segue, foi feito um esboço do diagrama $T-s$ da central em estudo (Figura 3.3).

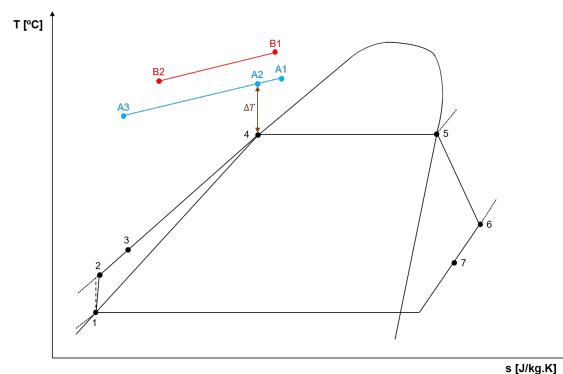


Figura 3.3: Diagrama $T-s$ da central geotérmica em estudo.

3.2 Modelação e simulação

3.2.1 Análise termodinâmica

Para a implementação do algoritmo desenvolvido, foram realizadas análises energéticas e exérgicas não só a nível de cada componente, mas também a nível global, utilizando as equações dos balanços integrais de massa, energia e exergia [21]:

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho dV + \iint \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt} \iiint (u + \frac{V^2}{2} + gz) \rho dV + \iint (h + \frac{V^2}{2} + gz) \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (3.2)$$

$$\iint \dot{q} (1 - \frac{T_0}{T_b}) dA - (\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}) - \dot{E}_d = \frac{d}{dt} \iiint e \rho dV + \iint e_f \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (3.3)$$

em que

$$e = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (3.4)$$

$$e_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (3.5)$$

$$\dot{E}_d = T_0 \dot{\sigma} \quad (3.6)$$

onde \dot{E}_d corresponde à taxa de destruição de exergia, T_0 diz respeito à temperatura do estado morto (igual à temperatura ambiente exterior) e $\dot{\sigma}$ é a taxa de produção de entropia devido a irreversibilidades internas.

Assumindo que os componentes funcionam em regime estacionário, adiabático e desprezando as contribuições de energia potencial e cinética, as equações anteriores simplificam-se:

$$\iint \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3.7)$$

$$-\dot{W} = \iint h \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (3.8)$$

$$-\dot{W} - \dot{E}_d = \iint e_f \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (3.9)$$

Bomba

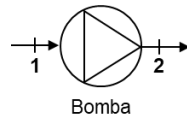


Figura 3.4: Esquema da bomba.

$$-\dot{W}_B = \dot{m}_{FT}(h_2 - h_1) \quad (3.10)$$

$$-\dot{W}_B - \dot{E}_d = \dot{m}_{FT}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)] \quad (3.11)$$

$$\eta_B = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.12)$$

com

$$h_{2s} = h_1 + v_1(p_2 - p_1) \quad (3.13)$$

onde \dot{m}_{FT} é o caudal mássico do fluido de trabalho. Substituindo a Equação 3.10 em 3.11, obtém-se:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{FT} T_0 (s_2 - s_1) \quad (3.14)$$

Recuperador de calor

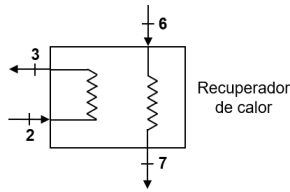


Figura 3.5: Esquema do recuperador de calor.

$$h_3 - h_2 = h_6 - h_7 \quad (3.15)$$

$$-\dot{E}_d = \dot{m}_{FT} [(h_3 - h_2) - T_0(s_3 - s_2) + (h_7 - h_6) - T_0(s_7 - s_6)] \quad (3.16)$$

$$\eta_R = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (3.17)$$

Substituindo a Equação 3.15 em 3.16, obtém-se:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{FT} T_0 [(s_3 - s_2) + (s_7 - s_6)] \quad (3.18)$$

Pré-aquecedor de vapor

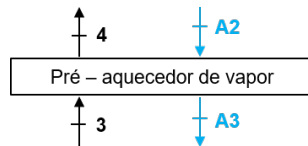


Figura 3.6: Esquema do pré-aquecedor de vapor.

$$x_1 \dot{m}_{FT} (h_4 - h_3) = \dot{m}_{A1} (h_{A2} - h_{A3}) \quad (3.19)$$

$$-\dot{E}_d = x_1 \dot{m}_{FT} [(h_4 - h_3) - T_0(s_4 - s_3)] + \dot{m}_{A1} [(h_{A3} - h_{A2}) - T_0(s_{A3} - s_{A2})] \quad (3.20)$$

onde x_1 é a fração de caudal mássico do fluido do ciclo que passa pelo pré-aquecedor de vapor. Substituindo a Equação 3.19 em 3.20, obtém-se:

$$\dot{E}_d = T_0[x_1\dot{m}_{FT}(s_4 - s_3) + \dot{m}_{A1}(s_{A3} - s_{A2})] \quad (3.21)$$

Pré-aquecedor de *brine*

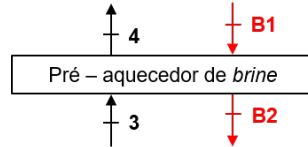


Figura 3.7: Esquema do pré-aquecedor de *brine*.

$$x_2\dot{m}_{FT}(h_4 - h_3) = \dot{m}_{B1}(h_{B1} - h_{B2}) \quad (3.22)$$

$$-\dot{E}_d = x_2\dot{m}_{FT}[(h_4 - h_3) - T_0(s_4 - s_3)] + \dot{m}_{B1}[(h_{B2} - h_{B1}) - T_0(s_{B2} - s_{B1})] \quad (3.23)$$

onde x_2 é a fração de caudal mássico do fluido do ciclo que passa pelo pré-aquecedor de *brine*, sendo $x_1 + x_2 = 1$. Substituindo a Equação 3.22 em 3.23, obtém-se:

$$\dot{E}_d = T_0[x_2\dot{m}_{FT}(s_4 - s_3) + \dot{m}_{B1}(s_{B2} - s_{B1})] \quad (3.24)$$

Evaporador

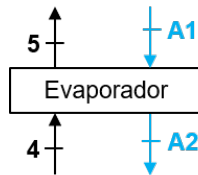


Figura 3.8: Esquema do evaporador.

$$\dot{m}_{FT}(h_5 - h_4) = \dot{m}_{A1}(h_{A1} - h_{A2}) \quad (3.25)$$

$$-\dot{E}_d = \dot{m}_{FT}[(h_5 - h_4) - T_0(s_5 - s_4)] + \dot{m}_{A1}[(h_{A2} - h_{A1}) - T_0(s_{A2} - s_{A1})] \quad (3.26)$$

Substituindo a Equação 3.25 em 3.26, obtém-se:

$$\dot{E}_d = T_0[\dot{m}_{FT}(s_5 - s_4) + \dot{m}_{A1}(s_{A2} - s_{A1})] \quad (3.27)$$

Turbina

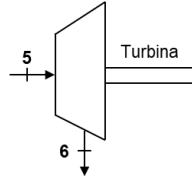


Figura 3.9: Esquema da turbina.

$$-\dot{W}_T = \dot{m}_{FT}(h_6 - h_5) \quad (3.28)$$

$$-\dot{W}_T - \dot{E}_d = \dot{m}_{FT}[(h_6 - h_5) - T_0(s_6 - s_5)] \quad (3.29)$$

$$\eta_T = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}} \quad (3.30)$$

Substituindo a Equação 3.28 em 3.29, obtém-se:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{FT}T_0(s_6 - s_5) \quad (3.31)$$

Aerocondensador

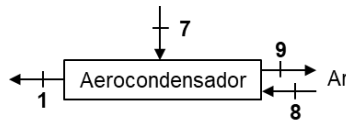


Figura 3.10: Esquema do aerocondensador.

$$-\dot{W}_C = \dot{m}_{FT}(h_1 - h_7) + \dot{m}_{ar}(h_9 - h_8) \quad (3.32)$$

$$-\dot{W}_C - \dot{E}_d = \dot{m}_{FT}[(h_1 - h_7) - T_0(s_1 - s_7)] + \dot{m}_{ar}[(h_9 - h_8) - T_0(s_9 - s_8)] \quad (3.33)$$

Substituindo a Equação 3.32 em 3.33, obtém-se:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{FT}T_0(s_1 - s_7) + \dot{m}_{ar}T_0(s_9 - s_8) \quad (3.34)$$

Se for tido em consideração as curvas características do ventilador (altura de aspiração disponível

H e rendimento em função do caudal mássico), e sabendo que $|\dot{W}_C| = \dot{m}_{ar}gH/\eta$, é possível obter:

$$\frac{|\dot{W}_C|}{|\dot{W}_{C_{nom}}|} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{ar_{nom}}} \frac{H}{H_{nom}} \frac{\eta_{nom}}{\eta} \quad (3.35)$$

Como não houve acesso à informação sobre as curvas características do ventilador, admitiu-se que está a funcionar próximo das condições nominais, ou seja, $H\eta_{nom}/H_{nom}\eta \approx 1$, obtendo-se:

$$|\dot{W}_C| = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{ar_{nom}}} |\dot{W}_{C_{nom}}| \quad (3.36)$$

em que $\dot{W}_{C_{nom}} = 44 \text{ kW}$ e $\dot{m}_{ar_{nom}} = 2800 \text{ kg/s}$.

Considerando o ar como gás perfeito e sabendo que à entrada do aerocondensador está nas condições ambientes exteriores, obtém-se:

$$s_9 - s_8 = C_{p_{ar}} \ln\left(\frac{T_9}{T_{amb}}\right) - R \ln\left(\frac{p_9}{p_{amb}}\right) \quad (3.37)$$

Desprezando as perdas de carga, $p_9 = p_{amb}$, pelo que:

$$s_9 - s_8 = C_{p_{ar}} \ln\left(\frac{T_9}{T_{amb}}\right) \quad (3.38)$$

De modo a determinar a variação de temperatura do ar, recorre-se, mais uma vez, ao balanço energético:

$$-\dot{W}_C = \dot{m}_{FT}(h_1 - h_7) + \dot{m}_{ar}C_{p_{ar}}(T_9 - T_{amb}) \quad (3.39)$$

Reorganizando a equação, obtém-se:

$$\frac{T_9}{T_{amb}} = 1 + \frac{|\dot{W}_C| + \dot{m}_{FT}(h_7 - h_1)}{\dot{m}_{ar}C_{p_{ar}}T_{amb}} \quad (3.40)$$

Substituindo as Equações 3.38 e 3.40 em 3.34, conclui-se:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{FT}T_0(s_1 - s_7) + \dot{m}_{ar}T_0C_{p_{ar}} \ln\left[1 + \frac{|\dot{W}_C| + \dot{m}_{FT}(h_7 - h_1)}{\dot{m}_{ar}C_{p_{ar}}T_{amb}}\right] \quad (3.41)$$

Reinjeção

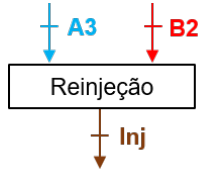


Figura 3.11: Esquema do processo de reinjeção.

$$\dot{m}_{A1}h_{A3} + \dot{m}_{B1}h_{B2} = (\dot{m}_{A1} + \dot{m}_{B1})h_{inj} \quad (3.42)$$

Análise global

A nível global, as equações dos balanços energéticos e exergéticos são as seguintes:

$$\dot{W}_{ciclo} = \dot{m}_{A1}(h_{A1} - h_{A3}) + \dot{m}_{B1}(h_{B1} - h_{B2}) + \dot{m}_{ar}(h_8 - h_9) \quad (3.43)$$

$$\dot{E}_{d_{ciclo}} = T_0[\dot{m}_{A1}(s_{A3} - s_{A1}) + \dot{m}_{B1}(s_{B2} - s_{B1}) + \dot{m}_{ar}(s_9 - s_8)] \quad (3.44)$$

com

$$\dot{W}_{ciclo} = |\dot{W}_T| - |\dot{W}_B| - |\dot{W}_C| \quad (3.45)$$

$$\dot{E}_{d_{ciclo}} = \sum \dot{E}_{d_i} \quad (3.46)$$

onde \dot{W}_T , \dot{W}_B e \dot{W}_C correspondem às potências da turbina, da bomba e do aerocondensador, respetivamente, e \dot{E}_{d_i} corresponde à taxa de destruição de exergia de cada componente.

Desta forma, pode-se definir o rendimento energético e exergético como:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.47)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{E}_{in}} \quad (3.48)$$

em que \dot{Q}_{in} e \dot{E}_{in} são definidos do seguinte modo:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{A1}(h_{A1} - h_{A3}) + \dot{m}_{B1}(h_{B1} - h_{B2}) \quad (3.49)$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{A1}[h_{A1} - h_{A3} - T_0(s_{A1} - s_{A3})] + \dot{m}_{B1}[h_{B1} - h_{B2} - T_0(s_{B1} - s_{B2})] \quad (3.50)$$

Cálculo do rendimento da turbina

Como o principal objetivo desta dissertação é compreender o comportamento da central geotérmica tendo em conta a degradação dos poços, as condições de funcionamento da turbina variam no tempo. Em [22] é sugerido um método de cálculo do rendimento da turbina em condições não nominais, η_{T-off} , em função do caudal mássico do fluido de trabalho também não nominal, \dot{m}_{in-off} :

$$p_{in-off} = \sqrt{\dot{m}_{in-off}^2 \times T_{in-off} \times Y_d + p_{out-off}^2} \quad (3.51)$$

em que

$$Y_d = \frac{p_{in-d}^2 - p_{out-d}^2}{p_{in-d}^2 \times \phi_d^2} \quad (3.52)$$

$$\phi_d^2 = \frac{\dot{m}_d \times \sqrt{T_d}}{p_{in-d}} \quad (3.53)$$

onde Y_d é a constante de Stodola e ϕ é um coeficiente de caudal mássico. A Equação 3.51 ainda pode ser escrita na forma:

$$\dot{m}_{in-off} = \sqrt{\frac{p_{in-off}^2 - p_{out-off}^2}{T_{in-off} \times Y_d}} \quad (3.54)$$

Por último, é definida uma expressão que permite o cálculo do rendimento da turbina quando a mesma funciona em condições não nominais:

$$\eta_{off} = \eta_d \sin[0,5\pi \left(\frac{\dot{m}_{in-off}}{\dot{m}_{in-d}} \frac{\rho_{in-d}}{\rho_{in-off}} \right)^{0,1}] \quad (3.55)$$

3.2.2 Condições impostas e dados adquiridos

Para a inicialização da rotina de cálculo, foram assumidos os valores que constam da Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros assumidos no algoritmo.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Rendimento isentrópico da turbina (1ª iteração)	η_T [%]	85
Rendimento isentrópico da bomba	η_B [%]	85
Rendimento do recuperador de calor	η_R [%]	68
Temperatura de reinjeção mínima	T_{injmin} [°C]	70
Temperatura ambiente	T_{amb} [°C]	17,1
Pressão ambiente	p_{amb} [bar]	1
Anos de vida da central geotérmica	n	30

Foram também assumidas as seguintes hipóteses:

1. As perdas de carga nas condutas e nos permutadores de calor foram consideradas desprezáveis;
2. Não se considerou a presença de gases não condensáveis;
3. Considerou-se que o rendimento do gerador acoplado à turbina era igual a 100%;
4. As propriedades do fluido geotérmico foram assumidas como sendo as da água.

Os dados que foram utilizados como exemplo neste estudo estão expostos na Tabela 3.2, fornecidos pela empresa EDP, S.A.

Tabela 3.2: Dados iniciais utilizados no algoritmo.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Pressão no ponto 1	p_1 [bar]	0,66
Pressão no ponto A1	p_{A1} [bar]	5,50
Pressão no ponto A2	p_{A2} [bar]	5,46
Pressão no ponto A3	p_{A3} [bar]	5,41
Pressão no ponto B1	p_{B1} [bar]	10,00
Pressão no ponto B2	p_{B2} [bar]	8,99
Caudal mássico no ponto A1	\dot{m}_{A1} [kg/s]	9,1
Caudal mássico no ponto B1	\dot{m}_{B1} [kg/s]	14,4
Temperatura no ponto A1	T_{A1} [°C]	159,5
Temperatura no ponto B1	T_{B1} [°C]	174,8

Relativamente à degradação dos poços geotérmicos, seguiu-se a abordagem de Budisulistyo *et al.* [22], ou seja, analisou-se a evolução no tempo da central, considerando os seguintes anos: 1, 7, 16 e 30. No cenário de degradação adotado, há um decréscimo de 0,1 °C/ano da temperatura do fluido geotérmico à entrada da central, bem como um decréscimo do seu caudal mássico para 75% do valor inicial no ano 7, e para 65% do valor inicial a partir do ano 16 (Figura 3.12).

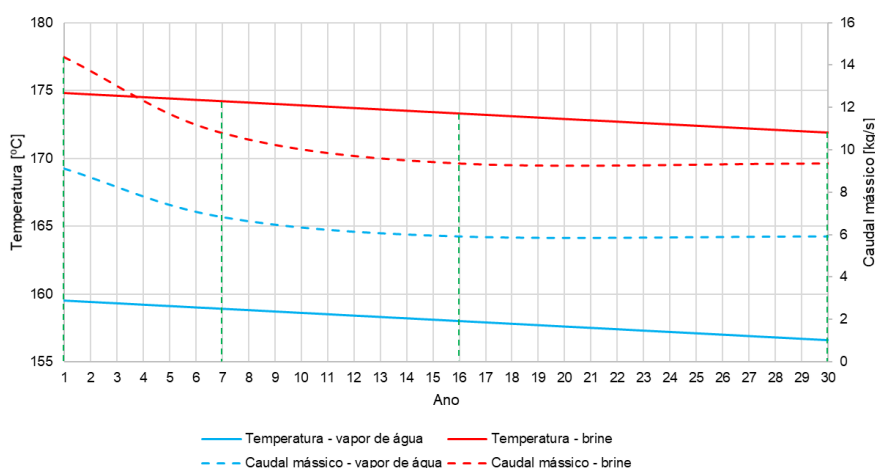


Figura 3.12: Temperatura e caudal mássico de vapor de água (ponto A1) e brine (ponto B1) em função dos anos de vida da central geotérmica.

3.2.3 Descrição do algoritmo

Para simular a degradação dos poços geotérmicos da central, foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB, impondo as condições referidas nas Tabelas 3.1 e 3.2. Além disso, recorreu-se a uma biblioteca online, CoolProp [23], de modo a obter as propriedades de ambos os fluidos (fluido geotérmico e fluido de trabalho), nas secções indicadas na Figura 3.2.

O objetivo principal do algoritmo (Figura 3.13) consiste no cálculo da potência útil do ciclo, taxa de destruição de exergia e rendimento energético e exergético.

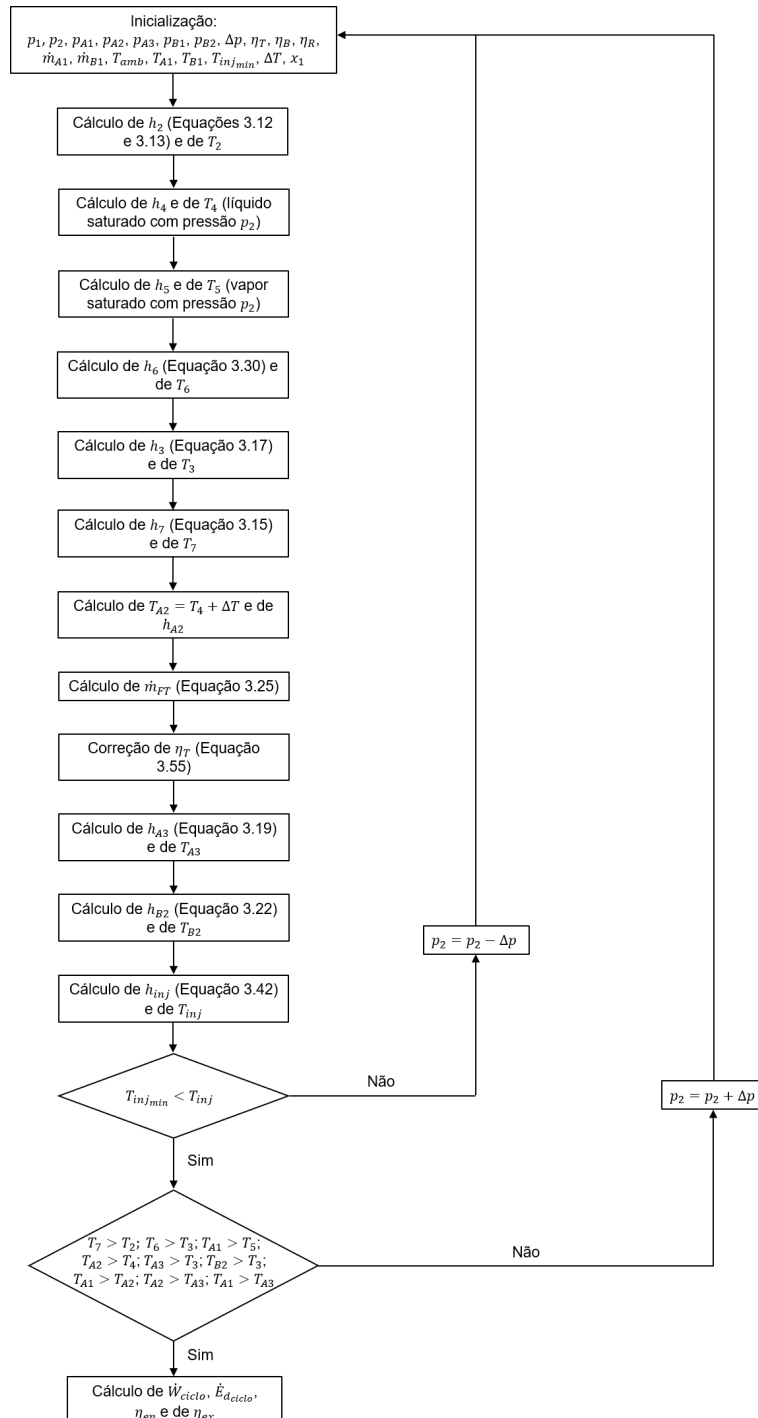


Figura 3.13: Algoritmo desenvolvido em MATLAB.

4. Resultados

No presente capítulo estuda-se a degradação dos poços geotérmicos e faz-se uma análise de sensibilidade ao valor da pressão p_2 e aos graus de sobreaquecimento ΔT_{sa} .

No estudo da degradação compara-se, ao longo do tempo de vida da central, o atual fluido de trabalho (ciclopentano) com o R141b e o n-Pentano. Estes últimos dois fluidos foram escolhidos por terem sido referenciados por Aali *et al.* [16] e Hettiarachchi *et al.* [5], como bons fluidos de trabalho, por apresentarem bons resultados em centrais geotérmicas, nomeadamente nas variáveis potência útil do ciclo, rendimento energético e rendimento exergético.

Em ambas as análises de sensibilidade considera-se apenas o ciclopentano no primeiro ano de funcionamento da central geotérmica.

4.1 Degradação dos poços geotérmicos

Tal como indicado na Figura 3.13, é necessário inicializar o algoritmo com uma pressão p_2 que valide todas as condições impostas, tendo em conta os dados iniciais referidos na Tabela 3.2. Assim sendo, a pressão p_2 utilizada na central é de 6,55 bar.

Para que a central opere com os melhores parâmetros, é feita uma análise aos valores de ΔT e x_1 no ano 1. Os valores obtidos apresentam-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Variação de ΔT e x_1 para o ciclopentano no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 6,55 bar.

	x_1								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{W}_{ciclo} = 4,2\text{ MW}$ $\eta_{en} = 14,7\%$ $\eta_{ex} = 49,1\%$ $T_{inj} = 70,0\text{ }^\circ\text{C}$	4,2 MW 14,7% 48,8% 70,0 °C	4,2 MW 14,7% 49,0% 70,0 °C	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{W}_{ciclo} = 4,4\text{ MW}$ $\eta_{en} = 15,2\%$ $\eta_{ex} = 50,9\%$ $T_{inj} = 70,0\text{ }^\circ\text{C}$	4,4 MW 15,2% 50,4% 70,0 °C	4,4 MW 15,2% 50,5% 70,0 °C	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 19\text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{W}_{ciclo} = 4,4\text{ MW}$ $\eta_{en} = 15,3\%$ $\eta_{ex} = 51,3\%$ $T_{inj} = 74,1\text{ }^\circ\text{C}$	4,6 MW 15,9% 53,2% 70,2 °C	4,6 MW 15,9% 53,0% 70,2 °C	4,0 MW 14,2% 47,1% 80,1 °C	-	-	-	-	-

Da Tabela 4.1 pode-se concluir que os valores de ΔT e x_1 que maximizam a potência útil do ciclo e os rendimentos são 19 °C e 0,2, respetivamente. Estes valores serão mantidos em toda a análise da

degradação dos poços. Nesta tabela, Tabela 4.1, e nas Tabelas 4.2 e 4.3, a ausência de resultados significa que não foi possível satisfazer as restrições de temperatura.

A Tabela 4.2 mostra os resultados para o R141b, tendo-se chegado à conclusão que a pressão p_2 máxima admissível é de 4,80 bar. Para este fluido, baseado nesta tabela, escolheu-se um x_1 de 0,3.

Tabela 4.2: Variação de x_1 para o R141b no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 4,80 bar.

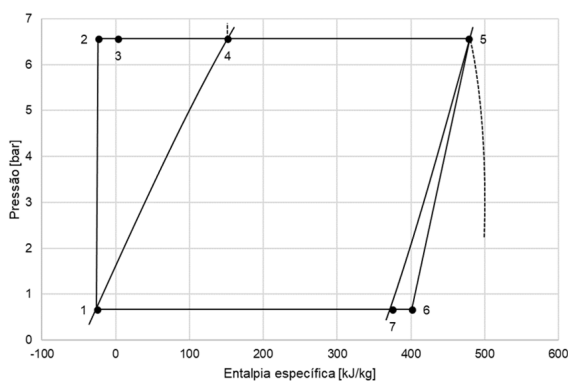
	x_1								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 19\text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{W}_{ciclo} = 3,8\text{ MW}$ $\eta_{en} = 13,1\%$ $\eta_{ex} = 43,6\%$ $T_{inj} = 70,1\text{ }^\circ\text{C}$	3,8 MW 13,1% 43,5% 70,1 °C	3,8 MW 13,1% 43,8% 70,1 °C	-	-	-	-	-	-

A Tabela 4.3 mostra os resultados para o n-Pentano, tendo-se chegado à conclusão que o valor máximo da pressão p_2 é de 4,15 bar e que x_1 é de 0,3.

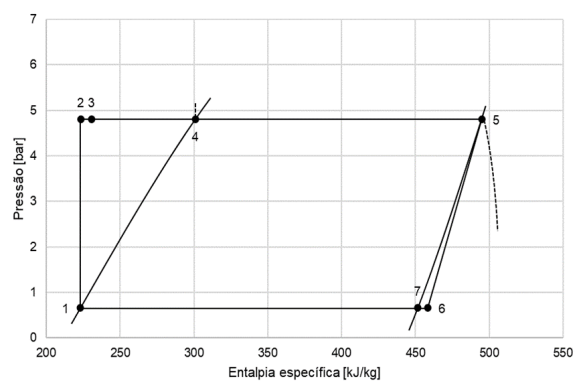
Tabela 4.3: Variação de x_1 para o n-Pentano no ano 1, para uma pressão máxima do ciclo de 4,15 bar.

	x_1								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta T = 19\text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{W}_{ciclo} = 3,7\text{ MW}$ $\eta_{en} = 12,9\%$ $\eta_{ex} = 43,0\%$ $T_{inj} = 70,1\text{ }^\circ\text{C}$	3,7 MW 12,9% 42,9% 70,1 °C	3,7 MW 12,9% 43,2% 70,1 °C	-	-	-	-	-	-

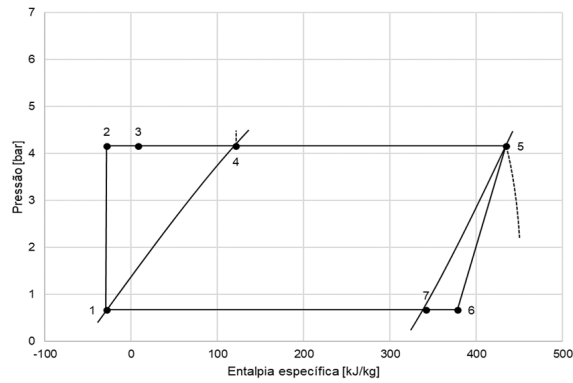
Na Figura 4.1, respeitante ao diagrama $p-h$ de cada fluido de trabalho no ano 1, assume-se uma pressão p_2 de 6,55 bar, 4,80 bar e 4,15 bar para o ciclopentano, R141b e n-Pentano, respetivamente.



(a) Ciclopentano.



(b) R141b.



(c) n-Pentano.

Figura 4.1: Diagrama $p-h$ no ano 1.

Como é possível observar, os pontos 1, 6 e 7 apresentam a mesma pressão: pressão p_1 ; já os pontos 2, 3, 4 e 5 possuem uma pressão diferente, pressão p_2 . De acordo com a figura, tem-se que os pontos 1 e 4, correspondentes à entrada da bomba e à entrada do evaporador, respectivamente, apresentam condições de líquido saturado, contrariamente ao ponto 5, entrada da turbina, que apresenta condições de vapor saturado.

Desta figura, pode-se concluir que o ciclopentano, por possuir uma maior pressão p_2 , irá ter uma maior expansão na turbina, apresentando, conseqüentemente, uma maior potência útil do ciclo.

As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 mostram, para o ano 1, as condições de funcionamento do fluido de trabalho e do fluido geotérmico, nos três ciclos que se irá comparar.

Tabela 4.4: Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o ciclopentano como fluido do ciclo.

(a) Ciclopentano.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
1	36,7	0,66	60,7	-23,9	-75,6
2	37,0	6,55	60,7	-23,0	-75,1
3	50,9	6,55	60,7	3,6	8,7
4	120,3	6,55	60,7	152,5	423,7
5	120,3	6,55	60,7	479,0	1253,6
6	57,4	0,66	60,7	401,8	1295,5
7	37,3	0,66	60,7	375,2	1212,6

(b) Fluido geotérmico.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
A1	159,5	5,50	9,1	2762,1	6811,3
A2	139,3	5,46	9,1	586,3	1731,9
A3	92,5	5,41	9,1	387,9	1221,4
B1	174,8	10,00	14,4	740,2	2088,5
B2	56,6	8,99	14,4	237,8	788,1

Tabela 4.5: Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o R141b como fluido do ciclo.

(a) R141b.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
1	20,3	0,66	109,1	223,1	1081,4
2	20,5	4,80	109,1	223,5	1081,6
3	26,6	4,80	109,1	230,5	1105,3
4	85,2	4,80	109,1	301,1	1320,0
5	85,2	4,80	109,1	495,3	1861,8
6	29,5	0,66	109,1	458,6	1883,5
7	20,5	0,66	109,1	451,5	1859,9

(b) Fluido geotérmico.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
A1	159,5	5,50	9,1	2762,1	6811,3
A2	104,2	5,46	9,1	437,4	1354,5
A3	43,8	5,41	9,1	184,0	623,0
B1	174,8	10,00	14,4	740,2	2088,5
B2	87,2	8,99	14,4	365,9	1159,8

Tabela 4.6: Propriedades do fluido de trabalho e do fluido geotérmico no ano 1, considerando o n-Pentano como fluido do ciclo.

(a) n-Pentano.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
1	24,0	0,66	67,7	-28,3	-93,2
2	24,1	4,15	67,7	-27,6	-92,9
3	39,5	4,15	67,7	8,3	25,1
4	84,8	4,15	67,7	121,9	363,9
5	84,8	4,15	67,7	435,1	1239,0
6	46,7	0,66	67,7	378,3	1270,6
7	26,0	0,66	67,7	342,4	1154,3

(b) Fluido geotérmico.

Pontos	T [°C]	p [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
A1	159,5	5,50	9,1	2762,1	6811,3
A2	103,8	5,46	9,1	435,5	1349,6
A3	43,5	5,41	9,1	182,6	618,4
B1	174,8	10,00	14,4	740,2	2088,5
B2	87,3	8,99	14,4	366,5	1161,5

Relativamente à taxa de destruição de exergia, de acordo com a Figura 4.2, o componente que apresenta um valor mais elevado para todos os fluidos de trabalho é o evaporador, porque é aí que há maiores diferenças de temperatura entre o fluido geotérmico e o fluido de trabalho.

É de salientar que os componentes com maior taxa de destruição de exergia requerem uma especial atenção no seu projeto, uma vez que são os que mais influenciam o rendimento exergético de toda a central [24].

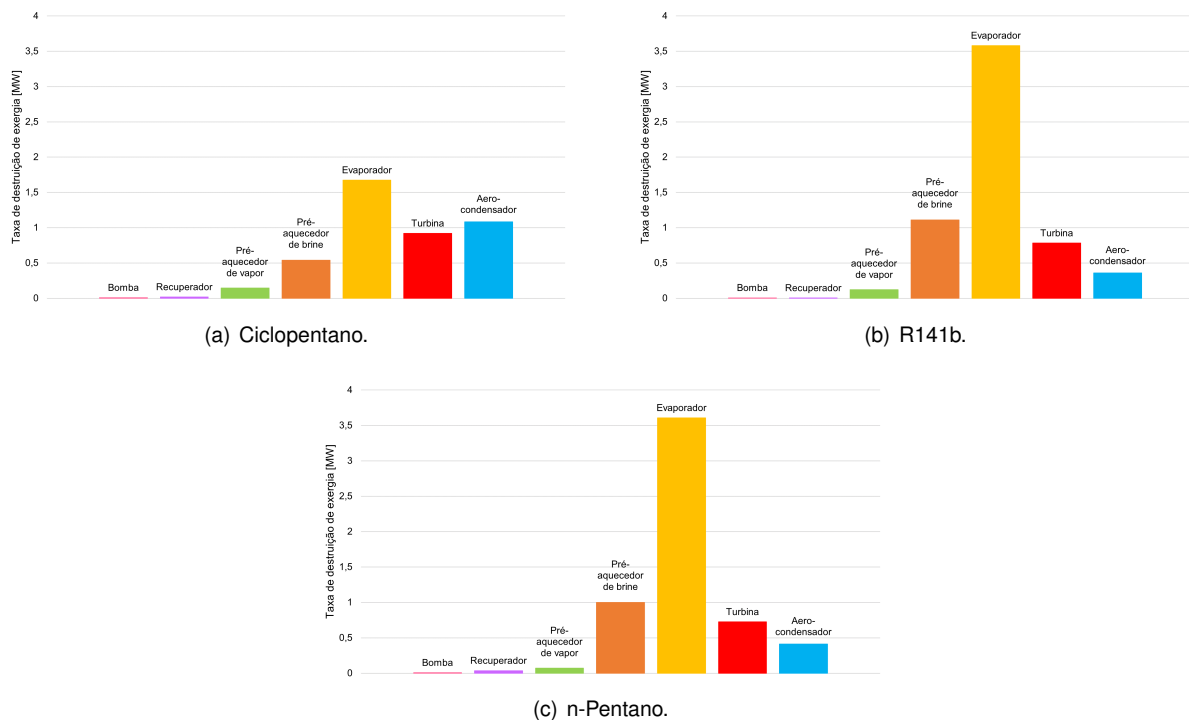


Figura 4.2: Taxa de destruição de exergia dos componentes no ano 1.

Devido à variação das condições do fluido geotérmico, os valores da pressão p_2 variam ao longo do tempo, como mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Variação da pressão máxima do ciclo ao longo dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.

	Ano 1	Ano 7	Ano 16	Ano 30
Ciclopentano	$p_2 = 6,55$ bar	6,50 bar	6,45 bar	6,35 bar
R141b	$p_2 = 4,80$ bar	4,75 bar	4,70 bar	4,60 bar
n-Pentano	$p_2 = 4,15$ bar	4,10 bar	4,05 bar	4,00 bar

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a evolução no tempo da potência útil do ciclo e do rendimento energético e exergetico. A degradação dos poços implica também uma degradação das condições de funcionamento da central, entre valores de [36,3; 37,1]% para a potência útil do ciclo, [1,3; 1,9]% para o rendimento energético e [1,2; 2,1]% para o rendimento exergetico. Outra conclusão que se pode retirar é que o ciclopentano, para as condições de funcionamento desta central, é a escolha mais adequada.

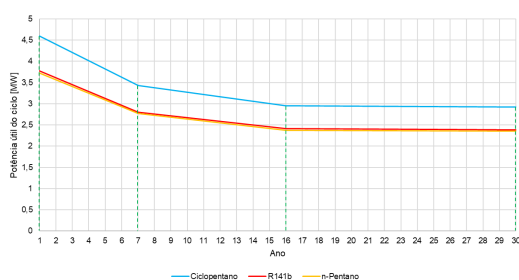


Figura 4.3: Potência útil do ciclo em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.

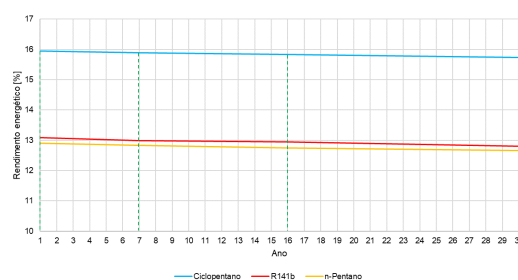


Figura 4.4: Rendimento energético em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.

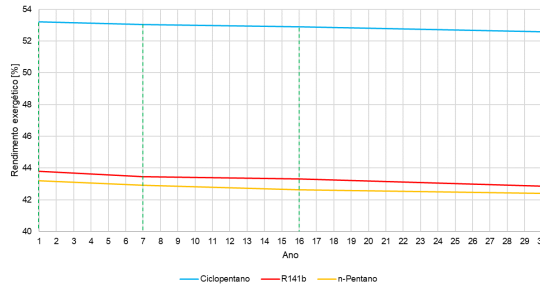


Figura 4.5: Rendimento exergético em função dos anos de vida da central geotérmica, para os fluidos de trabalho em análise.

4.2 Análise de sensibilidade

4.2.1 Efeito da variação da pressão máxima do ciclo

Como se referiu anteriormente, esta análise foi feita apenas para o ciclopentano no primeiro ano de vida da central. Fez-se variar a pressão p_2 no intervalo $2,0 \text{ bar} \leq p_2 \leq 15,0 \text{ bar}$ e o *pinch point* no intervalo $4 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 19 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo em conta a restrição $\Delta T \leq T_{A1} - T_{sat}(p_2)$. Para cada valor da pressão p_2 escolheu-se o valor do *pinch point* que maximiza a potência útil do ciclo. Nesta escolha só se satisfaz a restrição da temperatura de reinjeção mínima quando foi possível fazê-lo. Considerou-se sempre um x_1 de 0,2 (obtido na Tabela 4.1).

4.2.2 Efeito do sobreaquecimento

Na análise de sensibilidade aos graus de sobreaquecimento ΔT_{sa} , o procedimento explicado anteriormente é repetido, mas para um ΔT_{sa} de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (na análise anterior considerou-se $\Delta T_{sa} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

As figuras que se seguem apresentam os resultados das duas análises de sensibilidade.

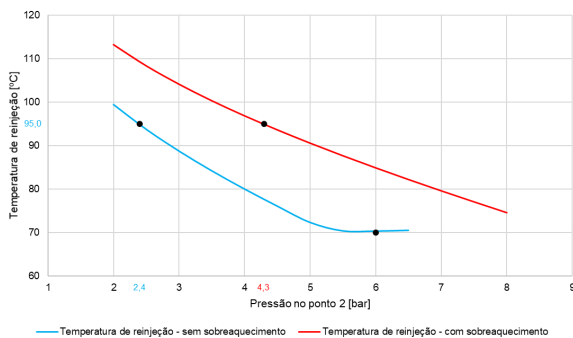


Figura 4.6: Temperatura de reinjeção em função da pressão máxima do ciclo.

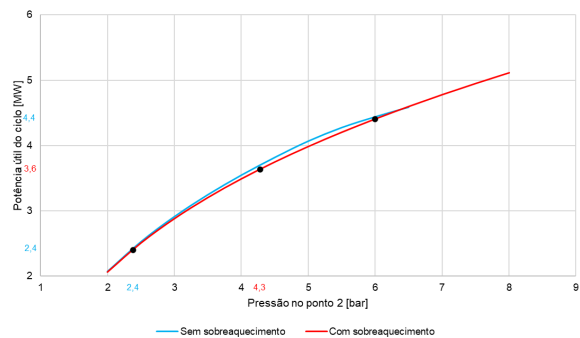


Figura 4.7: Potência útil do ciclo em função da pressão máxima do ciclo.

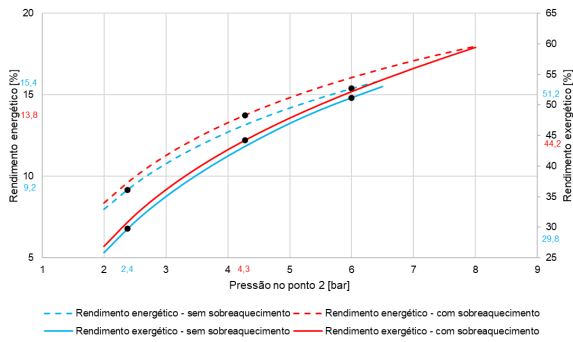


Figura 4.8: Rendimento energético e exergético em função da pressão máxima do ciclo.

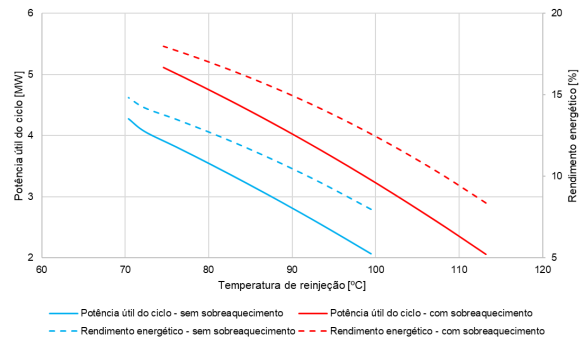


Figura 4.9: Potência útil do ciclo e rendimento energético em função da temperatura de reinjeção.

A análise de sensibilidade permite chegar a duas conclusões gerais:

1. A potência útil do ciclo e o rendimento energético e exergético melhoram com o aumento da pressão p_2 à entrada da turbina, havendo um limite máximo para esta pressão devido à necessidade de garantir uma temperatura de reinjeção mínima;
2. Com sobreaquecimento o ciclo apresenta melhores resultados do que sem sobreaquecimento.

Analisa-se em seguida cada uma das figuras dos resultados da análise de sensibilidade:

1. A Figura 4.6 mostra que a temperatura de reinjeção diminui com o aumento da pressão p_2 , como seria de esperar, porque o aumento da pressão p_2 implica maior expansão do fluido na turbina, maior potência útil do ciclo e, portanto, maior potência calorífica extraída ao fluido geotérmico, ou seja, a temperatura deste fluido diminui à saída do ciclo. Esta figura também mostra que, com sobreaquecimento, o valor da temperatura de reinjeção mínima estabelecida ($T_{inj\ min} = 70\ ^\circ\text{C}$) não impõe limitações à pressão p_2 , enquanto que para uma temperatura de reinjeção mínima de $95\ ^\circ\text{C}$, o valor máximo da pressão à entrada da turbina é de 4,3 bar. Sem sobreaquecimento obtém-se uma pressão p_2 máxima de 6,0 bar para uma temperatura de reinjeção mínima de $70\ ^\circ\text{C}$ e uma pressão p_2 máxima de 2,4 bar para uma temperatura de reinjeção mínima de $95\ ^\circ\text{C}$;
2. A Figura 4.7 mostra que a potência útil do ciclo aumenta com a pressão p_2 . Comparando o ciclo com e sem sobreaquecimento, verifica-se também que os valores da potência útil do ciclo pouco variam, no máximo de 2,1%, considerando a mesma pressão p_2 . No entanto, o domínio de valores possíveis para a pressão p_2 associado à restrição do valor da temperatura de reinjeção mínima estabelecida é superior no caso com sobreaquecimento, o que faz com que, neste caso, o valor máximo da potência útil do ciclo seja de 5,1 MW, enquanto que, sem sobreaquecimento, o máximo da potência útil é 4,4 MW. Um valor de $95\ ^\circ\text{C}$ para a temperatura de reinjeção mínima penaliza ambos os ciclos, mas mais o ciclo sem sobreaquecimento obtendo-se, respetivamente, valores máximos para a potência útil do ciclo de 3,6 MW e 2,4 MW, ou seja, um decréscimo relativo de 29,4% com sobreaquecimento, e de 45,4% sem sobreaquecimento;
3. A Figura 4.8 mostra que, tanto o rendimento energético, como o exergético, aumentam com a pressão p_2 . Este resultado era expectável, porque o aumento da diferença de temperatura entre

o evaporador e o aerocondensador melhora a eficiência energética de um ciclo de potência. Por outro lado, o facto da temperatura do fluido do ciclo no evaporador se aproximar da temperatura do fluido geotérmico diminui a diferença de temperatura à qual ocorre a transferência de calor, o que faz aumentar a eficiência exergética. A Figura 4.8 mostra também que o sobreaquecimento favorece os rendimentos. Tendo em conta a restrição à temperatura de reinjeção mínima de 70 °C, com sobreaquecimento obtém-se valores máximos do rendimento energético e exergético de 18,0% e 59,4%, respetivamente, enquanto que, sem sobreaquecimento, os valores do rendimento energético e exergético são de 15,4% e 51,2%, respetivamente. Para a temperatura de reinjeção mínima de 95 °C os rendimentos diminuem, passando a valores de 13,8% para o rendimento energético, e de 44,2% para o rendimento exergético com sobreaquecimento, e 9,2% e 29,8% para o rendimento energético e exergético, respetivamente, sem sobreaquecimento. Calculando os decréscimos relativos associados à mudança de temperatura de reinjeção mínima, obtém-se um valor de 40,3% para o rendimento energético e de 41,8% para o rendimento exergético, para o caso sem sobreaquecimento, e de 23,3% e 25,6% para o rendimento energético e exergético, respetivamente, para o caso com sobreaquecimento. Novamente, conclui-se que o caso com sobreaquecimento é menos penalizado;

4. A Figura 4.9 mostra que quando a temperatura de reinjeção aumenta, o ciclo diminui tanto a potência útil como os rendimentos obtendo-se, para o mesmo valor da temperatura de reinjeção, valores mais elevados da potência útil do ciclo, do rendimento energético e exergético (curva omitida) no caso com sobreaquecimento. No entanto, nos dois casos as curvas são aproximadamente paralelas, o que significa que o decréscimo da potência útil do ciclo e do rendimento energético, por grau centígrado de aumento da temperatura de reinjeção é semelhante, obtendo-se um valor aproximado de $-77,0 \text{ kW/}^{\circ}\text{C}$.

5. Conclusões

Os Açores, em particular a ilha de São Miguel e a ilha Terceira, possuem características favoráveis à utilização da energia geotérmica. O facto de as nove ilhas estarem distanciadas entre si, torna qualquer energia renovável extremamente útil nesta região, levando não só a uma menor dependência de combustíveis fósseis, mas também à redução de custos económicos associados.

A realização do estudo apresentado nesta dissertação teve como principal objetivo entender o funcionamento de uma central geotérmica ao longo do seu tempo útil, tendo-se usado, como referência, as condições de projeto da central geotérmica do Pico Alto, na ilha Terceira.

Com o auxílio de um algoritmo escrito em MATLAB, procedeu-se ao estudo da central geotérmica, tendo em conta a degradação dos poços geotérmicos, ao longo dos seus 30 anos de vida.

As análises realizadas tiveram como principal propósito verificar o comportamento da central quando sujeita a diversas alterações.

Em primeiro lugar, comparou-se o ciclopentano, fluido de trabalho atual, com o R141b e o n-Pentano. Nesta análise, verificou-se que o ciclopentano é o fluido que conduz a melhores resultados do ciclo termodinâmico, sendo, portanto, a escolha mais adequada.

Na análise de sensibilidade à pressão máxima do ciclo, verificou-se que o seu aumento é benéfico para o funcionamento da central, sendo a principal restrição a que diz respeito à temperatura de reinjeção, a qual diminui à medida que a pressão máxima do ciclo aumenta. A necessidade de garantir um valor mínimo de temperatura de reinjeção impõe uma severa limitação ao funcionamento do ciclo e é um dos fatores responsáveis pelo baixo rendimento energético das centrais geotérmicas (raramente ultrapassam os 15,0%).

Por fim, a comparação entre o ciclo saturado e o ciclo sobreaquecido permitiu concluir que o sobreaquecimento é uma estratégia a adotar. A potência útil do ciclo aumenta, bem como o rendimento energético e exergético, e a restrição à temperatura de reinjeção mínima é garantida sem limitações da pressão máxima do ciclo.

5.1 Trabalhos futuros

Como continuação deste trabalho, as tarefas que parecem mais relevantes são as seguintes:

1. Validação do modelo. Como foi salientado, este estudo baseou-se nas condições de projeto da central geotérmica do Pico Alto, nos Açores, e não nas reais condições de funcionamento do ciclo

termodinâmico;

2. Degradação dos poços. As condições de degradação impostas foram obtidas de artigos publicados para outras centrais, desconhecendo-se qual será a provável evolução temporal dos poços desta central;
3. Análise termo-económica. Este estudo restringiu-se a uma análise termodinâmica, mas a análise económica é fundamental em qualquer projeto de engenharia. Como exemplo, refere-se a opção de instalar um sobreaquecedor a seguir ao evaporador. Valerá a pena esta opção, apesar dos evidentes benefícios a nível termodinâmico? Só uma análise termo-económica poderá responder a esta questão.

Referências

- [1] International Renewable Energy Agency. Global Geothermal Alliance. Disponível: <https://www.globalgeothermalalliance.org/>. [Online]. Acedido em: 27/11/2020.
- [2] United Nations Climate Change. Renewable Energy and Energy Efficiency Can Unlock Climate Solution. Disponível: <https://unfccc.int/news/press-release-lpaa-energy-renewable-energy-and-energy-efficiency-can-unlock-climate-solution>. [Online]. Acedido em: 27/11/2020.
- [3] J. Busby. Geothermal energy — what is it? Disponível: <https://www.bgs.ac.uk/research/energy/geothermal/home.html>. [Online]. Acedido em: 17/07/2020.
- [4] A. Right. Enhanced Geothermal System (EGS). Disponível: <http://www.renewablegreenenergypower.com/enhanced-geothermal-system-egs/>. [Online]. Acedido em: 01/09/2020.
- [5] H. D. M. Hettiarachchi, M. Golubovic, W. M. Worek, Y. Ikegami. Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, vol. 32:1698–1706, 2007. doi:10.1016/j.energy.2007.01.005.
- [6] J. W. Lund, T. L. Boyd. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, vol. 60:66–93, 2016. doi:10.1016/j.geothermics.2015.11.004.
- [7] S. Kumar, S. K. Gupta, M. Rawat. Resources and utilization of geothermal energy in India: An eco-friendly approach towards sustainability. *Materials Today: Proceedings*, vol. 26:1660–1665, 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.347.
- [8] M. Soltani, F. M. Kashkooli, A. R. Dehghani-Sanij, A. R. Kazemi, N. Bordbar, M. J. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, M. B. Dusseault. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, vol. 44:793–818, 2019. doi:10.1016/j.scs.2018.09.036.
- [9] International Renewable Energy Agency. Geothermal energy. Disponível: <https://www.irena.org/geothermal>. [Online]. Acedido em: 22/07/2020.
- [10] International Renewable Energy Agency. Country Rankings. Disponível: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. [Online]. Acedido em: 22/07/2020.

- [11] J. M. Carvalho, L. Coelho, J. C. Nunes, M. Carvalho, J. Garcia, R. Cerdeira. Portugal Country Update 2015. *World Geothermal Congress 2015*, 2015.
- [12] J. C. Nunes, J. M. Carvalho, M. Carvalho, H. Sá. Low enthalpy projects in The Azores Islands (Portugal): a contribution to the enhancement of renewable energy. *European Geothermal Congress 2013*, 2013.
- [13] J. C. Nunes, L. Coelho, J. M. Carvalho, M. Carvalho, J. Garcia. Geothermal Energy Use, Country Update for Portugal. *European Geothermal Congress 2019*, 2019.
- [14] S. J. Zarrouk, H. Moon. Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, vol. 51:142–153, 2014. doi:10.1016/j.geothermics.2013.11.001.
- [15] R. Bertani. Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, vol. 60:31–43, 2016. doi:10.1016/j.geothermics.2015.11.003.
- [16] A. Aali, N. Pourmahmoud, V. Zare. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran. *Energy Conversion and Management*, vol. 143:377–390, 2017. doi:10.1016/j.enconman.2017.04.025.
- [17] S. Ganguly, M. S. M. Kumar. Geothermal Reservoirs – A Brief Review. *Geological Society of India*, vol. 79:589–602, 2012. doi: 10.1007/s12594-012-0098-8.
- [18] J. Bonafin, C. Pietra, A. Bonzanini, P. Bombarda. CO₂ emissions from geothermal power plants: evaluation of technical solutions for CO₂ reinjection. *European Geothermal Congress 2019*, 2019.
- [19] A. R. Diaz, E. Kaya, S. J. Zarrouk. Reinjection in geothermal fields - A worldwide review update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53:105–162, 2016. doi:10.1016/j.rser.2015.07.151.
- [20] J. Sun, Q. Liu, Y. Duan. Effects of reinjection temperature on thermodynamic performance of dual-pressure and single-pressure geothermal ORCs. *Energy Procedia*, vol. 158:6016–6023, 2019. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.517.
- [21] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, M. B. Bailey. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Wiley. 8^a edição.
- [22] D. Budisulistyo, C. S. Wong, S. Krumdieck. Lifetime design strategy for binary geothermal plants considering degradation of geothermal resource productivity. *Energy Conversion and Management*, vol. 132:1–13, 2017. doi:10.1016/j.enconman.2016.10.027.
- [23] I. H. Bell, CoolProp Team. Welcome to CoolProp. Disponível: <http://www.coolprop.org/index.html>. [Online]. Acedido em: 13/03/2020.
- [24] A. F. Altun, M. Kilic. Thermodynamic performance evaluation of a geothermal ORC power plant. *Renewable Energy*, vol. 148:261–274, 2020. doi:10.1016/j.renene.2019.12.034.