



Rui Pedro Faria **Modelação térmica da Central Geotérmica do Pico**
Gouveia Rebelo Costa **Vermelho**



Rui Pedro Faria **Modelação térmica da Central Geotérmica do Pico**
Gouveia Rebelo Costa **Vermelho**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof^a. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos
Professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

O percurso foi longo, trabalhoso, desafiante e contou com o apoio de diversas pessoas, a quem quero neste momento manifestar a minha gratidão, designadamente:

Ao Professor Doutor Fernando Neto devo uma palavra de grande apreço pela orientação na elaboração desta Dissertação, cuja solícita colaboração, exigência e disponibilidade contribuíram, decisivamente, para o resultado deste trabalho.

Ao Eng.º Carlos Bicudo, Administrador Delegado da SOGEO, Sociedade Geotérmica dos Açores, S.A. (Grupo EDA), deixo um agradecimento e consideração pelo contributo no acompanhamento da estruturação da Dissertação, bem como no apoio prestado na sua prossecução, transmitindo-me confiança e exigência.

Ao Eng.º Nuno Vieira, Técnico da SOGEO, pela colaboração empenhada demonstrada ao longo de todo o trabalho de pesquisa prática, que fundamentou esta Tese.

Aos meus pais e irmãos agradeço o incentivo e persistência, por me proporcionarem as condições na concretização dos meus objetivos e pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida académica.

Aos meus amigos e colegas um obrigado especial pelo companheirismo e apoio incondicional manifestados durante este percurso, tanto nos momentos de folia como nos de estudo.

Palavras-Chave

Central geotérmica; Potência elétrica; Sistema binário; Ciclo de Rankine; Potencial geotérmico; Açores.

Resumo

A presente Dissertação visa contribuir para uma melhor compreensão do funcionamento de uma central geotérmica tendo sido executado um estudo termodinâmico do aproveitamento hídrico e térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho, localizada na ilha de São Miguel, Açores.

Para tal, são apresentados os aspetos gerais de uma exploração geotérmica, desde o início das técnicas de exploração, passando pelas diferentes formas de utilização da fonte de energia, até à análise da potência elétrica instalada no mundo.

No caso específico dos Açores, a exploração geotérmica oferece inúmeros benefícios para o desenvolvimento do Arquipélago, tais como a redução dos riscos da exposição às flutuações do mercado do petróleo, a diminuição da dependência energética do exterior, o aumento da segurança energética da Região, uma expressiva mais-valia socioeconómica, a nível da criação de emprego e da própria autonomia energética, potenciando, assim, o aproveitamento dos recursos naturais.

A modelação da central teve como objetivo avaliar a influência de algumas variáveis sobre a potência elétrica do turbogerador. Assim sendo, partindo de valores nominais, alterou-se para cada caso de estudo o valor da variável correspondente, obtendo-se deste modo a medida da sua influência.

Nestes termos verificou-se que ocorrendo uma diminuição da eficiência da turbina de 1%, a potência líquida do alternador diminuía 1.32%. O aumento de 1% do teor de gases não condensáveis no circuito de vapor provoca uma diminuição de 1.17% e uma diminuição do caudal geotérmico de 1% origina uma perda de potência total de 0.91%.

Por outro lado, de acordo com as perdas de potência líquida, fez-se um estudo, para avaliação da possibilidade de recuperação da potência por aumento do caudal de n-pentano e do caudal do fluido primário. Os resultados mostram que em todos os casos de estudo, o aumento do caudal do fluido primário permite recuperar a potência líquida e obter as condições necessárias para um contínuo aproveitamento e geração eléctrica.

Keywords

Geothermal power plant; Electrical power; Binary cycle; Rankine cycle; Geothermal potential; Azores.

Abstract

This thesis aims to contribute better understanding of the geothermal power plant operation, based on a thermodynamic study of the geothermal power station of Pico Vermelho, located in the island of St. Miguel, Azores.

For this purpose, the general aspects of a geothermal exploration will be presented, since the beginning of the exploration techniques, through different ways of using the power source, until the analysis of the installed electric power in the world.

In the specific case of the Azores, the geothermal exploration offers many benefits for the development of the archipelago, such as reducing the risk of exposure to fluctuations in the oil market, the reduction of dependence on foreign energy, increasing energy security in the region, a significant socio-economic added value, in terms of job creation and energy independence, enhancing thus the use of natural resources.

The model was used to evaluate the influence of some variables on the electric power turbine generator. Thus, starting from nominal values, it was changed for each case studied the correspondent variable value, in order to obtain the magnitude of the generated power.

Therefore it was found that there is a 1% decrease in the efficiency of turbine, the net power output of the alternator decreased 1.32%. The increase of 1% in the content of non-condensable gases in the circuit causes a decrease of 1.71% and a decrease in the flow rate of 1% geothermal fluid yields a total of 0.91% power loss.

According to the losses of net power a study was done to evaluate the possible recovery of power by increasing the rate of n-pentane and the flow of the primary fluid. The results show that in all cases studied, increasing the flow of primary fluid allows to recover the net power and obtain the necessary conditions for continuous recovery and power generation.

Índice

Índice	i
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	vii
Índice de gráficos	ix
Nomenclatura	xi
Abreviaturas	xii
1. Introdução e objetivos	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão da literatura e enquadramento conceptual.....	5
2.1. Energia geotérmica	5
2.2. História de eletricidade geotérmica	7
2.3. Energia geotérmica no mundo	9
2.4. Tecnologias de conversão.....	12
2.4.1. Vapor seco	13
2.4.2. Vapor “flash”	14
2.4.3. Sistema binário	16
2.5. Os aproveitamentos geotérmicos em São Miguel, Açores	17
2.5.1. Central Geotérmica da Ribeira Grande.....	20
2.5.2. Central Geotérmica do Pico Vermelho	21
2.6. Impacto económico da produção de eletricidade geotérmica em São Miguel, Açores.....	22
3. Metodologia.....	25
3.1. Conhecimento da utilização de centrais geotérmicas à escala mundial	25
3.2. Prospeção geotérmica	26
3.3. Tecnologia de conversão	26
3.4. Ferramentas de modelação utilizadas	28

3.5.	Procedimento do caso de estudo.....	29
4.	Modelação	31
4.1.	Caracterização das transformações sofridas pelo fluido primário	32
4.1.1.	Fluido geotérmico à cabeça do poço.....	32
4.1.2.	Fornecimento de vapor (ponto B).....	32
4.1.3.	Fornecimento de brine (ponto C).....	33
4.1.4.	Vaporizador (transformação D - E)	34
4.1.5.	Bomba de condensação (transformação E – F).....	36
4.1.6.	Válvula redutora de pressão (transformação C – G).....	36
4.1.7.	Mistura de caudais (ponto H)	37
4.1.8.	Pré – Aquecedor (transformação H – I e J)	38
4.2.	Caracterização das transformações sofridas pelo fluido de trabalho	39
4.2.1.	Bomba de ciclo (transformação 1 – 2).....	39
4.2.2.	Recuperador (transformação 2 – 3)	40
4.2.3.	Pré – Aquecedor (transformação 3- 4).....	41
4.2.4.	Vaporizador (transformação 4-5).....	42
4.2.5.	Alternador-Turbina (transformação 5 – 6).....	43
4.2.6.	Recuperador (transformação 6 – 7)	44
4.2.7.	Aerocondensador (transformação 7 – 1).....	45
5.	Resultados e validação	47
5.1.	Dados gerais	47
5.2.	Eficiência isentrópica da turbina	51
5.3.	Rendimento termodinâmico	52
6.	Discussão.....	55
6.1.	Variação de percentual de GNC	55
6.1.1.	Variação da potência do alternador de acordo com a fração GNC	56
6.2.	Percentagem de brine no circuito de vapor.....	57
6.3.	Diminuição de caudal de fluido geotérmico	58
6.4.	Perda percentual da potência calorífica dos permutadores	60

6.5.	Queda de pressão do geofluido.....	62
6.6.	Variação da eficiência isentrópica da turbina	63
6.7.	Aspetos gerais e comparações	63
6.8.	Estudo da variação de potência com a variação do caudal de n-pentano.....	64
6.8.1.	Gases não condensáveis.....	65
6.8.2.	Potência calorífica no vaporizador	65
6.8.3.	Queda de pressão	66
6.9.	Estudo da variação de potência com a variação do caudal do fluido primário	67
6.9.1.	Gases não condensáveis.....	67
6.9.2.	Potência calorífica no vaporizador	68
6.9.3.	Queda de pressão	69
6.10.	Variação do rendimento térmico da central.....	69
7.	Conclusão e trabalhos futuros.....	71
8.	Referências bibliográficas	73

Índice de figuras

Figura 1: <i>Diagrama de Lindal</i> modificado, adaptado [1].	6
Figura 2: Representação esquemática de um sistema ideal geotérmico, adaptado [4].	6
Figura 3: Sistema de aproveitamento de calor [4].	8
Figura 4: Máquina térmica utilizado em Larderello em 1904, juntamente com o seu criador, Príncipe Piero Ginori Conti. [4].	8
Figura 5: Capacidade instalada em 2010, adaptado [7].	10
Figura 6: Esboço de uma unidade de escape atmosférico, adaptado [4].	14
Figura 7: Esboço de unidade de condensação, adaptado [4].	14
Figura 8: Esboço de unidade vapor “flash”, nomeadamente “ <i>single flash</i> ”, adaptado [11].	15
Figura 9: Esboço de unidade vapor “flash”, nomeadamente “ <i>double flash</i> ”, adaptado [11].	16
Figura 10: Esboço de sistema binário, adaptado [12].	17
Figura 11: Principais estruturas tectónicas na região Autónoma dos Açores. CMA – Crista Média Atlântica; ZFNA- Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift (fenda) da Terceira; FG – Falha Glória [13].	18
Figura 12: Mapa de vulcões de S. Miguel, adaptado [13].	18
Figura 13: Central geotérmica piloto do Pico Vermelho (3MW) [8].	19
Figura 14: Corte esquematizado do Campo Geotérmico da Ribeira Grande [14].	20
Figura 15: Central Geotérmica da Ribeira Grande [8].	21
Figura 16: Central Geotérmica do Pico Vermelho [8].	22
Figura 17: Origem da produção total de eletricidade em São Miguel, adaptado [16].	23
Figura 18: Produção total de eletricidade em São Miguel, adaptado [16].	23
Figura 19: Representação do ciclo térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho com valores fornecidos [17].	27
Figura 20: Esquematização do ponto C.	33
Figura 21: Esquematização da transformação D –E.	34
Figura 22: Esquematização da transformação E – F.	36
Figura 23: Esquematização da transformação C – G.	36
Figura 24: Esquematização o aglomerado de caudais no ponto H.	37
Figura 25: Esquematização da transformação H – I.	38

Figura 26: Esquematização da transformação 1 – 2.....	39
Figura 27: Esquematização da transformação 2 – 3.....	40
Figura 28: Esquematização da transformação 3 – 4.....	41
Figura 29: Esquematização da transformação 4 – 5.....	42
Figura 30: Esquematização da transformação 5 – 6.....	43
Figura 31: Esquematização da transformação 6 – 7.....	44
Figura 32: Esquematização da transformação 7 – 1.....	45
Figura 33: Representação do ciclo térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho com todos os valores necessários para a caracterização do sistema em estado estacionário e nominal.....	48
Figura 34: Diagrama T-s: n-pentano.	49
Figura 35: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado da zona dos pontos 1 e 2.....	50
Figura 36: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado do ponto 4.....	50
Figura 37: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado do ponto 5.....	51

Índice de tabelas

Tabela 1: Tipo de centrais geotérmicas de cada país, capacidade instalada em MW, adaptado [7].	11
Tabela 2: Calendarização da realização da dissertação.	25
Tabela 3: Propriedades do fluido primário nos pontos que influenciam a análise do sistema.....	47
Tabela 4: Propriedades do fluido de trabalho nos pontos analisados.	47
Tabela 5: Interações mecânicas e térmicas do fluido de trabalho.	48
Tabela 6: Percentagem de gases não condensáveis presentes no geofluido e os respetivos caudais presentes no compartimento de vapor.	56
Tabela 7: Caudais dos fluidos do ciclo primário em função da redução do fluido geotérmico extraído.	59
Tabela 8: Dados informativos para as variações de caudais com alteração de 1% dos valores nominais.	70

Índice de gráficos

Gráfico 1: Percentagem de tipos de centrais geotérmicas existentes no Mundo	12
Gráfico 2: Relação da percentagem de caudal de gases não condensáveis (GNC) com a potência do alternador.....	57
Gráfico 3: Relação da percentagem de brine no circuito de vapor com a potência do alternador.	58
Gráfico 4: Relação da diminuição de caudal geotérmico com a potência do alternador.	59
Gráfico 5: Relação da perda da potência calorífica com a potência do alternador (análise: potência total)...	61
Gráfico 6: Relação da perda da potência calorífica com a potência do alternador (análise: potência líquida).61	
Gráfico 7: Relação queda de pressão à cabeça do poço com a potência do alternador.	62
Gráfico 8: Relação eficiência isentrópica da turbina com a potência do alternador.	63
Gráfico 9: Potência líquida consoante o caso de estudo.	64
Gráfico 10: Variação do caudal n-pentano para um aumento de gases não condensáveis.	65
Gráfico 11: Variação do caudal n-pentano com a diminuição da percentagem da potência calorífica no vaporizador.....	66
Gráfico 12: Variação do caudal n-pentano com a queda de pressão.	67
Gráfico 13: Variação do caudal do fluido primário para um aumento de gases não condensáveis.	68
Gráfico 14: Variação do caudal do fluido primário com a diminuição da percentagem da potência calorífica no vaporizador.....	68
Gráfico 15: Variação do caudal do fluido primário com a queda de pressão	69

Nomenclatura

E – Energia (J)

g – Aceleração da gravidade (m/s^2)

h_i – Entalpia específica no i -ésimo local referente ao fluido primário (J/kg)

h_j – Entalpia específica no j -ésimo local referente ao fluido trabalho (J/kg)

\dot{m}_i – Caudal mássico no i -ésimo local referente ao fluido primário (kg/s)

\dot{m}_j – Caudal mássico no j -ésimo local referente ao fluido trabalho (kg/s)

m – Massa (kg)

M – Massa molar (g/mol)

n – Número de moles (mol)

P_i – Pressão absoluta no i -ésimo local referente ao fluido primário (Pa)

P_j – Pressão absoluta no j -ésimo local referente ao fluido trabalho (Pa)

\dot{Q}_k – Potência calorífica no equipamento designado por k (W)

s_i – Entropia específica no i -ésimo local referente ao fluido primário ($J/kg \cdot K$)

s_j – Entropia específica no j -ésimo local referente ao fluido trabalho ($J/kg \cdot K$)

T_i – Temperatura no i -ésimo local referente ao fluido primário (K)

T_j – Temperatura no j -ésimo local referente ao fluido trabalho (K)

V – Velocidade (m/s)

v – Volume específico (m^3/kg)

\dot{W}_l – Potência mecânica no equipamento designado por l (W)

x_i – Fração de vapor ou título de uma mistura saturada ($-$)

z – Altura (m)

η_m – Eficiência no equipamento designado por m (%)

Subscritos

$i = A; B; C; D; E; F; G; H; I; J$

$j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7$

Abreviaturas

CGPV – Central Geotérmica do Pico Vermelho
CGRG – Central Geotérmica da Ribeira Grande
CL1 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CL2 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CL3 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CL4 – Poço de Injeção de fluido geotérmico da CGRG
CL5 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CL6 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CL7 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGRG
CMA – Crista Média Atlântica
EDA – Empresa de Eletricidade dos Açores
EES – Engineering Equation Solver
EGS – Enhanced Geothermal System
FG – Falha Glória
GEE - Gases de Efeito de Estufa
GNC – Gases não Condensáveis
HDR – Hot Dry Rock
PV1 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
PV2 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
PV3 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
PV4 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
PV5 – Poço de Injeção de fluido geotérmico da CGPV
PV6 – Poço de Injeção de fluido geotérmico da CGPV
PV7 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
PV8 – Poço de Produção de fluido geotérmico da CGPV
RT – Rift (fenda) da Terceira
SI – Sistema Internacional de Unidades
SOGEO – Sociedade Geotérmica dos Açores S.A.
TG4 – Poço de Pesquisa ou Testes
ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores
ZFNA- Zona de Fratura Norte dos Açores

1. Introdução e objetivos

1.1. Motivação

O trabalho desenvolvido tem como objetivo principal contribuir para uma melhor compreensão do funcionamento de uma central geotérmica, baseando-se num estudo termodinâmico de um aproveitamento hídrico e térmico.

A motivação na escolha do tema para a dissertação resultou do interesse, que se manifestou desde cedo, em aprofundar os conhecimentos sobre esta energia renovável. A oportunidade para analisar e tomar contato com um sistema mecânico concreto, associado a um conceito de exploração de um aproveitamento geotérmico para o desenvolvimento de energia elétrica diferente do das tradicionais fontes de energias apoiadas pelo petróleo, constituiu numa motivação extra para enveredar pelo tema desta dissertação. Além disso, é inegável o estímulo que constitui estudar o funcionamento de uma central geotérmica, exploração única em Portugal e uma das referências a nível europeu - a central do Pico Vermelho, produtora de energia elétrica, localizada no flanco norte da encosta da Lagoa do Fogo (Vulcão Fogo/Água de Pau) na ilha de São Miguel.

A exploração geotérmica ganha uma importância decisiva nos Açores quando se sabe que a maioria dos países estabeleceu um acordo, designado por *Protocolo de Quioto*, em que se aprovou um compromisso de redução de emissões dos gases de efeito de estufa (GEE), consideradas por muitos investigadores como a causa do aquecimento global.

A energia geotérmica pode representar uma alternativa viável no domínio da geração de energia elétrica, pois é uma solução disponível em alguns países, para além de poder ser usada para poupar combustíveis fósseis em diferentes processos de utilização. Para além disso, a utilização deste recurso é uma alternativa à queima de combustíveis fósseis, com uma diminuição das emissões de gases poluentes. É importante referir que as emissões de gases emitidas por centrais geotérmicas, ocorreriam naturalmente, mesmo sem a exploração destes recursos. De salientar também que numa central geotérmica não há resíduos radioativos, tornando-a numa exploração segura e fiável.

As fontes de energia não são distribuídas igualmente entre países e, muitas vezes, as nações em vias de desenvolvimento não podem pagar os custos da aquisição de combustíveis fósseis, essenciais para as suas necessidades e para o conforto das suas populações. Assim, o recurso a uma fonte de energia endógena apresenta vantagens significativas, como: a redução da exposição às flutuações do mercado do petróleo; um melhor aproveitamento dos recursos internos; a redução da dependência energética do exterior e o aumento da segurança energética. Para além disso, constitui

uma expressiva mais-valia socioeconómica, a nível da criação de emprego e da autonomia energética.

De facto, a utilização eficiente da energia geotérmica permite reduzir substancialmente os custos de energia, além de que aquela constitui uma fonte de energia infinita à escala humana, com calor disponível de uma forma profusa e não dependente diretamente das condições climáticas. A instalação de uma exploração geotérmica é de elevada durabilidade, sendo os custos de produção mais reduzidos e de mais fácil amortização, face aos elevados investimentos iniciais da construção de uma central.

Com um contributo significativo na redução de emissões para a atmosfera, um baixo custo de exploração, um impacto visual reduzido, pois a maior parte da infraestrutura localiza-se no subsolo, e, por fim, uma exploração contínua, as centrais geotérmicas constituem uma alternativa importante, quando comparada com aquelas que utilizam outras fontes de energias, por serem, em termos de impacto ambiental, menos prejudiciais.

Para além destes pontos positivos, no que se refere à exploração para fins elétricos, a energia geotérmica também pode ser aproveitada para aquecimento e arrefecimento de edifícios individuais e públicos, para abastecimento e aquecimento de piscinas, secagem de produtos e para fins agrícolas, entre outros usos do potencial geotérmico, demonstrando a sua adequação ao tipo de objetivo pretendido.

1.2. Objetivos

Tendo em vista uma boa compreensão do caso em estudo, a presente Dissertação visa não apenas analisar os estudos de prospeção e aproveitamento geotérmicos existentes, bem como as tecnologias utilizadas mas também apreender os modos de funcionamento das respetivas centrais, dando, designadamente, enfoque à importância do aproveitamento daquela energia renovável existente na Região Autónoma dos Açores.

Para tal, há que perceber, modelar e simular o funcionamento de uma central geotérmica neste caso, a do Pico Vermelho para parâmetros nominais, selecionando os aspetos técnicos cruciais ao seu funcionamento, bem como identificar e perceber as influências das correspondentes variáveis críticas na produção da potência elétrica.

Posteriormente, torna-se necessário modelar e fazer simulações, variando alguns parâmetros críticos que possam influenciar o funcionamento do ciclo térmico daquela central.

Pretende-se por fim apresentar uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros operativos de uma central geotérmica em relação à potência líquida da central, nomeadamente tendo em conta a variação dos caudais de fluido geotérmico (fluido primário) e de fluido de trabalho (fluido secundário n-pentano), de modo a perceber como se garante uma melhor

compensação nas perdas de potência líquida, resultantes de variações de algumas propriedades críticas ao funcionamento da central.

1.3. Estrutura da dissertação

A Dissertação é constituída por sete capítulos principais, organizados de forma a compreender-se o funcionamento de uma central geotérmica, a realizar a modelação da mesma, bem como a simulação do seu funcionamento, concluindo-se com a apresentação dos resultados e conclusões finais.

O capítulo 1, “Introdução”, foca as motivações para a escolha deste tema, as vantagens dos recursos geotérmicos na produção de energia elétrica e a estrutura da dissertação.

Considera-se que a existência de um segundo capítulo dedicado à revisão bibliográfica, designado por “Revisão da literatura e enquadramento conceptual”, é fundamental para garantir a familiarização com os aspetos teóricos do tema do trabalho.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia adotada ao longo do trabalho desenvolvido, delineando-se o caso de estudo através da exposição das condições fornecidas e tomadas para atingir a modelação do sistema térmico da central em estudo.

O capítulo 4, “Modelação”, expõe o modelo e as equações necessárias para uma simulação do sistema, de modo a permitir uma análise do ciclo térmico e efetuar um estudo coerente com obtenção de conclusões adequadas às diferentes situações analisadas.

No capítulo 5, “Resultados e validação”, são apresentados e discutidos os resultados da análise do sistema, apoiados por apresentações de diagramas térmicos pormenorizados.

Com a validação do modelo, procede-se a uma análise de produção de potência elétrica gerada pela central, Capítulo 6, intitulado de “Discussão”, em que se efetuam simulações a partir de alterações de variáveis, de forma a discutir cenários de produção de potência elétrica a que a central poderá estar sujeita.

Por fim, com base nos resultados obtidos, terminamos com o Capítulo 7, “Conclusão e trabalhos futuros”, onde se apresentam as ilações do estudo efetuado, para que se possam quantificar as respostas de produção de potência por parte da central.

2. Revisão da literatura e enquadramento conceptual

Neste capítulo, pretende-se contextualizar a exploração geotérmica nos Açores, por parte da empresa SOGEO, do Grupo EDA, Empresa de Electricidade dos Açores, de forma a perceber o processo de geração de energia elétrica apoiada por recursos endógenos, e é efetuado um enquadramento teórico da tecnologia de exploração da energia geotérmica.

2.1. Energia geotérmica

Em termos sumários, a energia geotérmica é a energia contida em forma de calor no interior da Terra. A origem desse calor está relacionada com a estrutura e com os processos físicos que ocorrem no interior do nosso Planeta. Este calor move-se do interior da Terra para a superfície onde se dissipa, através de processos de convecção, condução e radiação, constituindo um ciclo contínuo e natural [1].

Apesar da fonte de calor ser inesgotável, a sua disponibilidade não é uniforme ao longo de toda a crosta terrestre, devido ao tipo de solo, geometria e da constituição física do terreno.

Assim, por vezes, é necessário obter, para o mesmo gradiente de temperaturas, perfurações de profundidades elevadas, enquanto noutros locais, não são necessárias grandes perfurações para exploração industrial, particularmente quando a superfície não está muito distante de zonas com magma submerso, ou ainda com fluídos em processos de solidificação [1]. Normalmente, estas zonas estão situadas junto à confluência das placas tectónicas [2].

A figura 1 representa o *Diagrama de Lindal* modificado, onde se apresentam, de uma forma simples, os diferentes recursos que se podem utilizar, através de uma fonte de energia endógena, em função das temperaturas de extração de calor.

É de salientar que os recursos hidrotermais são geralmente classificados de acordo com a temperatura ou com a entalpia específica do fluido. Assim, os recursos geotérmicos extraídos com temperaturas superiores a 150 °C designam-se de alta entalpia. Para temperaturas inferiores a 100 °C, estes recursos designam-se de baixa entalpia [3].

Assim sendo, em relação aos recursos para produção de energia, existe uma enorme preocupação quanto à entalpia fornecida ao sistema pela fonte quente, pois para altas entalpias utiliza-se a produção de energia elétrica convencional apoiada unicamente por geofluido e, para entalpias com limite de temperaturas entre os 100 e 150°C, a produção de energia elétrica dá-se através de um ciclo binário fazendo uso de um fluido adicional de trabalho (normalmente um fluido orgânico à base de n-pentano). Deste modo, verifica-se que é necessário uma escolha de tecnologia de aproveitamento adequada ao tipo de fonte existente, de modo a rendibilizar os recursos.

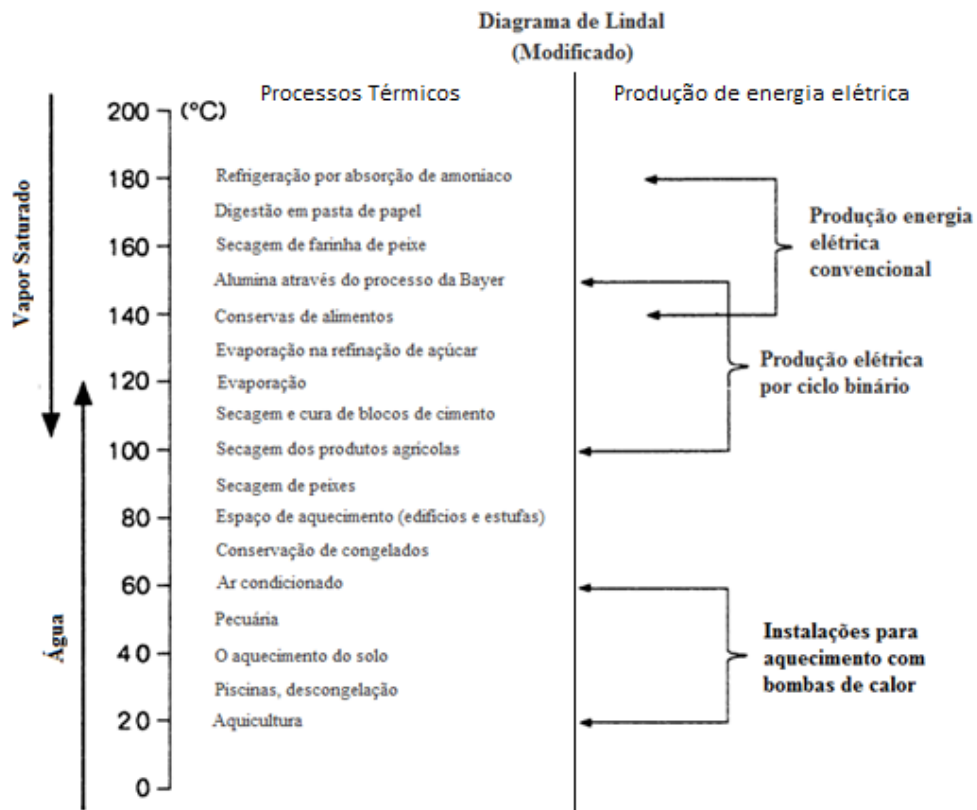


Figura 1: Diagrama de Lindal modificado, adaptado [1].

É de notar também, que, para ocorrer extração de calor terrestre, para além de valores adequados de entalpia para efeitos de produção de energia elétrica, também são necessárias condições adequadas, no que toca à constituição da crosta terrestre, como se ilustra na figura 2.

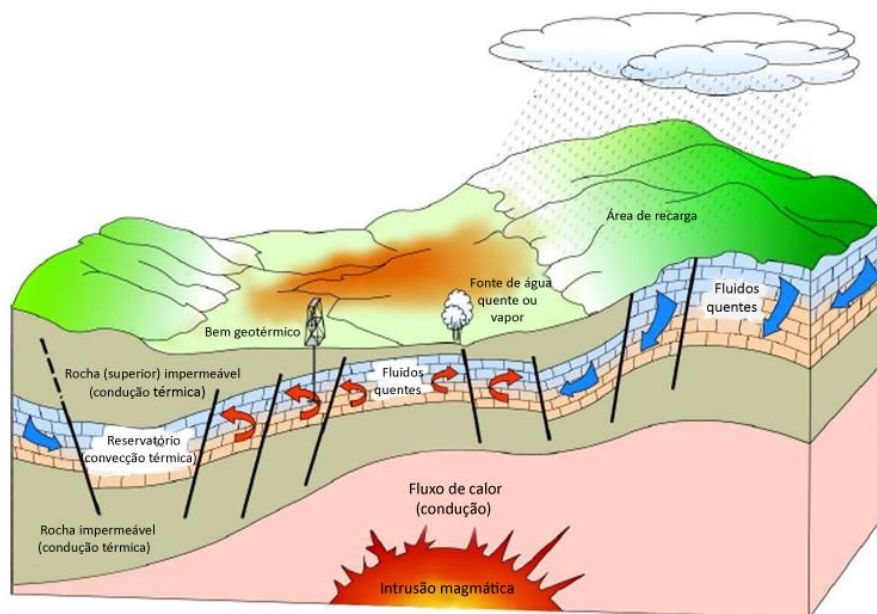


Figura 2: Representação esquemática de um sistema ideal geotérmico, adaptado [4].

Para um aproveitamento adequado, o reservatório geotérmico terá que reunir condições essenciais, como: a existência de uma fonte de calor, que poderá ser um corpo magmático ou simplesmente corpos rochosos quentes; a existência de um fluido transportador de calor; uma sequência de rochas permeáveis, funcionando como um reservatório; e, por fim, a necessidade da presença de uma formação geológica impermeável [3].

Normalmente, os reservatórios são constituídos por rochas quentes permeáveis, através das quais os fluidos circulam, promovendo a extração de calor aos corpos rochosos. O fluido geotérmico é constituído por água, mais frequentemente originada por água meteórica (água da chuva), em qualquer fase, líquida ou vaporizada, dependendo da temperatura e da pressão [5]. Geralmente, os caudais geotérmicos, muitas vezes, contêm substâncias químicas dissolvidas e gases como CO₂, H₂S, NH₃, CH₄, N₂, e H₂ [1].

É de salientar, que a produção de energia a partir desta fonte é a energia renovável que apresenta melhores resultados, comparativamente a outros recursos mais ou menos competitivos predominantes no mercado, tendo em conta que se apresenta como uma energia com características pouco voláteis, com um aproveitamento contínuo e estável [3].

2.2. História de eletricidade geotérmica

Desde os primórdios da humanidade, a constante atividade vulcânica e outras formas de expressão térmica, levaram o homem a suspeitar, que zonas do interior da Terra, poderiam conter temperaturas muito mais elevadas. Contudo, no início do século XVII com as primeiras escavações e explorações mineiras, comprovou-se que o aumento da temperatura era proporcional ao aumento da profundidade das escavações.

No início do século XIX, e com a ajuda das expressões visíveis das manifestações térmicas à superfície terrestre, começou a exploração dos fluidos geotérmicos como fonte de energia. Foi neste período que a indústria química começou a dar os primeiros passos na extração de ácido bórico das águas quentes emergentes e em poços perfurados, em Larderello, Itália.

Por volta de 1827, Francesco Larderel, criador desta indústria, desenvolveu no mesmo local um sistema de aproveitamento do calor dos fluidos bóricos, mais propriamente no processo de evaporação, em alternativa à queima de madeira das florestas para combustível (figura 3) [4].

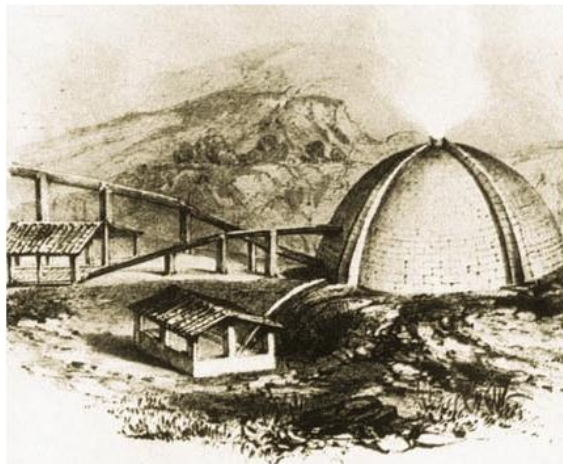


Figura 3: Sistema de aproveitamento de calor [4].

A primeira máquina de exploração de vapor natural para obtenção de energia mecânica não tardou, surgindo, em 1904, a primeira tentativa de aproveitamento do vapor geotérmico em Larderello (figura 4). Em 1942, conseguiu-se um desenvolvimento significativo de geração elétrica atingindo-se a capacidade de 127.65 MW_e [4].



Figura 4: Máquina térmica utilizado em Larderello em 1904, juntamente com o seu criador, Príncipe Piero Ginori Conti. [4].

Entre os anos de 1910 e 1940, na região de Toscana, foi aproveitado o vapor de baixa pressão para o aquecimento de edifícios residenciais, industriais e estufas. Por volta de 1928, iniciou-se a exploração dos recursos geotérmicos para aquecimento doméstico, aproveitando principalmente águas quentes, recursos em abundância naquela área.

Com o sucesso da primeira máquina instalada em Itália, vários países seguiram o exemplo no aproveitamento dos recursos geológicos. No Japão, por exemplo, os primeiros poços foram perfurados em 1919 para o aproveitamento de energia geotérmica, seguindo-se-lhes mais tarde, em 1929, os *The Geysers*, Califórnia, nos EUA. Em 1958, foi instalada uma pequena central geotérmica na Nova Zelândia. Experiências subsequentes ocorreram em 1959, no México e nos EUA em 1960 [4].

2.3. Energia geotérmica no mundo

Com os níveis de crescimento dos países em desenvolvimento, estima-se que a procura de eletricidade duplicará, nos próximos 25 anos, ou seja, passará de 15 000 TWh, em 2005, para cerca de 30 000 TWh, em 2030 [6]. O contributo das energias renováveis atualmente é de 21,5%, sobretudo na componente hidroelétrica, prevendo-se que passe para 25,8% em 2030 [6].

Por seu turno, a energia geotérmica representa apenas 0,4% da energia gerada a nível global. Esta energia apresenta um crescimento estável, estimando-se, a longo prazo, que o crescimento atinja os 5%. Os países com maior produção deste tipo de energia são os Estados Unidos da América, as Filipinas, a Indonésia, o México, a Itália, a Nova Zelândia e a Islândia [6,7].

No ano de 2010, a potência térmica instalada rondava os 10.9 GW. A Alemanha, Papua-Nova Guiné, Austrália, Turquia, Islândia, Portugal, Nova Zelândia, Guatemala, Quênia e Indonésia aumentaram a sua capacidade instalada em mais de 50%, relativamente ao ano de 2005 [7].

Na figura 5, estão representados os 24 países que atualmente produzem energia elétrica proveniente de fluxos geotérmicos, bem como a potência elétrica instalada, de acordo com os dados relativos a 2010.

Em 2015, espera-se que duplique o número de países capazes de produzir este tipo de energia [7], pois estima-se que a próxima geração possa beneficiar de novos desenvolvimentos tecnológicos, sobretudo quanto à implementação do processo EGS (*Enhanced Geothermal System*). Paralelamente assiste-se ao aumento intensivo de aplicações com baixas/médias temperaturas, por meio de ciclos binários e sistemas em cascata [6].

Em relação ao processo *Enhanced Geothermal System*, também conhecido como tecnologia *Hot Dry Rock* (HDR), este consiste numa criação artificial de permeabilidade em zonas pouco favoráveis para a extração de fluidos geotérmicos. Assim sendo, é criado artificialmente um campo geotérmico, em que as rochas quentes e secas são artificialmente fraturadas, de forma a obter condições de permeabilidade e escoamento de fluido transportador de calor.

Normalmente nestas zonas, é necessário efetuar perfurações a elevada profundidade, de forma a encontrar um gradiente de temperatura adequado para a exploração. A água é distribuída pelo poço de injeção e o reservatório artificial atua como um permutador de calor, voltando o fluido para a superfície em forma de água quente, que pode ser aproveitada num ciclo de conversão de energia [1].

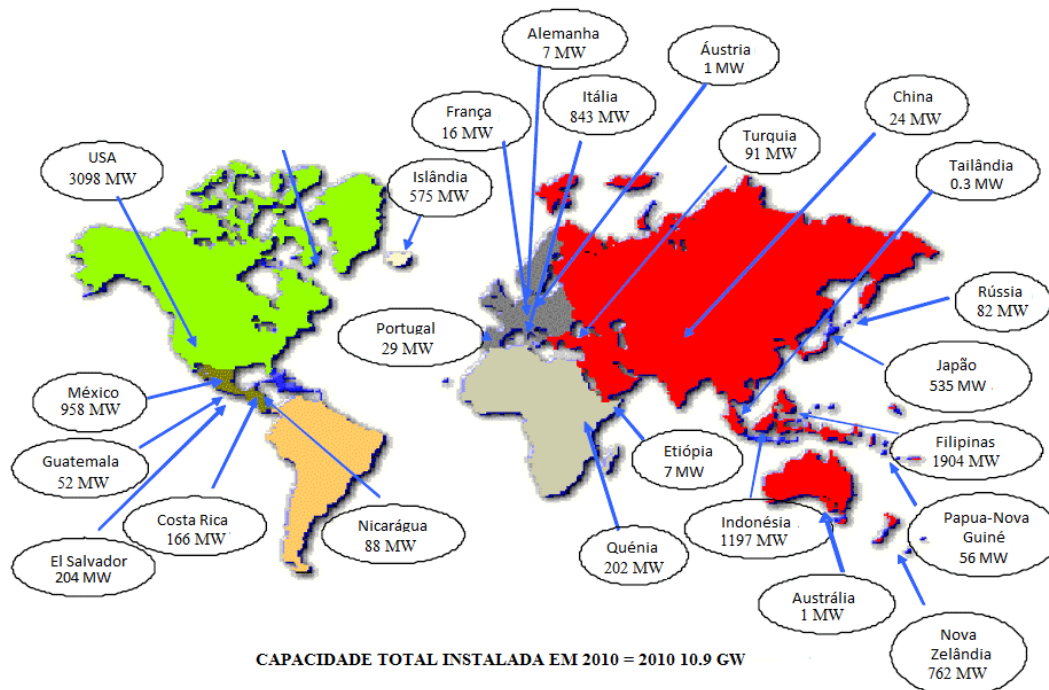


Figura 5: Capacidade instalada em 2010, adaptado [7].

Relativamente à escolha das tecnologias de conversão, utilizadas para a produção de energia elétrica, aquele irá depender de vários fatores, uma vez que cada campo de exploração geotérmica adapta a melhor tecnologia para o aproveitamento dos recursos existentes no local, de modo a obter uma melhor eficiência.

A tabela 1 representa a potência geotérmica instalada por país em 2010, bem como a tecnologia de conversão utilizada. É de salientar, que apenas os Estados Unidos da América produzem energia geotérmica pela tecnologia de conversão “*hybrid*”, que consiste num aproveitamento geotérmico e na utilização da biomassa para fornecer calor ao sistema, de forma a poder gerar a potência elétrica desejada [7]. De referir que os 2MW produzidos por este sistema não são contabilizados na referida tabela.

Tabela 1: Tipo de centrais geotérmicas de cada país, capacidade instalada em MW, adaptado [7].

	Vapor Seco		Vapor "flash"		Sistema Binário	Total
	Contrapressão	Condensação	"Single Flash"	"Double Flash"		
Alemanha	0	0	0	0	7	7
Austrália	0	0	0	0	1	1
Austria	0	0	0	0	1	1
China	0	0	0	24	0	24
Costa Rica	5	0	140	0	21	166
El Salvador	0	0	160	35	9	204
Estados Unidos da América	0	1584	60	796	656	3096
Etiópia	0	0	0	0	7	7
Filipinas	0	0	1330	365	209	1904
França	0	0	10	5	2	17
Guatemala	0	0	0	0	52	52
Islândia	0	0	474	90	10	574
Indonésia	2	460	735	0	0	1197
Itália	0	755	88	0	0	843
Japão	0	24	350	160	2	536
México	75	0	410	470	3	958
Nicarágua	10	0	70	0	8	88
Nova Zelândia	47	0	387	190	138	762
Papua-Nova Guiné	6	0	50	0	0	56
Portugal	0	0	0	0	29	29
Quênia	2	0	186	0	14	202
Rússia	0	0	82	0	0	82
Tailândia	0	0	0	0	0	0
Turquia	0	0	20	47	24	91
Total	147	2823	4552	2182	1193	10897
Total em Percentagem [%]	1,3	25,9	41,8	20,0	10,9	100

No gráfico 1, regista-se a percentagem de cada tipo de tecnologia utilizada na produção de energia elétrica com base no recurso geotérmico, podendo desde logo verificar-se que a tecnologia “*single flash*” é a mais utilizada, normalmente em zonas com valores de entalpia elevadas, temperaturas superiores a 180 °C e com fase líquida dominante, seguida da tecnologia de condensação, que utiliza vapor seco e da de “*double flash*”.

Os ciclos binários aparecem como a quarta tecnologia mais utilizada, com um crescimento significativo nos últimos anos e com previsão de abertura de mais centrais aproveitando este tipo de tecnologia [7], pois a produção de energia elétrica baseia-se em médias entalpias, recurso existente num maior número de zonas do nosso Planeta.

Por fim, as unidades de escape atmosférico, designadas de contrapressão, têm uma menor percentagem, pois são utilizadas como central piloto ou mesmo como centrais em *stand-by*, produzindo pouca quantidade de energia elétrica.

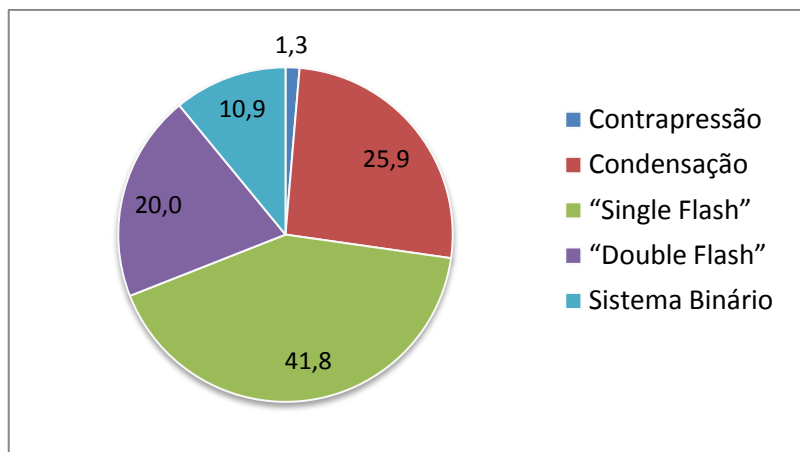


Gráfico 1: Percentagem de tipos de centrais geotérmicas existentes no Mundo

2.4. Tecnologias de conversão

A tecnologia de conversão corresponde ao modo como o sistema mecânico transforma calor em energia elétrica. A geração de eletricidade através do aproveitamento da energia geotérmica pode ser efetuada por diferentes processos, cuja aplicação depende das características do recurso geotérmico.

Os três grupos de tecnologias de conversão mais utilizadas, tendo em vista um melhor aproveitamento dos recursos, são o de vapor seco, o de vapor “flash” e o de sistema binário, que seguidamente se apresentam.

Para ocorrer um aproveitamento do recurso geotérmico é necessário, desde logo, executar infraestruturas de captação, designadas por poços de produção [8]. Todavia, nesta fase, esta execução requer algumas cautelas, tendo em conta as elevadas pressões que se podem encontrar e é necessário ter um conhecimento parcial da constituição do solo [9]. Assim, os poços geotérmicos são perfurações concêntricas e revestidas em aço, podendo atingir vários quilómetros de profundidade. Após a perfuração é executada a cimentação do espaço entre o revestimento anelar e a parede do poço.

Em relação à seção terminal, ou seja, a seção que entra em contato com o campo geotérmico, esta é constituída por uma tubagem perfurada, formando um ecrã drenante de geofluido a conduzir para a superfície. O troço superficial, por sua vez, é encimado por um conjunto de válvulas que permitem a operação e controlo da extração dos fluidos geotérmicos [8].

Além disso, é importante mencionar que existem duas técnicas de perfuração, a direcional e a vertical. A perfuração vertical é a mais simples e conseqüentemente a solução mais económica. Contudo, existe a possibilidade de não poder ocorrer uma perfuração direta, devido à morfologia do terreno, pelo que são executados poços com uma perfuração direcional [1].

2.4.1. Vapor seco

Para a utilização de tecnologia de conversão de vapor seco (ou vapor saturado, com um título igual a 1), acima de 150 °C utilizam-se turbinas a vapor convencionais, podendo estas estar disponíveis com escapes atmosféricos (contrapressão) ou de condensação.

As turbinas de escape atmosférico comparativamente às turbinas de condensação são mais simples e mais económicas. Todavia, para o ciclo de vapor, as turbinas de contrapressão consomem duas vezes mais fluido geotérmico por quilowatt-hora (kWh), a pressões idênticas na entrada das turbinas.

No entanto e devido às suas características, as turbinas de escape atmosférico são extremamente úteis como instalações piloto ou mesmo como centrais em *stand-by*, uma vez que são de baixo custo beneficiando deste modo a exploração, durante o desenvolvimento de campo para produção de eletricidade. Desta forma, este tipo de máquinas está geralmente disponível em tamanhos pequenos, produzindo entre 2.5 a 5 MW_e. Para além disso, as unidades de escape atmosférico podem ser construídas e instaladas rapidamente, iniciando o seu funcionamento em pouco mais de 13-14 meses.

Na figura 6, está representado um esboço de uma unidade de escape atmosférico que funciona do seguinte modo: o fluido geotérmico proveniente dos poços de vapor seco é sujeito a uma separação de fases, em que o líquido é injetado para um local, previsto no reservatório geotérmico, e o vapor é utilizado para gerar eletricidade, pelo processo de passagem por uma turbina interligada a um alternador sendo, seguidamente, libertado para a atmosfera [4].

Assim, o processo de geração de eletricidade consiste na transformação do calor contido no vapor em energia elétrica, tendo em conta que a turbina de vapor converte calor em energia mecânica rotacional, por expansão do vapor em volta do rotor, produzindo-se uma força tangencial, tendo em vista a obtenção de binário e rotação [10]. Posteriormente, o alternador transforma energia mecânica em energia elétrica, devido à rotação do rotor que gera um campo magnético que, por sua vez, vai induzir uma corrente elétrica nos enrolamentos do estator.

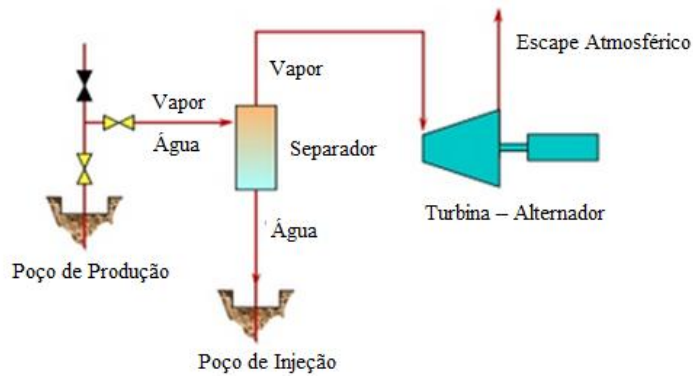


Figura 6: Esboço de uma unidade de escape atmosférico, adaptado [4].

As unidades de condensação são mais dispendiosas e, por sua vez, mais complexas contendo uma maior quantidade de equipamentos auxiliares. Conseqüentemente, a sua instalação pode levar o dobro do tempo, comparativamente às de escape atmosférico.

Neste tipo de central é comum obter-se uma capacidade de 55 – 60 MW_e. Recentemente, algumas centrais foram modificadas, tendo sido encomendadas, construídas e instaladas com capacidades de 110 MW_e [4].

Nas unidades de condensação, o vapor é condensado por um processo auxiliar, de modo a possibilitar a injeção do fluido no reservatório.

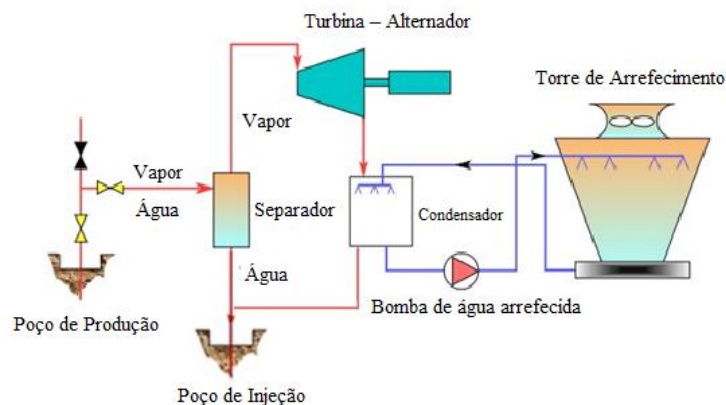


Figura 7: Esboço de unidade de condensação, adaptado [4].

2.4.2. Vapor “flash”

As centrais geotérmicas que utilizam vapor “flash”, em que a fase líquida é dominante, requerem fluidos geotérmicos com temperaturas superiores a 180 °C. Deste modo, parte da água

quente pressurizada ao ascender à superfície, através do poço de produção, é transformada em vapor, devido ao decréscimo da pressão, levando-a à fase de mistura bifásica.

Seguidamente, o vapor é separado da água, através de um separador de fase e dirigido para a turbina acoplada a um alternador. De seguida, o vapor é condensado, sendo toda a água líquida do sistema injetada no reservatório geotérmico, através de poços de injeção, criteriosamente localizados em relação aos poços de produção [6]. O fluido geotérmico na fase líquida é submetido a um decréscimo de pressão repentino, permitindo assim a sua vaporização e originando o que se designa por vapor “flash”. Se este processo ocorrer num ciclo único de vaporização, chama-se a esta tecnologia de “single flash” [11].

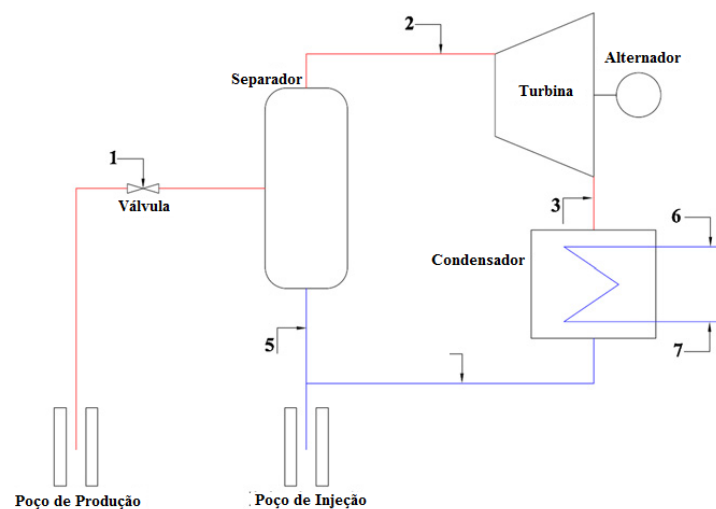


Figura 8: Esboço de unidade vapor “flash”, nomeadamente “single flash”, adaptado [11].

Por outro lado, pode ser possível um aproveitamento da água proveniente do separador para gerar vapor secundário, de modo a que haja mais vapor para criar energia eléctrica. Este processo designa-se por “double flash”, e é possível devido à existência de uma válvula de expansão.

Este processo é praticamente semelhante ao “single flash”, alterando-se somente o número de vaporizações e consequentemente o número de separadores, permitindo desde modo uma tecnologia com uma maior eficiência [11].

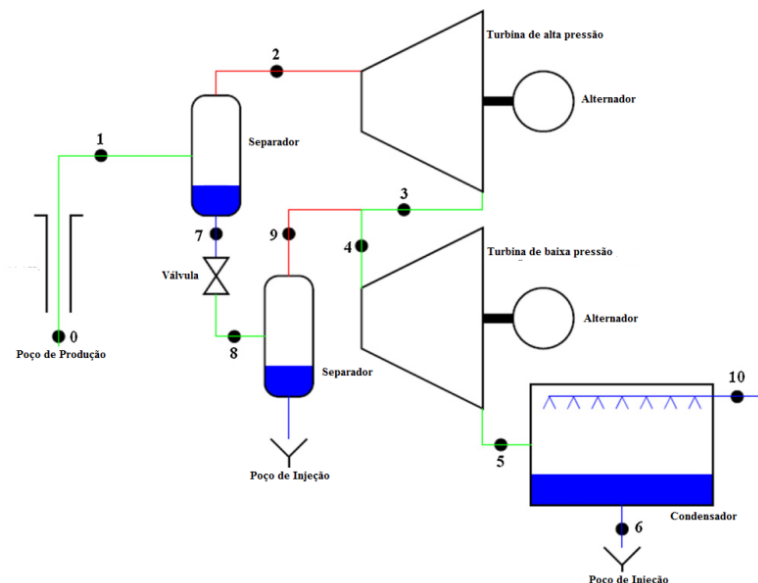


Figura 9: Esboço de unidade vapor “flash”, nomeadamente “double flash”, adaptado [11].

2.4.3. Sistema binário

Os sistemas binários para a produção de eletricidade são utilizados para fluidos geotérmicos de média temperatura, operando entre 100 a 150°C, tendo nestes últimos anos melhorado a nível de progressos de otimização da tecnologia [1].

As centrais que utilizam sistemas binários funcionam com dois fluidos, um proveniente do subsolo, recurso primário, e um de trabalho, geralmente um fluido orgânico, tipicamente n-pentano (C_5H_{12}), que tem um baixo ponto de ebulição e em que a pressão de vapor é elevada mesmo a baixas temperaturas quando comparado com o vapor convencional.

Este fluido de trabalho é processado num *Ciclo de Rankine* para produção de energia. Neste sentido, é necessário promover a transferência de calor do fluido geotérmico para o fluido de trabalho. Esta troca de calor faz-se através de permutadores, dispositivos que promovem a troca de calor entre fluidos, sem que ocorra a mistura dos mesmos.

De um modo simplificado, o fluido proveniente do subsolo, fluido geotérmico, entra num sistema que tem como objetivo aquecer fluido de trabalho, de modo a aumentar a sua temperatura e vaporizá-lo para gerar energia elétrica.

Posteriormente, o fluido de trabalho é arrefecido por um aerocondensador e volta à fase líquida para novo ciclo, enquanto o fluido geotérmico é reencaminhado para o subsolo, somente em fase líquida, devido às trocas de calor ocorridas anteriormente nos permutadores (figura 10). Assim, ao nível da operação, não são produzidas quaisquer emissões de CO_2 resultantes de combustão no processo de transformação de energia [4].

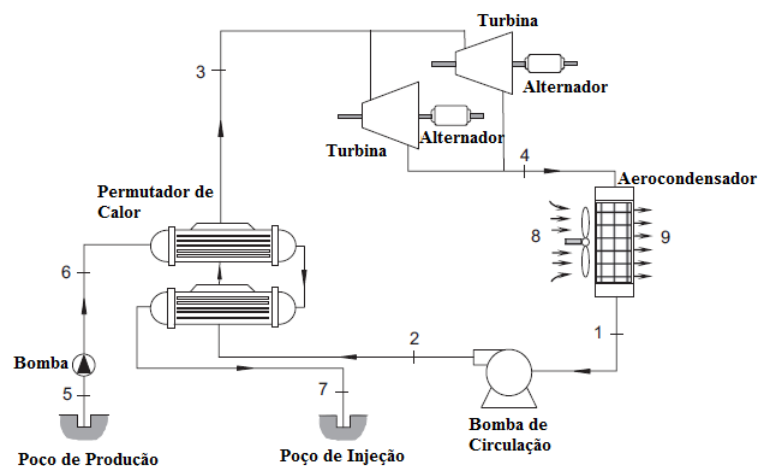


Figura 10: Esboço de sistema binário, adaptado [12].

Nos últimos tempos, tem-se desenvolvido uma nova tecnologia binária, operando com o *Ciclo Kalina*, cujo fluido de trabalho utiliza uma mistura de água e amoníaco. A relação entre esses componentes é variável em diferentes partes do sistema, de forma a ter-se um aumento da eficiência termodinâmica, chegando-se a rendimentos de 40%. Em termos industriais ainda não foi possível a sua utilização em larga escala, devido à falta de solidez de desempenho deste tipo de tecnologia.

Contudo, atualmente assiste-se a um crescimento na abordagem de sistemas binários pelo *Ciclo de Rankine*, pois são utilizados fluidos geotérmicos com temperaturas baixas e médias, o que permite que algumas localidades usufruam de uma exploração geotérmica para geração de potência elétrica [4].

2.5. Os aproveitamentos geotérmicos em São Miguel, Açores

A opção pela exploração geotérmica nos Açores está relacionada com as características geográficas do arquipélago, pois a sua formação e constituição estão ligadas à intensa atividade sísmica e vulcânica.

Com efeito, as nove ilhas que constituem o arquipélago dos Açores estão situadas junto da Crista Média Atlântica, na confluência de três placas tectónicas, a americana, a europeia e a africana (figura 11) e espalhadas por 600 km, no meio do Atlântico, emergindo da chamada Plataforma dos Açores, que é definida pela linha batimétrica de 200 m. Por esta razão, este arquipélago é uma região com intensa atividade sísmica e vulcânica.

De acordo com registos históricos, desde a descoberta dos Açores pelos Portugueses, no início do século XV, já ocorreram 26 erupções vulcânicas nestas ilhas e à sua volta.

A intensa atividade sísmica está concentrada sobretudo junto à Crista Média Atlântica e a uma estrutura tectónica denominada de fenda da Terceira, que corresponde à chamada junção tripla dos Açores [13].

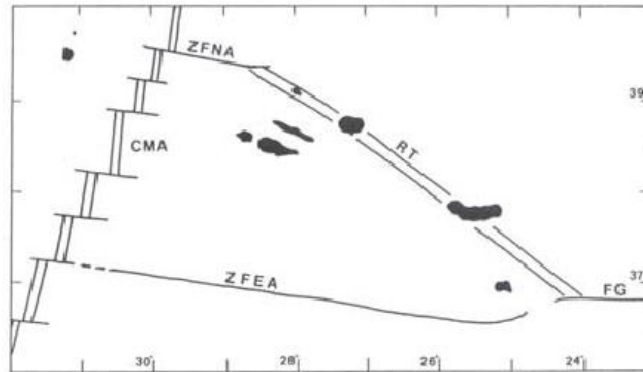


Figura 11: Principais estruturas tectónicas na região Autónoma dos Açores. CMA – Crista Média Atlântica; ZFNA- Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift (fenda) da Terceira; FG – Falha Glória [13].

Relativamente à ilha de São Miguel, existem três vulcões ativos, a saber: o das Sete Cidades, o das Furnas e o do Fogo/Água de Pau. É exatamente na encosta norte desta ilha que está localizado o vulcão do Fogo/Água de Pau (figura 12), cuja última erupção ocorreu no ano de 1563 e onde se encontra o campo geotérmico da Ribeira Grande, explorado pela SOGEO [13].

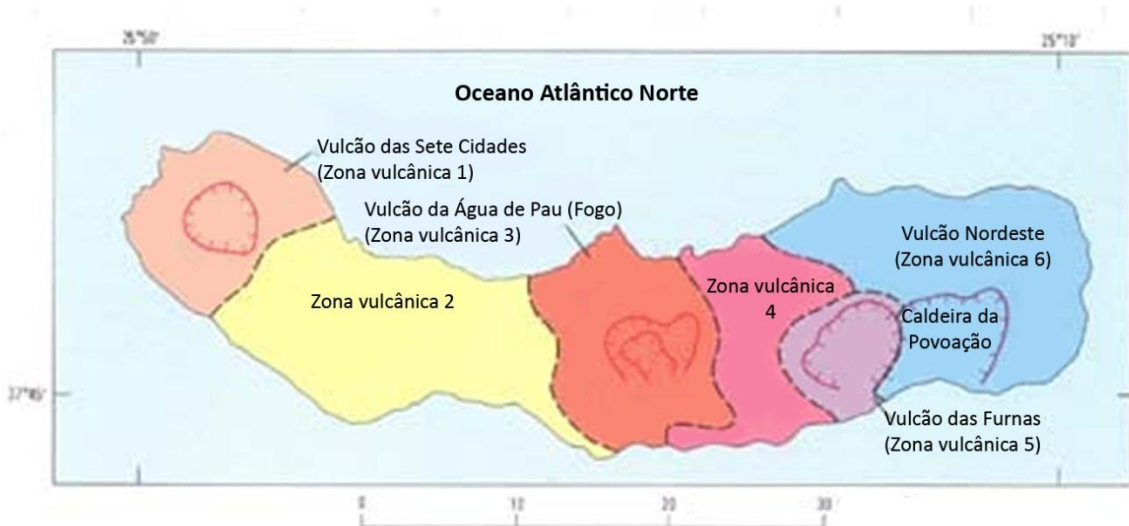


Figura 12: Mapa de vulcões de S. Miguel, adaptado [13].

Podem encontrar-se inúmeras manifestações geotérmicas junto de todos aqueles vulcões. Contudo, a presença de numerosas nascentes termais e de fumarolas é dominante junto ao vulcão

das Furnas, cujas manifestações impressionam pela sua intensidade e constituem uma importante atração turística [13].

O aproveitamento e a extração de calor na região torna-se viável técnica e economicamente nesta área, pois as zonas de captação estão relativamente a baixas profundidades, o que reduz os custos de investimento.

O estudo sobre a possibilidade de aproveitamento geotérmico em São Miguel, Açores, iniciou-se em 1973, com a descoberta de um reservatório geotérmico de alta entalpia, com temperatura superior a 200 °C, resultado de um estudo efetuado por uma sondagem geológica de investigação, levada a cabo pela Universidade de Dalhousie do Canadá [14].

Esta descoberta desencadeou um estudo de prospeção na zona circundante ao reservatório, com várias perfurações, ao longo dos anos posteriores àquela descoberta, com sucessos e insucessos, culminando em 1980 com a instalação da Central Geotérmica Piloto no Pico Vermelho, no concelho da Ribeira Grande, alimentada pelo poço PV1 [14]. Aquela central era constituída por uma turbina de vapor de contrapressão, fabrico da *Mitsubishi Heavy Industries*, acoplada a um gerador síncrono.

De acordo com as características do projeto, a turbina desenvolvia uma potência nominal de 3MW, porém nunca ultrapassou uma potência de 900 kW, pelo facto de não dispor de geofluido em quantidade suficiente, pois era abastecida somente pelo poço PV1. Tratou-se, todavia, de um passo importante na fase de desenvolvimento e afirmação do projeto geotérmico de São Miguel, visto que o processo de geração de energia instalado, destinou-se, exclusivamente, a um projeto-piloto de confirmação dos recursos do potencial geotérmico na zona, dispondo, por isso, de características próprias para este tipo de aplicação protótipo [8].



Figura 13: Central geotérmica piloto do Pico Vermelho (3MW) [8].

Em termos estatísticos e históricos, a exploração piloto no Pico Vermelho, até à sua desativação, produziu cerca de 84.0 GWh, em mais de 136 mil horas de funcionamento. Em 2005,

deu-se o seu encerramento, dado que foi considerada, pelos estudos desenvolvidos, como uma central obsoleta, tendo sido aconselhada a sua reestruturação com uma nova central ou a inclusão de uma unidade de condensação [3].

A partir de então, o projeto desenrolou-se com a experiência adquirida e neste momento, a empresa SOGEO, SA, fundada em 1990, tem a missão de explorar duas centrais situadas na costa norte de São Miguel, mais propriamente na encosta da Lagoa do Fogo, incluídas no Campo Geotérmico da Ribeira Grande. A potência total era de 23 MW em 2007 [15], distribuída pela Central Geotérmica da Ribeira Grande (CGRG) com 13 MW, sector de Cachaços-Lombadas e pela Central Geotérmica do Pico Vermelho com 10MW, sector do Pico Vermelho. As centrais situadas neste campo geotérmico são abastecidas por fluidos, com a fase líquida em maior expressão do que a de vapor e cuja temperatura máxima média é de 237.5 °C. As formações de maior produção surgem entre 500 e 1200m de profundidade [8].

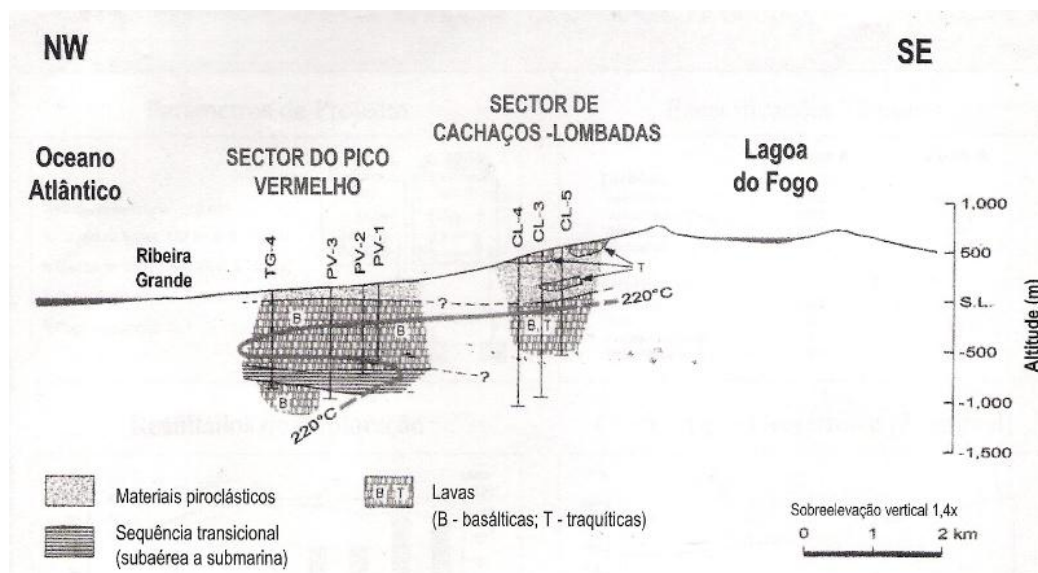


Figura 14: Corte esquematizado do Campo Geotérmico da Ribeira Grande [14].

2.5.1. Central Geotérmica da Ribeira Grande

A instalação da Central Geotérmica da Ribeira Grande (CGRG) foi planeada em duas fases, com o objetivo de possuir uma potência de 13 MW. A primeira fase, fase A, entrou em exploração em 1994 e é constituída por dois grupos turbogeradores duplos ($2 \times 2.5 \text{ MW} = 5 \text{ MW}$). Em 1998, durante a fase B, foram instalados mais dois grupos de turbogeradores ($2 \times 4 \text{ MW} = 8 \text{ MW}$), de forma a aumentar a potência na produção de energia.

A tecnologia usada na conversão de energia pela CGRG recaiu num sistema binário, gerando segundo o *Ciclo de Rankine*, apoiada pelo fluido secundário n-pentano, sendo uma opção

válida, de acordo com as características dos recursos geotérmicos existentes no Campo Geotérmico da Ribeira Grande, pois utiliza fluido geotérmico em estado líquido dominante de baixa e média temperatura.

No total, a Central da Ribeira Grande dispõe de cinco poços de produção, três dos quais verticais (CL1, CL2 e CL3), dois direcionais (CL5 e CL6) e um poço de injeção (CL4). As perfurações atingem profundidades entre 1040 m a 2029 m, com temperaturas máximas registadas de 247 °C.

É possível verificar uma grande estabilidade desde o início da exploração. Contudo, nestes últimos anos tem-se assistido a um decréscimo pouco significativo de produção, relacionado com o declínio normal da exploração geotérmica. Para salvaguardar uma exploração contínua, este aspeto tem sido corrigido através da execução de poços adicionais. Assim sendo, abriu-se o poço de extração geotérmico CL7 [8].



Figura 15: Central Geotérmica da Ribeira Grande [8].

2.5.2. Central Geotérmica do Pico Vermelho

Após a desativação da central piloto, em consequência do estudo realizado, efetuou-se a remodelação da Central Geotérmica do Pico Vermelho (CGPV) com a construção e montagem de uma central de tecnologia binária contratada à *Ormat Industries Ltd.*, tendo-se iniciado a sua exploração em Janeiro de 2007.

A central dispõe de um grupo gerador com uma potência de 10 MW, é abastecida por cinco poços de produção (PV2, PV3, PV4, PV7 e PV8) e possui dois poços de injeção (PV5 e PV6) de profundidade 1367m e 1102m respetivamente. Em relação aos poços de produção, as profundidades rondam os 1000m e a temperatura máxima observada é de 243 °C [8].

Esta central do Pico Vermelho é a que tem maior produção, dado que existe abundância de geofluido nos cinco poços de produção que a sustentam, registando-se mesmo um excesso de geofluido que poderá ser aproveitado numa eventual expansão [3].



Figura 16: Central Geotérmica do Pico Vermelho [8].

2.6. Impacto económico da produção de eletricidade geotérmica em São Miguel, Açores

Tal como acontece em todos os locais em vias de desenvolvimento, a ilha de São Miguel tem vindo, ao longo dos anos, a aumentar os níveis de necessidade energética, que resultam do seu crescimento económico, e que tem sido satisfeita com a importação de produtos combustíveis para geração de energia elétrica. Esta situação é um fator negativo em relação à sua economia e desenvolvimento social, exatamente devido à dependência energética do exterior.

Com a instalação das centrais geotérmicas em São Miguel, a região tem vindo a diminuir o grau de dependência energética, pois ocorre um melhor aproveitamento dos recursos internos, permitindo a redução da aquisição de produtos petrolíferos e uma menor exposição às flutuações dos preços do mercado do petróleo, pelo que se aumenta a segurança energética dos Açores, com benefícios notórios para a sua economia.

Segundo um estudo realizado recentemente [16], a produção total de eletricidade regional, entre o período de 1990 e 2008, tem vindo a aumentar, com uma taxa anual de crescimento de 5.8%. Relativamente à ilha de São Miguel, a mais populosa e economicamente a mais desenvolvida, a produção de energia apresenta uma quota de 53.7% da produção total regional [16].

A figura seguinte aponta a origem da produção de eletricidade na ilha de São Miguel em 2008, verificando-se deste modo que as energias renováveis representam uma contribuição de 43%, com a geração geotérmica a contribuir com 89.8% para esta quota.

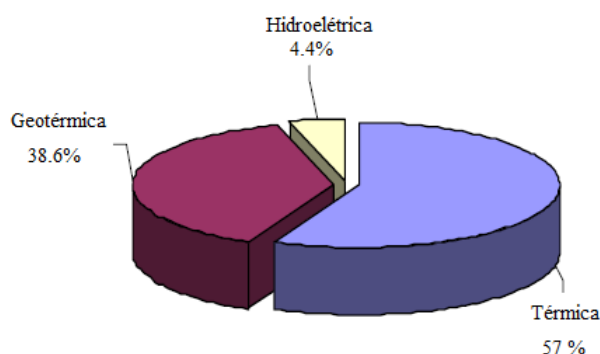


Figura 17: Origem da produção total de eletricidade em São Miguel, adaptado [16].

Na figura 18, é possível confirmar, que durante o período entre 1990 e 2008, a energia térmica de origem fóssil tem vindo a diminuir o seu contributo para a produção total de eletricidade, devido ao aumento do papel da energia geotérmica.

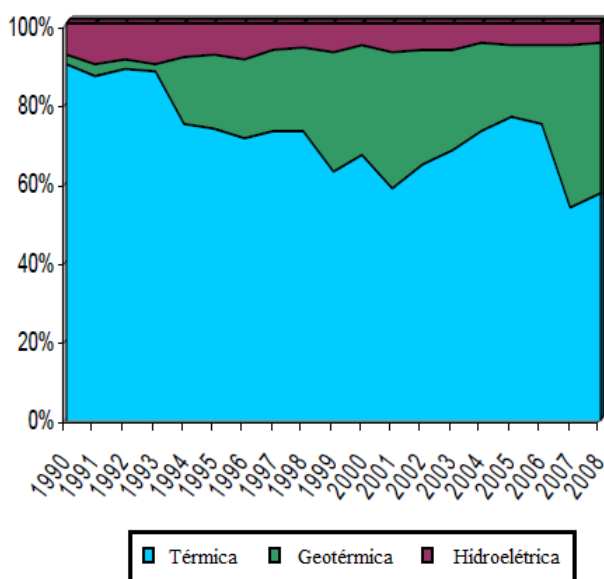


Figura 18: Produção total de eletricidade em São Miguel, adaptado [16].

Como consequência imediata da utilização da energia geotérmica na produção de eletricidade na região, os indicadores económicos demonstram que ocorreu uma redução da importação de combustíveis fósseis, contribuindo assim para a diminuição de custos a este nível [16]. Assim,

devido à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis fica claro que a energia geotérmica é uma mais-valia socioeconómica para a Região Autónoma dos Açores.

3. Metodologia

Na estruturação do plano de trabalho, pretendeu-se estabelecer objetivos que correspondessem a uma boa compreensão e análise do caso em estudo.

Seguidamente, é apresentada a lista das tarefas e a calendarização da ordem de trabalhos, adaptado face à versão inicial.

1. Tomar conhecimento da utilização de centrais geotérmicas à escala mundial; revisão bibliográfica do estado de arte relativo a:
 - i. Importância do aproveitamento de energia geotérmica;
 - ii. Tecnologias utilizadas;
 - iii. Modos de funcionamento;
2. Conhecer os estudos da prospeção geotérmica, realizados nas zonas geográficas com potencial de exploração;
3. Conhecer o funcionamento da exploração geotérmica, bem como da tecnologia utilizada e das etapas do processo;
4. Perceber, modelar e simular o sistema da central em condições nominais;
5. Selecionar os aspetos técnicos cruciais ao funcionamento do ciclo térmico de uma central geotérmica bem como identificar as variáveis críticas;
6. Corrigir aspetos gerais da dissertação e elaborar a componente escrita;

Tabela 2: Calendarização da realização da dissertação.

		Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
Tarefas	1	█	█							
	2		█							
	3			█	█					
	4				█	█	█			
	5					█	█	█		
	6								█	█

3.1. Conhecimento da utilização de centrais geotérmicas à escala mundial

A revisão bibliográfica recaiu sobre a importância do aproveitamento de energia geotérmica, das tecnologias utilizadas e do modo de funcionamento, desde as condições necessárias para a extração e utilização da fonte de energia endógena, até à tecnologia de conversão que melhor se enquadra nas características do campo geotérmico.

Além disso a revisão bibliográfica também proporcionou o conhecimento das formas de exploração deste tipo de recurso e da sua evolução ao longo dos tempos, indo ao encontro das

potencialidades de cada país e resultando num aumento de produção, devido ao aparecimento de novos projetos que possibilitaram uma maior exploração a nível global.

Com o objetivo de materializar todos os conhecimentos, foi possível concretizar idas à sede da empresa SOGEO, o que permitiu colher informações úteis, nomeadamente no que se refere às características de exploração, bem como um reencaminhamento e indicação da bibliografia a utilizar, facilitando o aprofundamento dos conhecimentos requeridos à concretização do projeto.

3.2. Prospeção geotérmica

Em termos da prospeção geotérmica, a pesquisa teve como base a análise de artigos de investigadores e variada documentação o que possibilitou recolher informações importantes para perceber a evolução da exploração geotérmica na ilha de São Miguel e, bem assim, as condições que a zona geográfica fornece, especificamente a nível de entalpia.

3.3. Tecnologia de conversão

Relativamente à perceção do funcionamento da tecnologia de conversão utilizada pelas centrais geotérmicas nos Açores, esta foi possível graças às explicações, informações e esclarecimentos fornecidos pelos profissionais da empresa SOGEO.

Estas informações foram pormenorizadas e amplamente discutidas e debatidas de forma a possibilitar uma melhor compreensão e perceção de todo o funcionamento da central, desde as interações do fluido geotérmico com o fluido de trabalho até à conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Para poder efetuar a modelação, a SOGEO disponibilizou parâmetros funcionais do sistema, de forma a que fosse possível manuseá-los e retirar ilações sobre a influência das diversas variáveis do sistema, sempre com base em possíveis alterações no funcionamento do ciclo térmico.

Na figura 19, está representado o circuito termodinâmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho, situada na Ribeira Grande, com uma potência líquida de 10MW. A central, para o caso concreto de uma temperatura ambiente, designada por temperatura da fonte fria, de 22 °C, produz uma potência de 11,470 MW, em que 1,470MW se destina ao autoconsumo da central.

O circuito térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho é algo idêntico ao da Central Geotérmica da Ribeira Grande, utilizando o *Ciclo de Rankine* com n-pentano como fluido de trabalho para a geração de energia elétrica e diferenciando-se, em termos gerais, pela quantidade utilizada de fluido geológico e pela potência elétrica do alternador, pois a potência final é constituída pela soma de potência de vários grupos apoiados por turbinas de alta e baixa pressão.

Assim sendo, a modelação foi efetuada somente para a Central Geotérmica do Pico Vermelho, para a qual foram fornecidos os parâmetros nominais do sistema, representados na figura 19 [17].

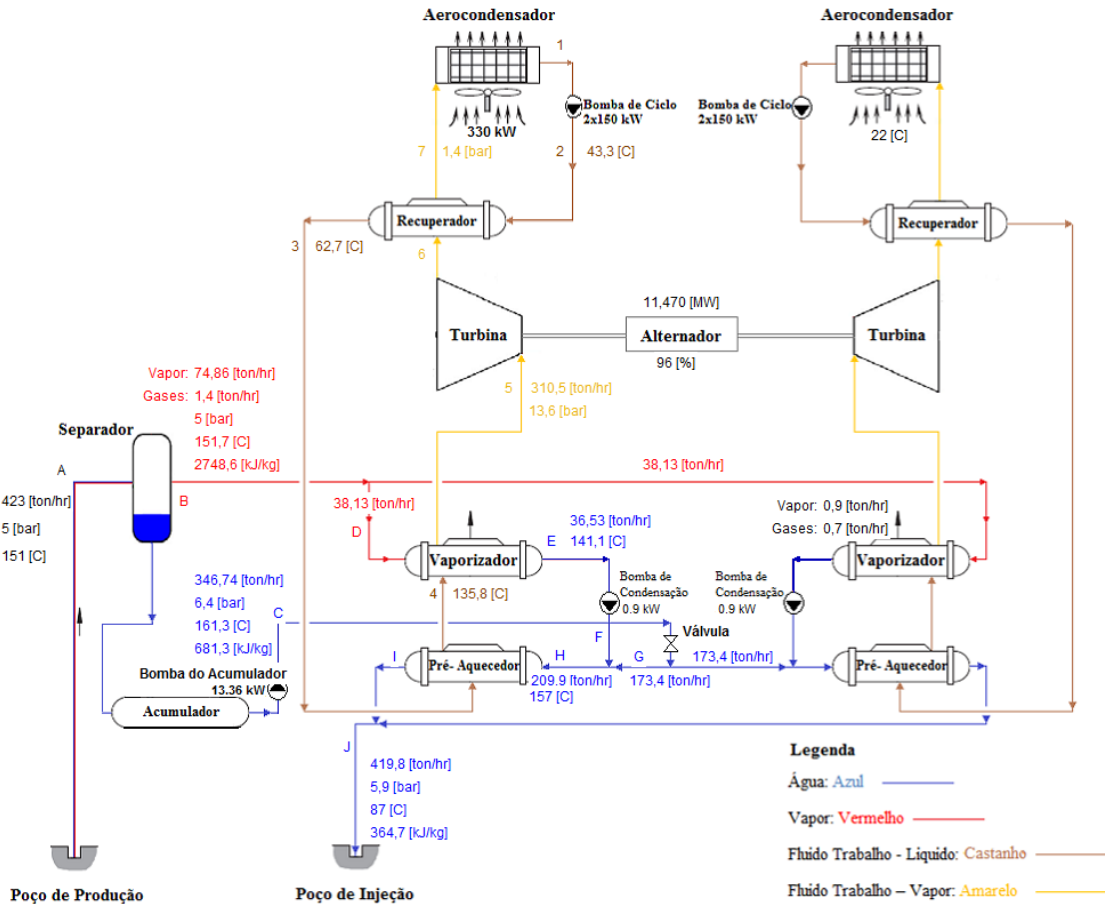


Figura 19: Representação do ciclo térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho com valores fornecidos [17].

Relativamente à representação do ciclo térmico da figura 19, o caudal do fluido geotérmico, assinalado com as cores vermelha e azul, atravessa o separador onde ocorre a divisão do fluido em estados gasoso e líquido, percorrendo posteriormente estes fluidos trajetórias diferentes. Os circuitos representados na figura são simétricos sendo preocupação dos operadores da central injetar nos dois circuitos o mesmo caudal geotérmico, obtendo-se deste modo duas operações simétricas para obter uma potência final adequada.

O fluido de trabalho, representado com cores castanha e amarela, é um fluido orgânico, n-pentano, devido à adequação das suas características.

Para efeitos de cálculo, as perdas de carga e as perdas térmicas não são consideradas na modelação.

Quanto ao funcionamento da central, o fluido geotérmico é extraído do interior da Terra em fase de mistura bifásica, em que o estado líquido, designado por brine, representa a fase de maior predominância. Seguidamente o fluido é encaminhado para o separador, que consiste num vaso vertical utilizado para separar o líquido do vapor, em que a gravidade faz com que o líquido se deposite no fundo do vaso e o vapor, com uma velocidade minimizada, ascenda à superfície passando por uma faixa drenante, o que impede a mistura de pequenas gotas com o vapor. Assim, o vapor, na condição vapor saturado, é encaminhado para o coletor/distribuidor de vapor da central, e o líquido para um reservatório acumulador, onde assistido por uma bomba, é pressurizado e enviado para o coletor/distribuidor de brine da central.

A transferência de calor do fluido primário para o fluido de trabalho ocorre nos permutadores designados por vaporizador e pré-aquecedor. No primeiro caso ocorre transferência de calor do fluido primário em estado vapor, verificando-se a condensação do fluido e a libertação quer dos gases não condensáveis presentes na extração do fluido geotérmico quer de uma pequena percentagem de vapor. Com apoio de uma bomba, o fluido condensado é reintegrado no circuito do brine após passagem por uma válvula redutora de pressão. De seguida, este fluido atravessa o pré-aquecedor, onde cede calor ao fluido de trabalho. O brine, misturado com o fluido condensado, é encaminhado para os poços de injeção, onde é promovida a recarga do reservatório geotérmico proporcionando uma contínua extração de geofluido.

Relativamente ao fluido de trabalho, este é processado na turbina acoplada ao alternador utilizado na produção de energia elétrica. Após a passagem pela turbina o fluido de trabalho perde pressão e entalpia e parte do seu calor latente é transferido num outro permutador, designado como recuperador. De seguida, o n-pentano passa num aerocondensador, onde é rejeitado o calor para o ambiente, como resultado da condensação do fluido de trabalho. Com esta condensação e com um auxílio de uma bomba, que aumenta novamente a pressão do fluido, este é encaminhado para o recuperador onde recebe calor remanescente do vapor do fluido de trabalho acabado de expandir na turbina. Seguidamente, o fluido de trabalho, iniciando novo ciclo, reencaminha-se para os dispositivos pré-aquecedor e vaporizador onde a sua entalpia e temperatura são aumentadas, pois recebe o calor do brine e do vapor do geofluido.

3.4. Ferramentas de modelação utilizadas

É de referir que a modelação da central foi efetuada a partir dos dados nominais do sistema facultados pela empresa SOGEO e com recurso ao programa *Engineering Equation Solver (EES)*.

O *software* EES foi o programa escolhido para a modelação do sistema da central geotérmica, devido à facilidade da sua utilização na resolução de sistemas de equações. Este programa possui uma base de dados relativa às propriedades dos fluidos e possui uma biblioteca de

funções matemáticas que facilitam o cálculo e as conversões das várias unidades. Como forma de simplificar o cálculo, podem ser definidas as variáveis independentes desejadas durante a programação.

Por outro lado, o programa também oferece a possibilidade de apresentação de diagramas termodinâmicos, bem como a apresentação de esquemas, tabelas e gráficos.

Deste modo, com a utilização do *software* EES conseguiu conceber-se um modelo, que permite modelar o sistema e simular as consequências decorrentes de alterações de algumas variáveis.

A modelação efetuada serve de base para um estudo, em que, por modificação dos valores de algumas variáveis, podem obter-se novos estados do sistema e prever as consequências dessas modificações sobre o funcionamento da central.

3.5. Procedimento do caso de estudo

Depois de modelar e de se obter todas as condições necessárias para um enquadramento das etapas do sistema, foi possível fazer simulações, variando alguns parâmetros críticos que influenciam o funcionamento do ciclo térmico da central. Foi assim sugerido pela SOGEO um estudo das seguintes variáveis para avaliação do seu impacto sobre o desempenho da central.

1. Variação de um ponto percentual (1%) da quantidade de gases não condensáveis (conhecido por GNC) presentes nos poços de extração;
2. Introduzir cinco pontos percentuais (5%) de geofluido em estado líquido no circuito de vapor posteriormente ao separador;
3. Diminuir o caudal de fluido geotérmico extraído em quatro pontos percentuais (4%);
4. Diminuição de dez pontos percentuais (10%) da potência calorífica entre os fluidos quente e frio no vaporizador e no pré-aquecedor;
5. Queda de pressão do geofluido de dez pontos percentuais (10%);
6. Variação da eficiência isentrópica da turbina em dois pontos percentuais (2%);

Por fim é apresentado um estudo para a variação do caudal do fluido de trabalho e para a variação do caudal do fluido primário, de modo a perceber como se garante uma melhor compensação nas perdas de potência líquida, causadas por uma eventual variação das propriedades críticas anteriormente referidas.

4. Modelação

Este capítulo tem como objetivo modelar as transformações verificadas nos fluidos primário e de trabalho ao longo do sistema térmico.

A figura 19 mostra o diagrama de princípio do funcionamento térmico de apoio à geração de energia elétrica na Central Geotérmica Pico Vermelho, em que a central é apoiada por 5 poços, designados de poços de produção, nos quais se capta o fluido primário. Contudo, na realidade, cada um dos 5 poços de produção contém um separador, um acumulador e uma bomba, sendo o caudal de cada poço injetado no sistema. A central contém dois circuitos simétricos independentes para obter a potência final desejada, havendo por parte dos operadores da central a preocupação de equilibrar o caudal nos dois sistemas.

Desde modo, na figura 19 representou-se um esquema simplificado que apresenta uma situação de equilíbrio dos poços, o que corresponde à situação nominal de operação.

Na modelação foi utilizada a equação da conservação de energia para sistemas abertos;

$$\begin{aligned} \frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_{entra} \dot{m}_{entra} * (h_{entra} + \frac{V_{entra}^2}{2} + gz_{entra}) \\ - \sum_{sai} \dot{m}_{sai} * (h_{sai} + \frac{V_{sai}^2}{2} + gz_{sai}) \end{aligned} \quad (1)$$

Em estado permanente e desprezando as variações de energia cinética e potencial à entrada e à saída de cada um dos sistemas, a equação reduz-se a:

$$\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_{entra} \dot{m}_{entra} * h_{entra} - \sum_{sai} \dot{m}_{sai} * h_{sai} = 0 \quad (2)$$

Adicionalmente a modelação socorre-se da equação de conservação da massa;

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum_{entra} \dot{m}_{entra} - \sum_{sai} \dot{m}_{sai} \quad (3)$$

Em estado permanente a equação anterior reduz-se a:

$$\sum_{entra} \dot{m}_{entor} - \sum_{sai} \dot{m}_{sai} = 0 \quad (4)$$

Estes dois princípios foram aplicados a cada um dos sistemas que compõem a central geotérmica, de forma a possibilitar a determinação das potências (térmica e mecânica) trocadas em cada um deles e determinar as propriedades dos fluidos atendendo à natureza das transformações sofridas. As características dos fluidos em alguns pontos-chaves do circuito foram fornecidas pela SOGEO.

4.1. Caracterização das transformações sofridas pelo fluido primário

A utilização do fluido geotérmico tem como objetivo alimentar o sistema, concretamente fornecendo calor, de modo a aquecer o fluido de trabalho, que é utilizado na produção de energia mecânica e na sua transformação em energia elétrica.

Assim, e reportando-nos às designações constantes da figura 19;

4.1.1. Fluido geotérmico à cabeça do poço

→ Natureza do fluido geotérmico no ponto A:

O fluido geotérmico no ponto A encontra-se em estado de mistura bifásica, líquido-vapor. Para calcular o valor do título da mistura, x , calculou-se a percentagem de fluido líquido através do valor deste caudal a jusante do separador, pois corresponde à quantidade presente no geofluido.

Como a $x=0$ corresponde líquido saturado e a $x=1$, vapor saturado, chegou-se a um valor de título para a mistura bifásica de $x=0.18$, com base nas informações prestadas pela SOGEO.

→ Dados fornecidos do fluido:

$$\dot{m}_A = 423[\text{ton/hr}] \approx 106.59[\text{kg/s}]$$

$$P_A = 5[\text{bar}] = 500 \text{ kPa}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$T_A = T[\text{'Água'}; P = P_A; x = 0.18] (\text{°C}) \quad (5)$$

$$\text{Entalpia}_A = h_A = h[\text{'Água'}; P = P_A; x = 0.18] (\text{kJ/kg}) \quad (6)$$

$$\text{Entropia}_A = s_A = s[\text{'Água'}; P = P_A; x = 0.18] (\text{kJ/kg} * \text{K}) \quad (7)$$

4.1.2. Fornecimento de vapor (ponto B)

→ Natureza de transformação A - B:

O fluido no ponto B encontra-se em estado de vapor saturado, devido à separação do fluido geotérmico no separador.

→ Dados fornecidos do fluido:

$$\dot{m}_B = 74.86[\text{ton/hr}] \approx 18.86[\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{GNC} = 1.4[\text{ton/hr}] \approx 0.3528[\text{kg/s}]$$

$$P_B = 5[\text{bar}] = 500 \text{ kPa}$$

$$T_B = 151.7 [^\circ\text{C}]$$

$$h_B = 2748.6 [\text{kJ/kg}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$s_B = s [\text{'Vapor'}; P = P_B; x = 1] \quad (8)$$

4.1.3. Fornecimento de brine (ponto C)

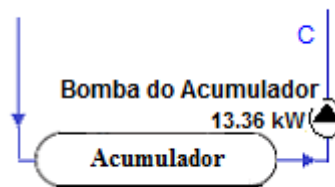


Figura 20: Esquematização do ponto C.

→ Natureza de transformação A - C:

No ponto C o fluido encontra-se a uma pressão de 6.4 bar, resultante da passagem do fluido pela bomba do acumulador, em que o aumento da pressão transforma o fluido do estado líquido saturado, proveniente do separador, em líquido sub-arrefecido.

→ Dados fornecidos do fluido:

$$\dot{m}_C = 346.7[\text{ton/hr}] \approx 87.38[\text{kg/s}]$$

$$P_C = 6.4[\text{bar}] = 640 \text{ kPa}$$

$$T_C = 161.3 [^\circ\text{C}]$$

→ Caracterização da bomba do acumulador:

$$\dot{W}_{\text{Bomba do acumulador}} = 13.36 [\text{kW}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$T_C = T [\text{'Água'}; P = P_C; T = T_C] \quad (9)$$

$$h_C = h [\text{'Água'}; P = P_C; T = T_C] \quad (10)$$

$$s_C = s [\text{'Água'}; P = P_C; T = T_C] \quad (11)$$

4.1.4. Vaporizador (transformação D - E)

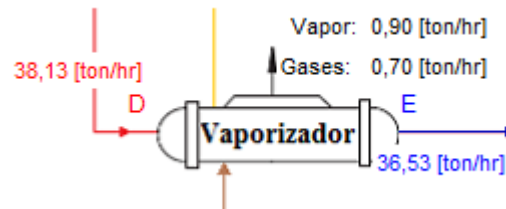


Figura 21: Esquematização da transformação D – E.

→ Natureza de transformação D – E:

Na passagem de D para E, o vapor saturado é condensado no vaporizador até ao estado de líquido sub-arrefecido. No vaporizador assiste-se simultaneamente à libertação dos gases não condensáveis (GNC) contidos no geofluido, misturados com algum vapor. O calor resultante da condensação de vapor é utilizado para aquecer o fluido de trabalho.

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto D:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_B/2 = 38.13[\text{ton/hr}] \approx 9.61[\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{GNC,D} = \dot{m}_{GNC}/2 = 0.7[\text{ton/hr}] \approx 0.18[\text{kg/s}]$$

$$P_D = 5[\text{bar}] = 500 \text{ kPa}$$

$$T_D = 151.7 [^\circ\text{C}]$$

$$h_D = 2748.6 [\text{kJ/kg}]$$

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto E:

$$\dot{m}_E = 36.53[\text{ton/hr}] \approx 9.21[\text{kg/s}]$$

$$P_E = 5[\text{bar}] = 500 \text{ kPa}$$

$$T_E = 141.1 [^\circ\text{C}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$s_D = s [\text{'Vapor'}; P = P_D; x = 1] \quad (12)$$

$$h_E = h [\text{'Água'}; P = P_E; T = T_E] \quad (13)$$

$$s_E = s [\text{'Água'}; P = P_E; T = T_E] \quad (14)$$

No desenvolvimento dos cálculos, relativamente aos gases não condensáveis, foi considerado que o dióxido de carbono (CO₂) seria o único gás não condensável presente, pelo facto de reunir a maior percentagem de gases presentes no geofluido, cerca de 99% [5].

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{vaporizador, fluido quente}} &= \dot{m}_D * h_D + \dot{m}_{GNC,D} * (h_{GNC_{entra}} - h_{GNC_{sai,escape}}) - \dot{m}_{\text{vapor,escape}} \\ & * h_{\text{vapor,escape}} - \dot{m}_E * h_E \end{aligned} \quad (15)$$

Onde:

$$h_{GNC_{entra}} = h[CO_2; T = T_{GNC_{entra}}], \text{ onde } T_{GNC_{entra}} = T_D$$

$$h_{GNC_{sai,escape}} = h[CO_2; T = T_{GNC_{sai}}], \text{ onde } T_{GNC_{sai}} = T_D$$

Neste caso as entalpias dos GNC são as mesmas à entrada e à saída, logo o calor cedido pelos gases não condensáveis é igual a zero.

$$\dot{m}_{\text{vapor,escape}} = 0.9[\text{ton/hr}] \approx 0.2268[\text{kg/s}]$$

$$\begin{aligned} h_{\text{vapor,escape}} &= h[\text{'Vapor'}; T = T_E; P = P_{\text{vapor,escape}}], \text{ onde } P_{\text{vapor,escape}} = 3.79 [\text{bar}] \\ &= 379 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Relativamente à pressão do vapor de escape no vaporizador, foi utilizada a *Lei de Dalton*:

$$P_D = P_{\text{escape}} = P_{\text{vapor,escape}} + P_{GNC,escape} \quad (16)$$

As pressões parciais foram obtidas levando em conta que:

$$\frac{\frac{\dot{m}_{GNC,D}}{M_{GNC}}}{P_{GNC,escape}} = \frac{\frac{\dot{m}_{GNC,D}}{M_{GNC}} + \frac{\dot{m}_{\text{vapor,escape}}}{M_{\text{vapor}}}}{P_D}$$

$$P_{\text{vapor,escape}} = P_D - P_{GNC,escape}$$

4.1.5. Bomba de condensação (transformação E – F)

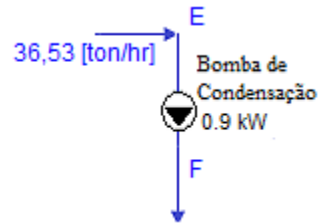


Figura 22: Esquemática da transformação E – F.

→ Natureza de transformação E - F:

Ao longo de E para F, o fluido passa por uma bomba de condensação, aumentando desta forma a pressão; conseqüentemente a temperatura e a entalpia também aumentam. Contudo o fluido permanece em estado sub-arrefecido.

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto F:

$$\dot{m}_F = 36.53[\text{ton/hr}] \approx 9.21[\text{kg/s}]$$

$$P_F = 5.9[\text{bar}] = 590 \text{ kPa}$$

→ Caracterização da bomba de condensação:

$$\dot{W}_{\text{Bomba de condensação}} = 0.9 \text{ [kW]}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$\dot{W}_{\text{Bomba de condensação}} = \dot{m}_E (h_F - h_E) \quad (17)$$

Pela expressão 17, calcula-se a entalpia no ponto F (h_F).

$$T_F = T [\text{Água}; P = P_F; h = h_F] \quad (18)$$

$$s_F = s [\text{Água}; P = P_F; h = h_F] \quad (19)$$

4.1.6. Válvula redutora de pressão (transformação C – G)

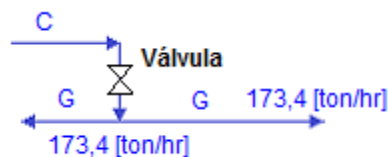


Figura 23: Esquemática da transformação C – G.

→ Natureza de transformação C - G:

Na passagem de C para G, o fluido primário em estado líquido passa por uma válvula redutora de pressão, diminuindo-se a pressão. A entalpia permanece constante, a temperatura diminui e o fluido passa a estar em mistura bifásica.

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto G:

$$\dot{m}_G = 173.4[\text{ton/hr}] \approx 43.69[\text{kg/s}]$$

$$P_G = 5.9[\text{bar}]$$

$$h_G = h_C$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$T_G = T [\text{'Água'}; P = P_G; h = h_G] \quad (20)$$

$$s_G = s [\text{'Água'}; P = P_G; h = h_G] \quad (21)$$

4.1.7. Mistura de caudais (ponto H)

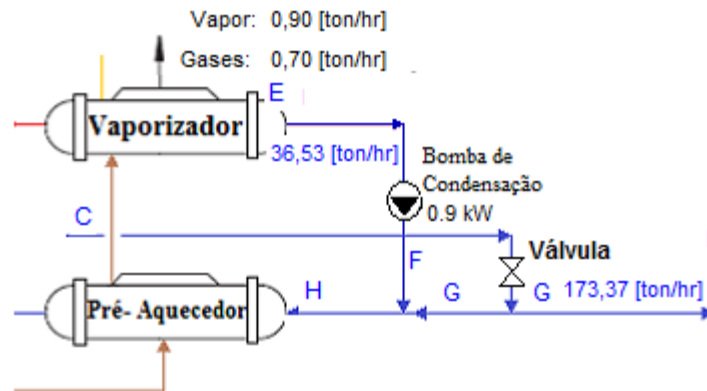


Figura 24: Esquematisação o aglomerado de caudais no ponto H.

→ Natureza de transformação:

O fluido a montante do pré-aquecedor encontra-se exclusivamente no estado de líquido sub-arrefecido, pois é uma mistura de brine com a água proveniente da condensação do vapor geotérmico, de onde foi redirecionado pela bomba de condensação. Desta forma o caudal neste ponto é dado pela soma de caudais, $\dot{m}_G + \dot{m}_F$.

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto H:

$$\dot{m}_H = \dot{m}_G + \dot{m}_F = 209,9[\text{ton/hr}] \approx 52,89[\text{kg/s}]$$

$$P_H = 5,9[\text{bar}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$h_H = \frac{(\dot{m}_F * h_F + \dot{m}_G * h_G)}{\dot{m}_H} \quad (22)$$

$$T_H = T [\text{'Água'}; P = P_H; h = h_H] \quad (23)$$

$$s_H = s [\text{'Água'}; P = P_H; h = h_H] \quad (24)$$

4.1.8. Pré – Aquecedor (transformação H – I e J)

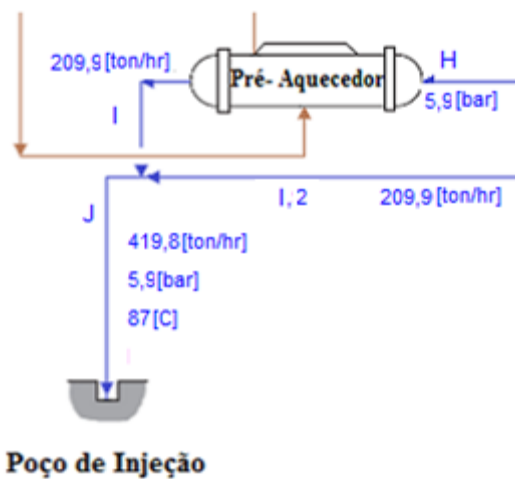


Figura 25: Esquemática da transformação H – I.

→ Natureza de transformação H – I e J:

Ao longo da passagem de H para I, o fluido primário (fluido quente) cede calor ao fluido de trabalho (fluido frio), ocorrendo assim uma diminuição da temperatura e da entalpia no ponto I. Contudo o fluido permanece em estado sub-arrefecido.

Posteriormente o fluido é reencaminhado para o poço de injeção, e durante este trajeto é adicionado fluido proveniente do circuito simétrico da central.

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto I:

$$\dot{m}_I = \dot{m}_H = 209,9[\text{ton/hr}] \approx 52,89[\text{kg/s}]$$

$$P_I = 5,9[\text{bar}] = 590 \text{ kPa}$$

$$T_I = 87 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

→ Dados fornecidos do fluido primário no ponto J:

$$\dot{m}_J = \dot{m}_I + \dot{m}_{l,2} = 419.8[\text{ton/hr}] \approx 52.89[\text{kg/s}]$$

$$P_J = 5.9[\text{bar}] = 590 \text{ kPa}$$

$$T_J = 87 [^\circ\text{C}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$h_I = h_J = h [\text{'Água'}; P = P_I; T = T_I] \quad (25)$$

$$s_I = s_J = s [\text{'Água'}; P = P_I; T = T_I] \quad (26)$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{\text{pré-aquecedor, fluido quente}} = \dot{m}_H * (h_H - h_I) \quad (27)$$

4.2. Caracterização das transformações sofridas pelo fluido de trabalho

Para o cálculo das propriedades do fluido de trabalho, n-pentano, existem sete pontos a considerar, tal como está explícito na figura 19, por serem pontos que representam o estado do fluido após a ação de transformação do seu estado.

Em seguida, apresentam-se as expressões dos cálculos que serviram de base para completar a informação necessária do estudo, em complemento aos dados fornecidos pela SOGEO, expostos na figura 19.

4.2.1. Bomba de ciclo (transformação 1 – 2)

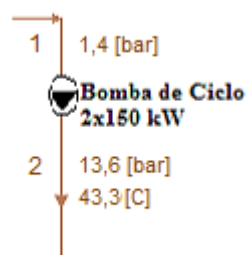


Figura 26: Esquemática da transformação 1 – 2.

→ Natureza de transformação 1 - 2:

A transformação do fluido de trabalho entre os pontos 1 e 2, dá-se essencialmente pela passagem nas duas bombas em paralelo, ocorrendo desta forma um aumento da pressão, temperatura, entalpia e entropia. Relativamente ao estado do fluido, ele permanece em líquido sub-arrefecido após a transformação

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 1;

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_1 = 1.4 [\text{bar}] = 140 \text{ kPa}$$

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 2;

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_2 = 13.6 [\text{bar}] = 1360 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 43.3 [^\circ\text{C}]$$

→ Caracterização da bomba de ciclo;

$$\dot{W}_{Bomba\ de\ ciclo} = 150 [\text{kW}]$$

→ Equações de modelação utilizadas;

$$h_2 = h [n - Pentano'; P = P_2; T = T_2] \quad (28)$$

$$s_2 = s [n - Pentano'; P = P_2; T = T_2] \quad (29)$$

$$\dot{W}_{Bomba\ de\ ciclo} = \frac{\dot{m}_{n-pentano}}{2} * (h_2 - h_1) \quad (30)$$

Pela expressão 30, calcula-se a entalpia no ponto 1 (h_1).

$$T_1 = T [n - Pentano'; P = P_1; h = h_1] \quad (31)$$

$$s_1 = s [n - Pentano'; P = P_1; h = h_1] \quad (32)$$

4.2.2. Recuperador (transformação 2 – 3)

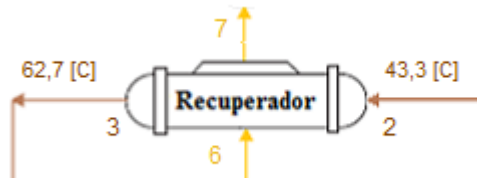


Figura 27: Esquematização da transformação 2 – 3.

→ Natureza de transformação 2 - 3:

No percurso de 2 para 3, o fluido n-pentano passa pelo recuperador. Nesta transformação o n-pentano que executa a transformação 2 – 3 representa o fluido frio da interação de fluidos no permutador. Ao receber calor do fluido quente que executa a transformação 6 – 7, ocorre um aumento da temperatura, entalpia e entropia. Contudo o fluido permanece em estado sub-arrefecido.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 3:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_3 = 13.6 [\text{bar}] = 1360 \text{ kPa}$$

$$T_3 = 62.7 [^\circ\text{C}]$$

→ Equações de modelação utilizadas:

$$h_3 = h [n - \text{Pentano}'; P = P_3; T = T_3] \quad (33)$$

$$s_3 = s [n - \text{Pentano}'; P = P_3; T = T_3] \quad (34)$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{recuperador, \text{ fluido frio}} = \dot{m}_{n-pentano} * (h_3 - h_2) \quad (35)$$

4.2.3. Pré – Aquecedor (transformação 3- 4)

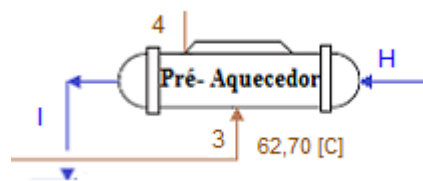


Figura 28: Esquemática da transformação 3 – 4.

→ Natureza de transformação 3 - 4:

Na passagem de 3 para 4, o fluido de trabalho é aquecido por troca de calor com o fluido geotérmico. Todavia, o fluido permanece em estado sub-arrefecido.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 4:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_4 = 13.6 [\text{bar}] = 1360 \text{ kPa}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

Ao efetuar um balanço de energia ao pré-aquecedor obtém-se a entalpia no ponto 4.

$$h_4 = h_3 - \left(\frac{\dot{m}_H * (h_I - h_H)}{\dot{m}_{n-pentano}} \right) \quad (36)$$

$$T_4 = T [n - Pentano'; P = P_4; h = h_4] \quad (37)$$

$$s_4 = s [n - Pentano'; P = P_4; h = h_4] \quad (38)$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{pré-aquecedor, \text{ fluido frio}} = \dot{m}_{n-pentano} * (h_4 - h_3) \quad (39)$$

4.2.4. Vaporizador (transformação 4-5)

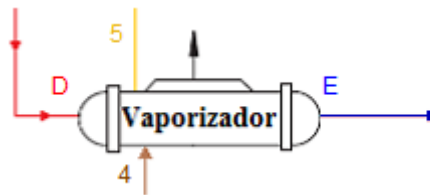


Figura 29: Esquematização da transformação 4 – 5.

→ Natureza de transformação 4 - 5:

Ao longo da transformação de 4 para 5, o fluido de trabalho recebe calor no vaporizador, passando do estado líquido sub-arrefecido para vapor sobre-aquecido. No caso de futuras simulações, com a diminuição da troca de calor neste permutador, o fluido de trabalho pode não alcançar o estado sobre-aquecido e passar do estado líquido sub-arrefecido para o estado de mistura bifásica.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 5:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_5 = 13.6 [\text{bar}] = 1360 \text{ kPa}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

Ao efetuar um balanço de energia no vaporizador, calcula-se a entalpia para o ponto 5.

$$0 = (\dot{m}_{GNC,D}) * (h_{GNCentra} - h_{GNCsai,escape}) + \dot{m}_{n-pentano} * (h_4 - h_5) + (\dot{m}_D) * h_D - \dot{m}_{vapor,escape} * h_{vapor,escape} - \dot{m}_E * h_E \quad (40)$$

$$T_5 = T ['n - Pentano'; P = P_5; h = h_5] \quad (41)$$

$$s_5 = s ['n - Pentano'; P = P_5; h = h_5] \quad (42)$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{vaporizador, \text{ fluido frio}} = \dot{m}_{n-pentano} * (h_5 - h_4) \quad (43)$$

4.2.5. Alternador-Turbina (transformação 5 – 6)

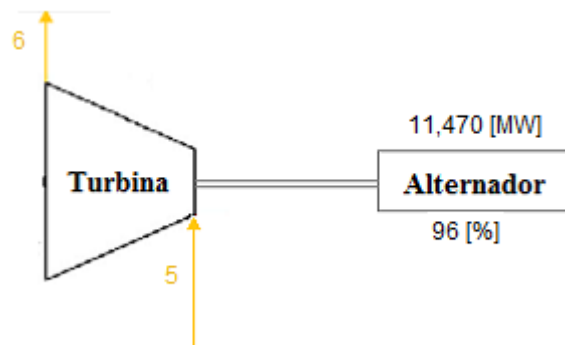


Figura 30: Esquematização da transformação 5 – 6.

→ Natureza de transformação 5 - 6:

Na transformação 5 - 6, o fluido de trabalho passa do estado de vapor sobre-aquecido (ou mistura bifásica) para o estado de vapor sobre-aquecido, embora a uma entalpia mais reduzida, devido à queda de pressão provocada pela passagem do fluido pela turbina.

Durante a expansão adiabática na turbina o fluido de trabalho cede parte da sua energia sob forma de trabalho que é transformada em potência mecânica disponível no eixo da turbina.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 6:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_6 = 1.4 [\text{bar}] = 140 \text{ kPa}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

Para calcular o estado do fluido no ponto 6, é necessário saber a potência da turbina. Contudo, embora o seu valor não seja fornecido, ele pode ser calculado a partir da potência do alternador e da sua eficiência.

$$\dot{W}_{\text{alternador}} = 11.470 \text{ [MW]}$$

$$\eta_{\text{alternador}} = 96\%$$

$$\dot{W}_{\text{alternador}} = \dot{W}_{\text{turbinas}} * \eta_{\text{alternador}} \quad (44)$$

Pela equação 44 retira-se a potência da turbina. Todavia, o valor desta potência corresponde ao valor total das duas turbinas, pelo que é necessário dividir este valor por dois, de modo a ter o valor individual de cada turbina.

$$\dot{W}_{\text{turbina individual}} = \dot{W}_{\text{turbinas}}/2 \quad (45)$$

Depois de calcular a potência na turbina, segue-se o cálculo da entalpia para o ponto 6, h_6 , pela seguinte equação:

$$\dot{W}_{\text{turbina individual}} = \dot{m}_{n\text{-pentano}} (h_5 - h_6) \quad (46)$$

Desta forma, tendo a entalpia e sabendo a pressão neste ponto, $P_6 = P_1$, pelas seguintes expressões calcula-se a respetiva temperatura e entropia.

$$T_6 = T[n - \text{Pentano}'; h = h_6; P = P_6] \quad (47)$$

$$s_6 = s[n - \text{Pentano}'; h = h_6; P = P_6] \quad (48)$$

4.2.6. Recuperador (transformação 6 – 7)

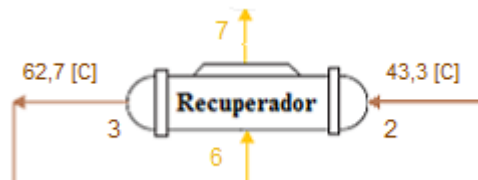


Figura 31: Esquematização da transformação 6 – 7.

→ Natureza de transformação 6 - 7;

No percurso de 6 para 7 o fluido de trabalho perde pressão e a sua entalpia diminui e cede parte do seu calor sensível no recuperador. No entanto o fluido mantém-se em 7 no estado de vapor sobre-aquecido.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 7:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$P_7 = 1.4 [\text{bar}] = 140 \text{ kPa}$$

→ Equações de modelação utilizadas:

Ao efetuar um balanço de energia ao recuperador obtém-se a entalpia no ponto 7.

$$h_7 = h_2 + h_6 - h_3 \quad (49)$$

$$T_7 = T[n - Pentano'; h = h_7; P = P_7] \quad (50)$$

$$s_7 = s[n - Pentano'; h = h_7; P = P_7] \quad (51)$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{recuperador, \text{ fluido quente}} = \dot{m}_{n-pentano} * (h_6 - h_7) \quad (52)$$

4.2.7. Aerocondensador (transformação 7 – 1)

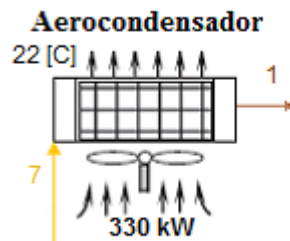


Figura 32: Esquematização da transformação 7 – 1.

→ Natureza de transformação 7 - 1;

Na transformação 7 - 1, o fluido de trabalho passa do estado de vapor sobre-aquecido para o estado de líquido sub-arrefecido, devido à troca de calor deste com o ambiente, provocando a sua condensação.

→ Dados fornecidos do fluido de trabalho no ponto 7:

$$\dot{m}_{n-pentano} = 310.5[\text{ton/hr}] \approx 78.24[\text{kg/s}]$$

$$T_{ambiente} = 22 [^{\circ}\text{C}]$$

→ Dados fornecidos de transferência:

$$\dot{W}_{aerocondensador} = 300 \text{ kW}$$

→ Cálculo da potência calorífica:

$$\dot{Q}_{aerocondensador} = \dot{m}_{n-pentano} * (h_7 - h_1) \quad (53)$$

5. Resultados e validação

5.1. Dados gerais

De seguida, são sumariados nas tabelas 3, 4 e na figura 33 a caracterização obtida em condições de funcionamento nominal para os estados do fluido primário e do fluido de trabalho, relativamente à pressão, temperatura, entalpia, entropia e ao estado em que o fluido se encontra.

Tabela 3: Propriedades do fluido primário nos pontos que influenciam a análise do sistema.

	P_i [kPa]	T_i [C]	h_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg-K]	x_i	Estado do Fluido
A	500	151,87	1020,00	2,76	0,18	Mistura Bifásica
B	500	151,87	2748,62	6,82	1	Vapor Saturado
C	640	161,30	681,30	1,96	-	Líquido Sub-Arrefecido
D	500	151,87	2748,62	6,82	1	Vapor Saturado
E	500	141,10	594,05	1,75	-	Líquido Sub-Arrefecido
F	590	141,11	594,15	1,75	-	Líquido Sub-Arrefecido
G	590	158,21	681,30	1,96	0,006435	Mistura Bifásica
H	590	157,81	666,13	1,92	-	Líquido Sub-Arrefecido
I	590	87,00	364,73	1,16	-	Líquido Sub-Arrefecido
J	590	87,00	364,73	1,16	-	Líquido Sub-Arrefecido

Tabela 4: Propriedades do fluido de trabalho nos pontos analisados.

	P_i [kPa]	T_i [C]	h_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg-K]	x_i	Estado do Fluido
1	140	42,09	38,22	0,13	-	Líquido Sub-Arrefecido
2	1360	43,30	42,05	0,13	-	Líquido Sub-Arrefecido
3	1360	62,70	89,53	0,28	-	Líquido Sub-Arrefecido
4	1360	136,79	293,28	0,82	-	Líquido Sub-Arrefecido
5	1360	141,55	546,73	1,44	-	Vapor Sobre-Aquecido
6	140	84,73	470,38	1,47	-	Vapor Sobre-Aquecido
7	140	59,96	422,90	1,33	-	Vapor Sobre-Aquecido

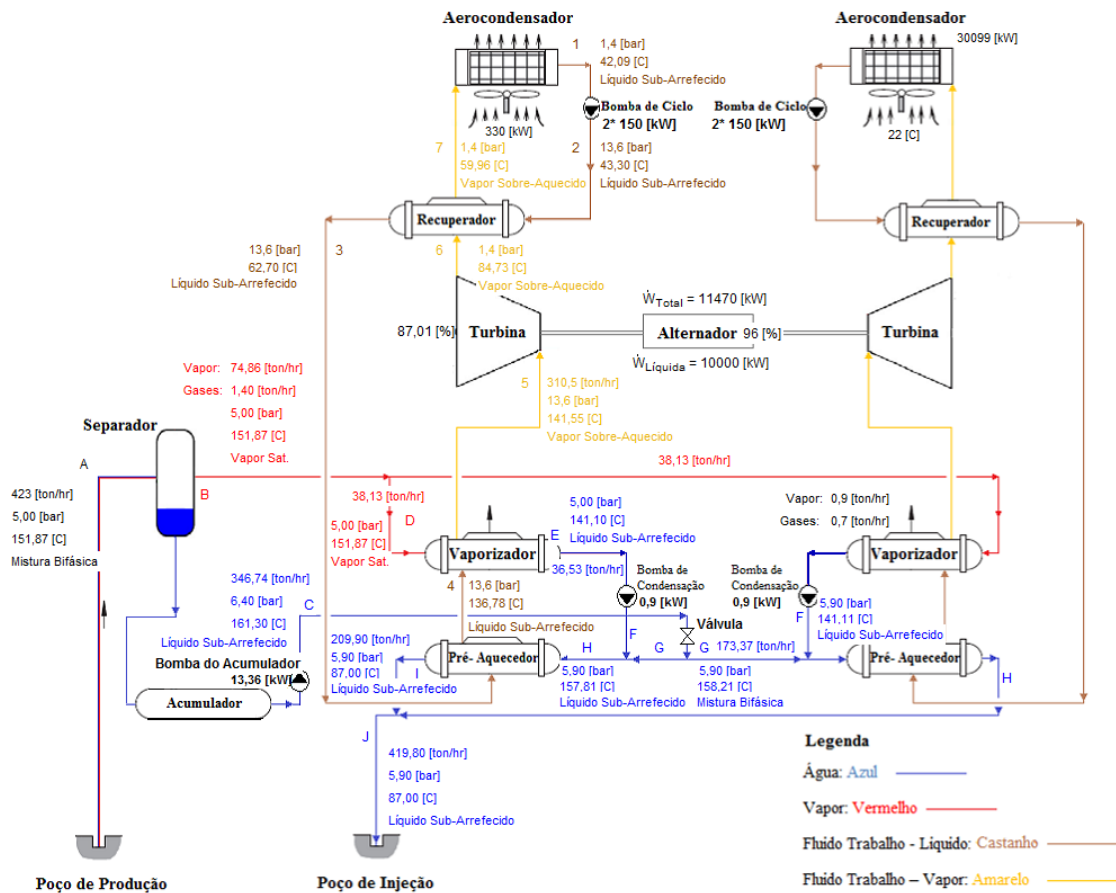


Figura 33: Representação do ciclo térmico da Central Geotérmica do Pico Vermelho com todos os valores necessários para a caracterização do sistema em estado estacionário e nominal.

Na tabela seguinte, apresenta-se a nível quantitativo as interações mecânicas e térmicas que o fluido de trabalho efetua ao longo do sistema. Distinguiu-se com sinal negativo (-) e positivo (+) as potências mecânicas e caloríficas fornecidas e recebidas pelo fluido de trabalho.

Tabela 5: Interações mecânicas e térmicas do fluido de trabalho.

	\dot{W} [kW]	\dot{Q} [kW]
1 - 2	(+) 600	-
2 - 3	-	(+) 7430
3 - 4	-	(+) 31884
4 - 5	-	(+) 39662
5 - 6	(-) 11948	-
6 - 7	-	(-) 7430
7 - 1	(+) 660	(-) 60198

Para uma análise pormenorizada, é necessário recorrer ao diagrama T-s do ciclo, pois só através da localização dos pontos no diagrama, se consegue perceber o estado do fluido de trabalho em cada ponto.

Assim, na figura 34, observa-se que o sistema do fluido de trabalho, n-pentano, opera sobre a tecnologia *Ciclo de Rankine*, que consiste num ciclo termodinâmico que converte calor em trabalho.

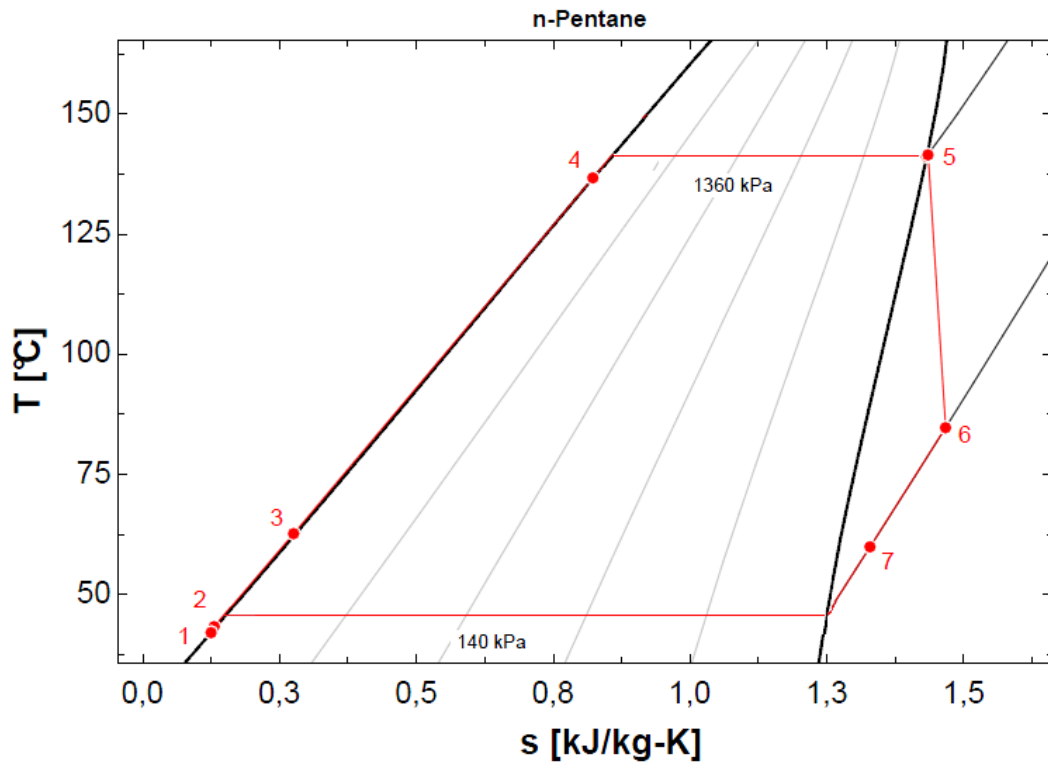


Figura 34: Diagrama T-s: n-pentano.

Para uma análise detalhada, ampliou-se a localização dos pontos 1 e 2 na figura 35. Deste modo verifica-se que entre estes pontos, o fluido foi pressurizado, devido à sua passagem pelas bombas de ciclo, provocando um aumento na temperatura, entalpia e entropia. O fluido permanece no estado de líquido sub-arrefecido.

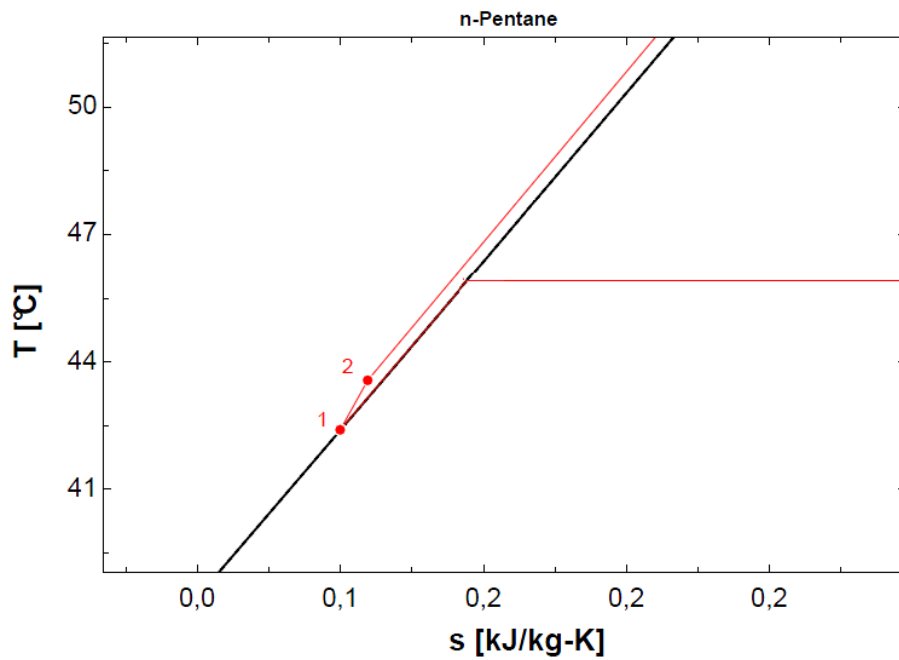


Figura 35: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado da zona dos pontos 1 e 2.

Em 3, devido à passagem do fluido pelo recuperador, ocorre novo aumento da temperatura, entalpia e entropia, mantendo-se o fluido no estado de líquido sub-arrefecido.

No ponto 4, o fluido viu aumentadas a sua temperatura e entalpia, pois o fluido recebeu calor do fluido primário no pré-aquecedor. Pela figura 36, observa-se que o fluido permaneceu em estado líquido sub-arrefecido.

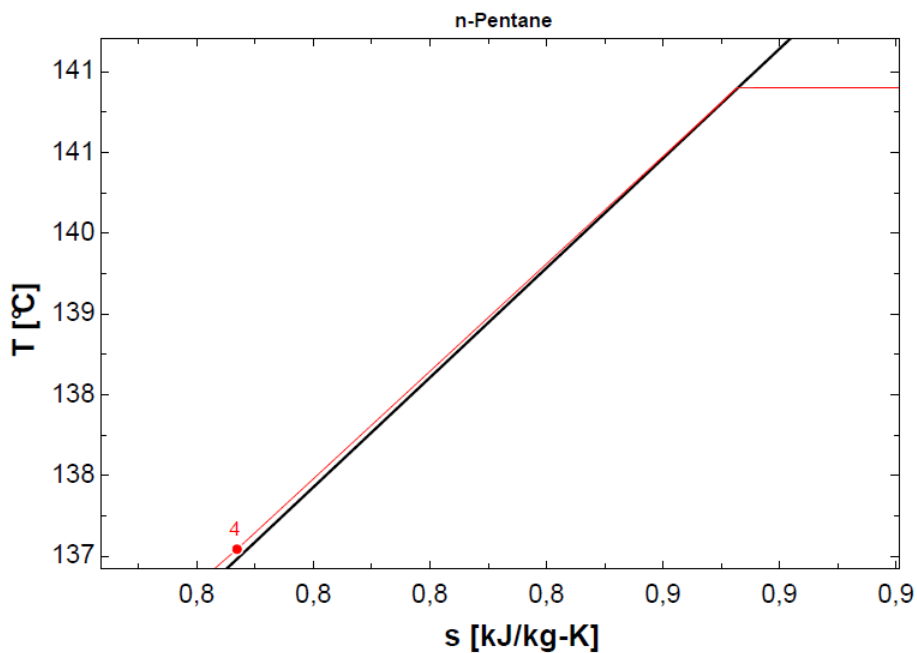


Figura 36: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado do ponto 4.

De 4 para 5, ocorreu uma mudança de fase isobárica, passando o fluido de trabalho da fase de líquido sub-arrefecido para a fase vapor sobre-aquecido, graças ao calor recebido do geofluido no vaporizador.

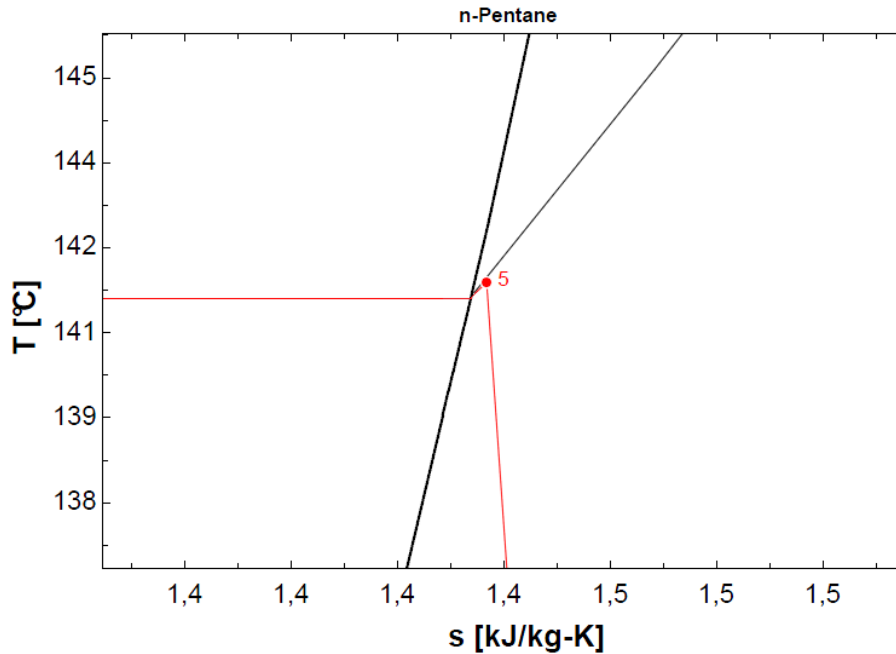


Figura 37: Diagrama T-s: n-pentano, ampliado do ponto 5.

A queda de pressão entre os pontos 5 e 6 decorre da cedência de energia sob a forma de trabalho na turbina, embora o fluido continue na fase de vapor sobre-aquecido em condições nominais.

Entre 6 e 7, pressão constante, a temperatura do fluido diminui devido à sua passagem pelo recuperador, cedendo energia ao fluido n-pentano mas permanecendo no estado de vapor sobreaquecido.

No ponto 7, a montante do aerocondensador, o fluido encontra-se em estado de vapor sobre-aquecido e, ao deslocar-se para o ponto 1, é condensado até ao estado de líquido sub-arrefecido, por ação do aerocondensador, o qual troca calor com o ambiente.

5.2. Eficiência isentrópica da turbina

Como já foi referido, a eficiência isentrópica da turbina é diferente de um, pois caso contrário a entropia em 5 e 6 seria a mesma.

Pela equação 54, a potência específica desenvolvida por unidade de caudal mássico, no caso de estudo é menor do que seria cedida se a expansão decorresse isentropicamente.

$$\eta_{turbina} = \frac{(\dot{W}_{turbinas}/\dot{m}_{n-pentano})}{(\dot{W}_{turbinas}/\dot{m}_{n-pentano})_s} \quad (54)$$

Desenvolvendo a equação anterior obtém-se o valor da eficiência, através da variação da entalpias do n-pentano a jusante e a montante da turbina.

$$\eta_{turnina} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6_s}} \quad (55)$$

$$\eta_{turnina} = 87.01\%$$

Onde:

$$s_{6_s} = s_5$$

$$h_{6_s} = h['n - Pentano'; s = s_{6_s}; P = P_6] \quad (56)$$

5.3. Rendimento termodinâmico

Em termodinâmica, o rendimento termodinâmico é uma medida adimensional que mede o desempenho de um dispositivo que converte calor em trabalho.

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{entra}}, 0 \leq \eta \leq 1 \quad (57)$$

Pela expressão anterior, verifica-se que se o calor que entra num sistema for transformado totalmente em trabalho, o ciclo tem um rendimento unitário. Contudo pela 2ª Lei da Termodinâmica percebe-se que tal não é possível. Assim quando ocorre este tipo de transformação existe sempre uma perda de calor para o ambiente.

Para o caso do estudo, a potência líquida no ciclo é igual à potência obtida nas turbinas à qual é subtraída a potência das bombas de ciclo e a potência do aerocondensador. A potência calorífica fornecida ao ciclo provem do vaporizador e do pré-aquecedor, de modo a que a eficiência do ciclo em condições nominais ronda os 14.94%.

$$\eta_{Ciclo} = \frac{\dot{W}_{turbina} - 4 * \dot{W}_{bombas\ de\ ciclo} - 2 * \dot{W}_{aerocondensador}}{2 * (\dot{Q}_{pré-aquecedor} + \dot{Q}_{vaporizador})} * 100\% = 14.94\% \quad (58)$$

Uma outra análise consiste em considerar o ciclo na globalidade envolvendo a cedência de calor pelo fluido geotérmico. Neste caso, haverá que ter em conta a potência das bombas de condensação, da bomba do acumulador, da potência mecânica e calorífica do aerocondensador e da potência térmica de entrada e de saída do sistema.

$$\eta_{Global} = \left(\frac{\dot{W}_{turbina} - 4 * \dot{W}_{bombas\ de\ ciclo} - 2 * \dot{W}_{condensação} - \dot{W}_{acumulador} - 2 * \dot{W}_{aerocondensador}}{(\dot{m}_A - \dot{m}_{NCG}) * h_A - 2 * \dot{m}_{vapor,escape} * h_{vapor,escape} - \dot{m}_j * h_j - 2 * \dot{Q}_{aerocondensador}} \right) \quad (59)$$

* 100%

Neste caso verifica-se que o rendimento global de ciclo é de 4.95%.

6. Discussão

A partir do modelo elaborado, partiu-se para a análise de sensibilidade, que consiste em modificar valores de algumas variáveis e perceber as consequências destas modificações no funcionamento da central.

6.1. Variação de percentual de GNC

A modelação que se segue diz respeito à fração de gases não condensáveis presentes na extração do fluido geotérmico, pois a presença destes gases influenciará a potência gerada pela central, na medida em que as propriedades do fluido serão alteradas, devido a uma maior ou menor quantidade de caudal disponível para a transferência de calor. Esses gases são libertados para o exterior, através de um sistema presente nos vaporizadores, uma vez que estão misturados com o vapor saturado do geofluido.

Assim variou-se a quantidade de gases não condensáveis em um ponto percentual, de forma a perceber a sua influência.

Para isso, calculou-se a percentagem dos mesmos na saída do separador, relativamente ao caudal total do fluido geotérmico presente nesta secção.

Desta forma, calculou-se uma existência de 1.84% de gases não condensáveis, relativamente a todo o caudal de vapor proveniente do separador e estimou-se uma perda de caudal de vapor para a atmosfera de mais 0.4 ton/hr, relativamente ao caudal total daqueles gases.

Na tabela 6, apresenta-se os caudais de vapor e de gases não condensáveis à saída do separador, de acordo com a fração destes mesmos gases.

Relativamente à modelação, utilizaram-se as expressões anteriores com as variáveis adequadas, mantendo-se a temperatura a jusante do vaporizador. Assim, a potência calorífica variou de acordo com a percentagem de gases não condensáveis presentes do caudal do geofluido.

Tabela 6: Percentagem de gases não condensáveis presentes no geofluido e os respectivos caudais presentes no compartimento de vapor.

\dot{m} Percentagem, GNC [%]	\dot{m} Vapor [ton/hr]	\dot{m} GNC [ton/hr]
0,84	75,62	0,64
1,04	75,47	0,79
1,24	75,32	0,94
1,44	75,16	1,10
1,64	75,01	1,25
1,84	74,86	1,40
2,04	74,71	1,55
2,24	74,56	1,70
2,44	74,40	1,86
2,64	74,25	2,01
2,84	74,10	2,16

6.1.1. Variação da potência do alternador de acordo com a fração GNC

Pelo gráfico 2, pode constatar-se a relação entre a percentagem de gases não condensáveis no caudal do geofluido e a potência final do alternador. Com uma variação de um ponto percentual da quantidade referenciada, verifica-se que quanto menor for a presença de gases no geofluido, maior é a potência final do alternador e quanto maior for a percentagem de gases, menor é a potência gerada. Ou seja, como a potência está interligada com o caudal de gases não condensáveis, para um caudal constante do fluido geotérmico, uma menor quantidade de gases não condensáveis conduz a uma maior potência calorífica no permutador. Assim, para o fluido de trabalho, aumenta a entalpia a montante da turbina, originando desta forma uma maior potência.

Com uma variação de 0.2% da presença de gases não condensáveis no fluido geotérmico, verifica-se que tanto para a potência total, como para a potência líquida, existe uma variação média de 23.2 kW.

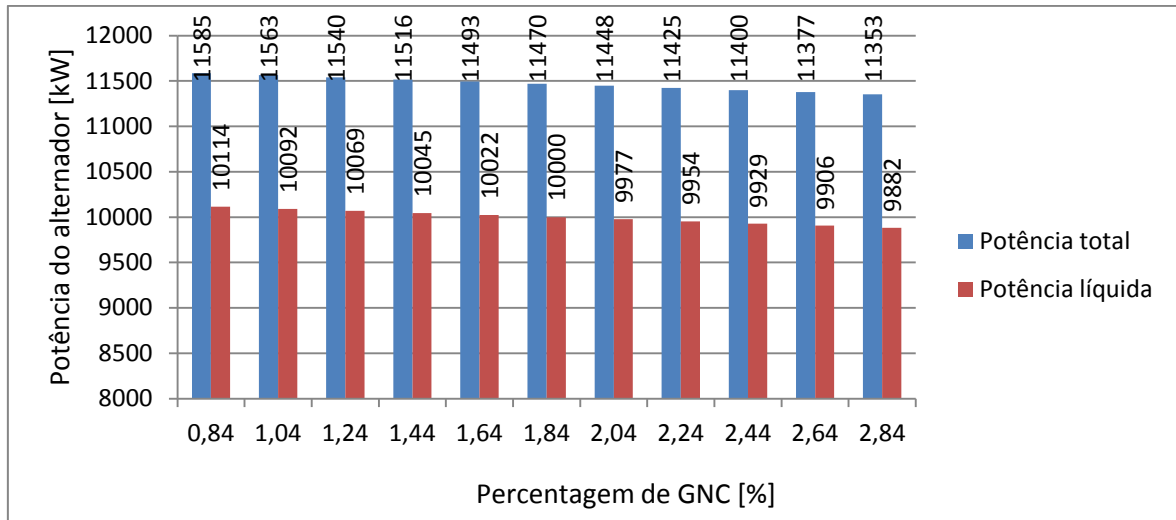


Gráfico 2: Relação da percentagem de caudal de gases não condensáveis (GNC) com a potência do alternador.

6.2. Percentagem de brine no circuito de vapor

Nesta seção é efetuada uma simulação das consequências da variação da percentagem de brine (geofluido em estado líquido) no circuito de vapor a jusante do separador. O geofluido é captado em mistura bifásica e é separado no separador em líquido e em vapor, de forma a possibilitar uma melhor transferência de calor do fluido primário para o fluido de trabalho. Este separador consiste, como já foi referido, num vaso vertical que tem a funcionalidade de separar uma mistura líquido-vapor, em que a gravidade faz com que o líquido se deposite no fundo do vaso e o vapor, com uma velocidade minimizada, ascenda à superfície. O vapor atravessa uma faixa drenante que impede a sua mistura com pequenas gotas, dando aos fluidos redirecionados condições de estado saturado. O separador pode, ao longo do tempo, perder a eficiência e, deste modo, possibilitar que ocorra mistura de gotas com o vapor.

Assim sendo, e para uma melhor compreensão das consequências, foi efetuada uma simulação, em que no circuito de vapor saturado existe uma pequena percentagem de água, cinco pontos percentuais (5%), de modo a tornar o fluido de vapor saturado numa mistura bifásica. A dependência da potência obtida em função do título da mistura bifásica no ponto B (após o separador) encontra-se ilustrada no gráfico 3.

→ Equações de modelação utilizadas para calcular as novas temperaturas e entalpias para o ponto B, de acordo com o título da mistura bifásica;

$$T_B = T[\text{'Vapor'}; P = P_A; x = x_i] \quad (60)$$

$$h_B = h[\text{'Vapor'}; P = P_A; x = x_i] \quad (61)$$

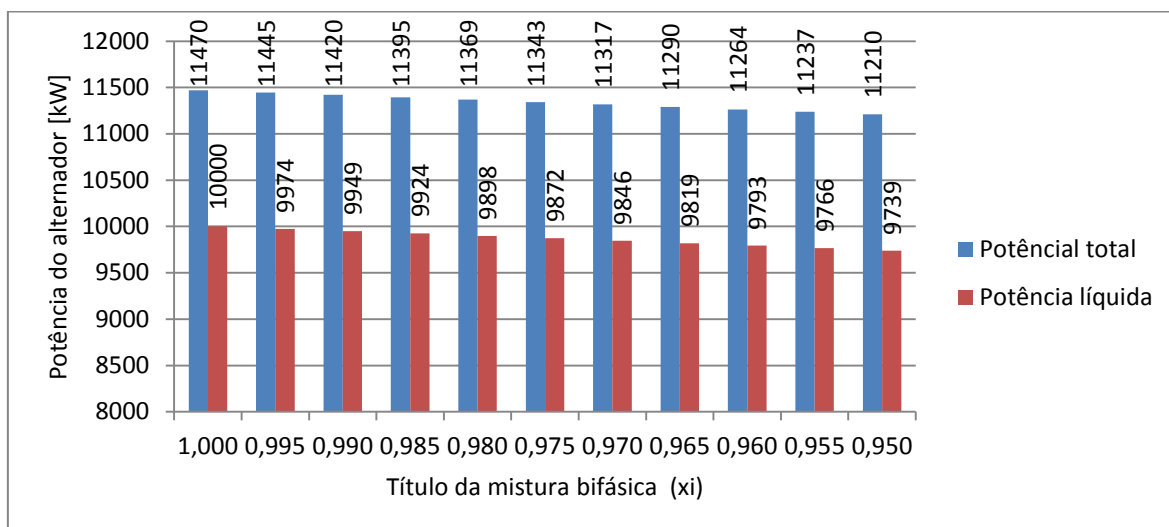


Gráfico 3: Relação da percentagem de brine no circuito de vapor com a potência do alternador.

Ao analisar o gráfico 3, verifica-se que quanto maior é a percentagem de brine no circuito de vapor, menor é a potência gerada no alternador, pois a entalpia a jusante dos vaporizadores diminui com o aumento da percentagem de brine.

A redução da potência é constante e contínua, pois para um aumento de 0.5% de brine no circuito de vapor, ocorre uma diminuição média de 26.1 kW de potência gerada no alternador.

6.3. Diminuição de caudal de fluido geotérmico

Um dos problemas encontrados na exploração inicial da central geotérmica nos Açores, concretamente na Central Geotérmica do Pico Vermelho, desde a exploração do primeiro poço, diz respeito ao aparecimento de depósito de precipitados de calcite nas paredes das tubagens. Estes precipitados são provenientes do fluido geotérmico, sendo necessário proceder a uma operação de limpeza mensal do sistema, que consiste na adição de um inibidor de formação de calcite.

Por outro lado, uma possível diminuição do caudal geotérmico está relacionada com a contínua exploração e injeção do fluido, podendo desde logo ocorrer uma quebra de caudal, devido a uma inadequada exploração, relacionada com o facto de se retirar caudal em excesso apenas de um só poço e de não se equilibrar a exploração levando em conta as características de cada poço. Deste modo, a abertura de mais poços tem que ser analisada, por forma a equilibrar os recursos em cada zona de extração e não incidir a exploração unicamente numa única zona de extração.

Assim, efetuou-se uma modelação do sistema da Central do Pico Vermelho com a diminuição de caudal utilizado, de forma a perceber a consequência de uma perda de caudal na geração de potência elétrica.

Desta forma mantiveram-se constantes todas as variáveis, modificando-se somente a quantidade de caudal geotérmico, mas mantendo a percentagem de cada constituinte do geofluido.

Na tabela 7, regista-se o valor do caudal dos respetivos constituintes do geofluido, de acordo com a perda de percentagem de caudal.

Tabela 7: Caudais dos fluidos do ciclo primário em função da redução do fluido geotérmico extraído.

Redução de caudal [%]	$\dot{m}_{\text{Geofluido}}$ [ton/hr]	\dot{m}_{Brine} [ton/hr]	\dot{m}_{Vapor} [ton/hr]	\dot{m}_{GNC} [ton/hr]
0	423,00	346,74	74,86	1,40
0,5	420,89	345,01	74,49	1,39
1	418,77	343,27	74,11	1,39
1,5	416,66	341,54	73,74	1,38
2	414,54	339,81	73,36	1,37
2,5	412,43	338,07	72,99	1,36
3	410,31	336,34	72,61	1,36
3,5	408,20	334,60	72,24	1,35
4	406,08	332,87	71,87	1,34

Relativamente à modelação, com a diminuição do caudal geotérmico e mantendo as características no ponto C, a bomba do acumulador requer uma menor potência, pois todas as outras variáveis se mantêm constantes. O raciocínio é semelhante para as bombas de condensação.

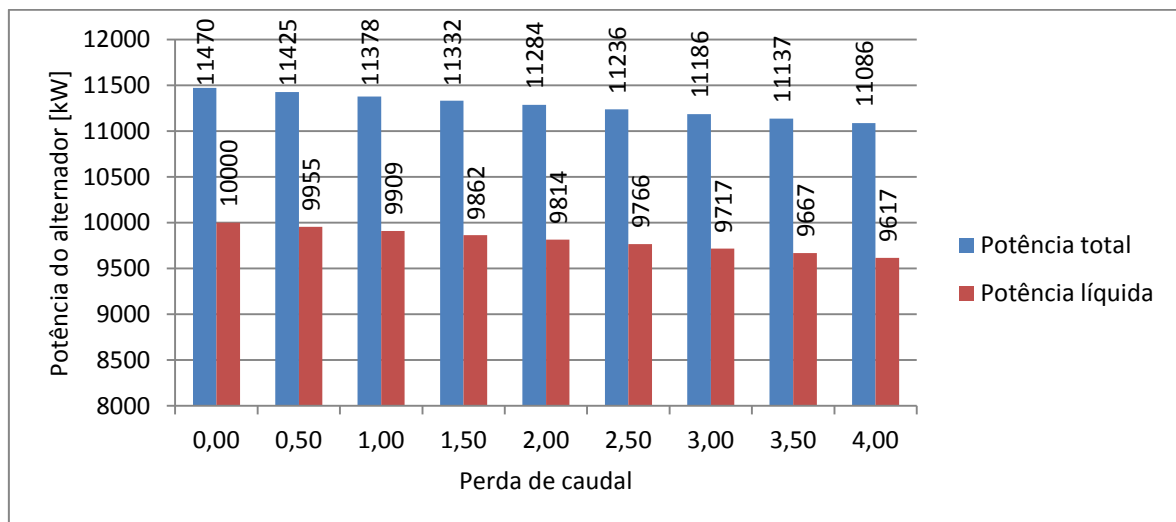


Gráfico 4: Relação da diminuição de caudal geotérmico com a potência do alternador.

Assim ao fazer a análise, verifica-se pelo gráfico 4 que, com a diminuição de caudal fornecido ao sistema da central, a potência gerada no alternador diminui, pelo que se conclui que a regulação da abertura de cada poço e a redistribuição do caudal extraído pelos poços é de enorme

importância, de forma a não haver queda de caudal, bem como a própria manutenção e limpeza das tubagens, devido à formação de calcite.

Relativamente às perdas das potências, a potência total tem uma perda média de 48 kW por cada variação de 0.5% de caudal, enquanto que para a mesma variação a potência líquida tem uma perda média de 47.8 kW. Como existe menor caudal geotérmico, as bombas de condensação e a bomba do acumulador necessitam de menor potência, diminuindo assim o consumo interno da central, o que se encontra refletido na menor perda de potência líquida.

→ Equações de modelação utilizada para calcular a potência das bombas:

$$\frac{W_{Bomba}}{\dot{m}} = v * (P_{sai} - P_{entra}) \quad (62)$$

6.4. Perda percentual da potência calorífica dos permutadores

Uma diminuição da potência calorífica nos permutadores pode ocorrer devido à existência de um filme de condensação de fluido primário nas paredes das tubagens do permutador. A existência deste filme faz com que a condensação ocorra de forma diferente, uma vez que ela se realiza em contacto com o filme líquido com temperaturas superiores. Adicionalmente, uma redução da potência calorífica também ocorre devido à formação de depósitos de outras substâncias presentes no geofluido que precipitam nestes pontos. Embora havendo um filtro para captar estas substâncias, este pode não ser suficiente, se não existir uma cuidada na limpeza do mesmo.

Assim sendo, efetuou-se uma modelação que resulta na perda da potência calorífica, entre o fluido geotérmico e o fluido de trabalho.

Tanto para o vaporizador, como para o pré-aquecedor, e para ambos em simultâneo, efetuaram-se simulações com uma redução de 10% da potência calorífica, o que corresponde a uma acumulação de depósitos, visando assim a perceção da influência que a existência de depósitos exerce sobre a potência elétrica final gerada pela central. Desta forma, a modelação foi feita tendo em vista a determinação da influência de cada permutador no desempenho do sistema.

Por análise do gráfico 5, verifica-se que a redução da potência calorífica nos permutadores diminui a potência total gerada no alternador em todos os casos de estudo. Todavia, percebe-se que a diminuição do desempenho do vaporizador origina uma maior perda do que se essa variação ocorrer no pré-aquecedor, visto aquele possuir uma maior potência calorífica: quanto maior é a redução da potência calorífica, maior é a diferença entre ambos os permutadores.

Em termos de redução da potência calorífica em simultâneo em ambos os permutadores, a potência gerada pela central decresce mais acentuadamente, pois existe menor troca de calor entre o fluido primário e o fluido de trabalho.

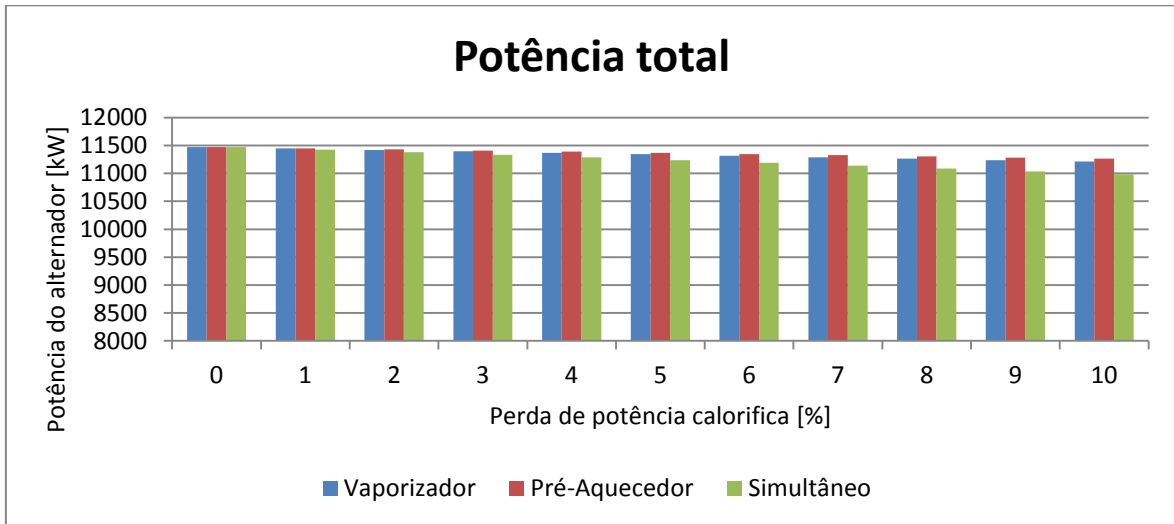


Gráfico 5: Relação da perda da potência calorífica com a potência do alternador (análise: potência total).

Para a potência líquida, a análise é semelhante, e a redução de potência útil com a diminuição da potência calorífica tem a mesma variação que a potência total.

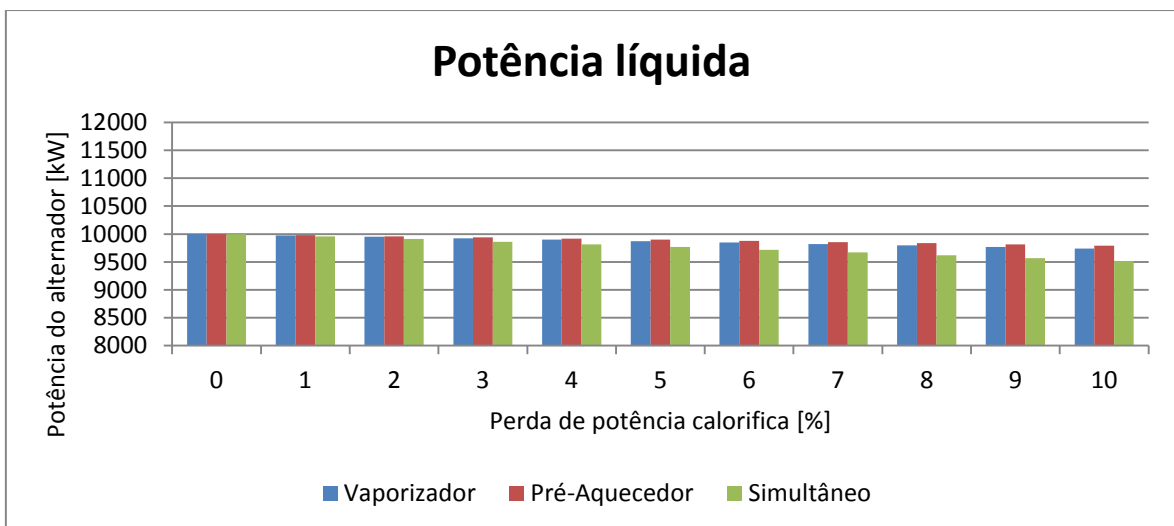


Gráfico 6: Relação da perda da potência calorífica com a potência do alternador (análise: potência líquida).

6.5. Queda de pressão do geofluido

Ao longo da exploração geotérmica, existe um declínio na produção, devido ao decréscimo do débito dos poços, dada a diminuição, em parte, da pressão presente no recurso geotérmico.

Para se analisar o caso da influência da queda de pressão do fluido geotérmico ao longo da exploração, resultante da própria exploração e do ciclo contínuo de injeção do fluido, modelou-se o funcionamento do sistema alterando-se a pressão à cabeça do poço, concretamente no ponto A. Esta queda de pressão corresponde também a uma diminuição do conteúdo entálpico do fluido uma vez que este se encontra saturado à respetiva pressão de extração.

Com a diminuição de pressão do geofluido, a pressão de vapor geotérmico a jusante do separador manteve-se igual ao valor da pressão à cabeça do poço, pois neste equipamento só ocorre separação do fluido líquido-vapor.

A pressão do líquido geotérmico, brine, a jusante do separador, mantém também um valor igual à pressão à cabeça do poço, contudo o fluido, ao ser injetado na central, é auxiliado por uma bomba do acumulador, que aumenta a pressão para 6.4 bar. Desta forma, a bomba do acumulador requer uma potência maior com a diminuição da pressão a montante, verificando-se assim um maior consumo interno na central, refletindo-se numa maior diminuição da potência líquida gerada.

Pelo gráfico 7, verifica-se que ao diminuir a pressão de saturação em 10% regista-se uma perda média de 1.1 kW na potência total, enquanto que para a potência líquida se assiste a uma perda média de 1.7 kW, devido ao aumento da potência das bombas de condensação e da bomba do acumulador.

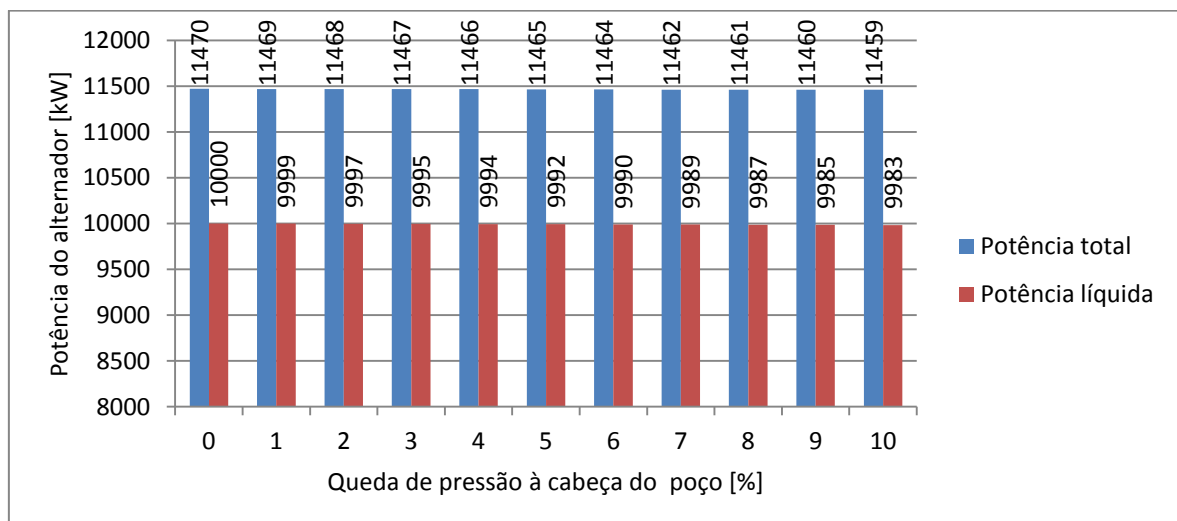


Gráfico 7: Relação queda de pressão à cabeça do poço com a potência do alternador.

6.6. Variação da eficiência isentrópica da turbina

Para efeitos de percepção da influência da eficiência isentrópica da turbina na geração de energia elétrica, modelou-se o circuito térmico com condições e valores fornecidos, modificando-se unicamente a eficiência da turbina, de forma a perceber o seu impacto na potência disponível no alternador.

A modelação foi feita para uma variação da eficiência da turbina de dois pontos percentuais (2%) partindo da eficiência calculada de 87.01%. Assim, com esta variação, podemos perceber a sua influência direta na potência gerada no alternador.

Pelo gráfico 8, verifica-se que com a diminuição da eficiência da turbina, a potência no alternador diminui com a mesma variação, tanto para a potência total como para a potência líquida.

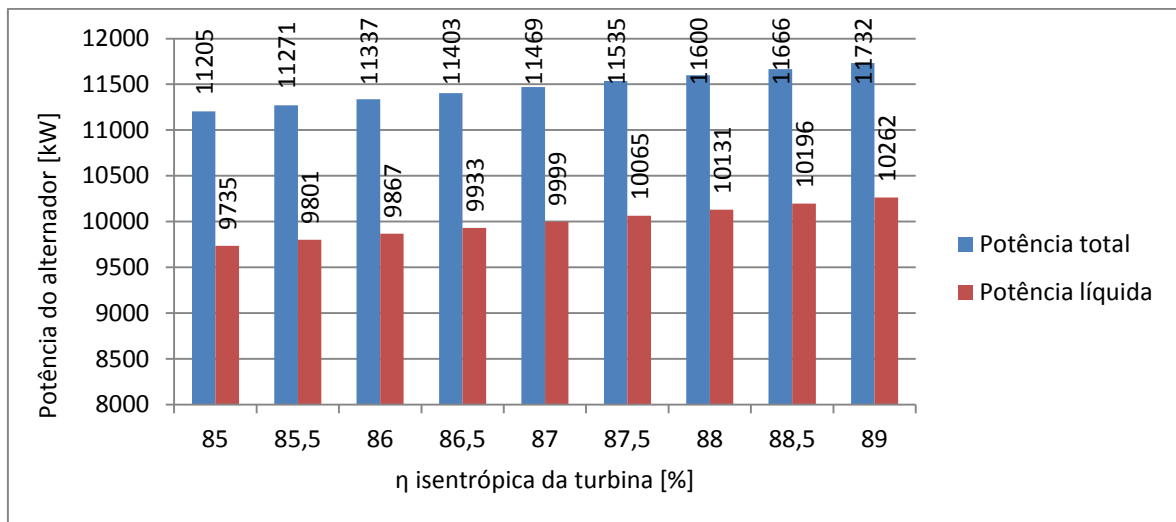


Gráfico 8: Relação eficiência isentrópica da turbina com a potência do alternador.

6.7. Aspetos gerais e comparações

Para averiguar melhor a influência de cada caso de estudo na geração de potência no alternador, comparou-se, em todos os níveis, a potência líquida para um decréscimo de 1% de cada um dos parâmetros analisados.

No gráfico 9 estão representados os valores das modelações para a potência líquida, de forma a poder-se comparar e perceber a influência de cada um dos fatores analisados anteriormente na potência gerada pela central.

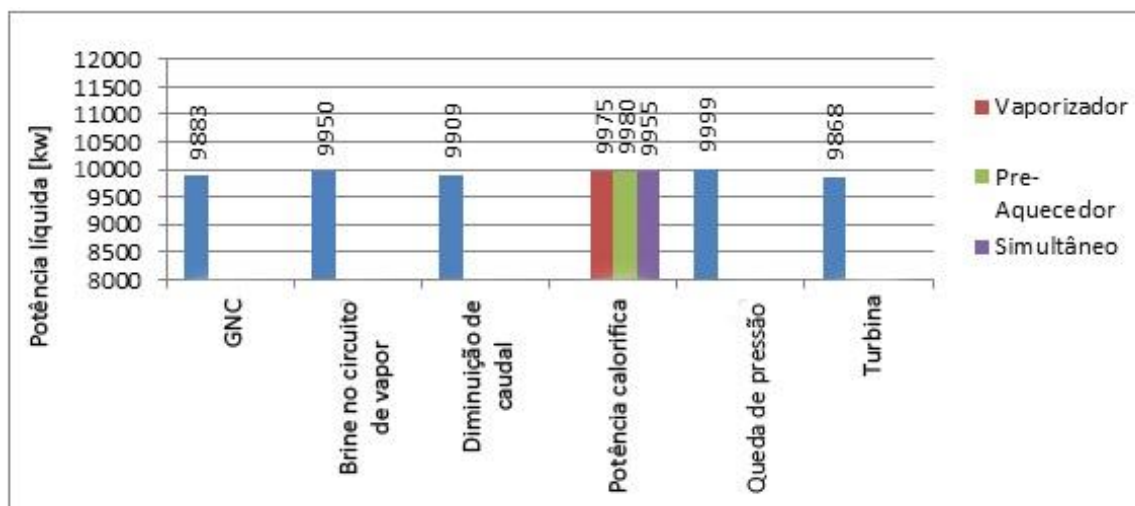


Gráfico 9: Potência líquida consoante o caso de estudo.

Assim e desde logo, verifica-se que a perda de pressão do fluido geotérmico é o fator que provoca a menor perda de potência gerada pela central, com uma diminuição de 1 kW, seguida da diminuição percentual da potência calorífica, com o pré-aquecedor com uma diminuição de 20 kW, o vaporizador de 25 kW e em simultâneo, nos dois permutadores, com 45 kW. Em contínua ascensão em termo de influência na redução de potência líquida, uma redução de 1% origina uma perda de potência de 50 kW para brine no circuito de vapor, 91 kW para a diminuição do caudal geotérmico e, por fim, com maior influência os GNC com 117 kW e a diminuição da eficiência da turbina com 132 kW.

6.8. Estudo da variação de potência com a variação do caudal de n-pentano

Ao realizar-se o estudo da variação de potência com a variação do caudal n-pentano, pretende-se analisar de que forma é necessário aumentar este caudal para compensar as perdas de potência líquida, pois o objetivo da Central Geotérmica do Pico Vermelho é gerar 10 MW de potência elétrica líquida.

O estudo para esta seção foi efetuado somente com recurso ao aumento dos gases não condensáveis (por ser um fator inerente à extração de caudal geotérmico), à queda da potência calorífica no vaporizador, (devido à possibilidade da existência de depósito de partículas do geofluido e de um filme provocado pela condensação de vapor nas paredes do permutador) e, por fim, à diminuição de pressão à cabeça do poço (por ser a variável de menor influência sobre a potência gerada).

6.8.1. Gases não condensáveis

Para um aumento dos gases não condensáveis presentes no geofluido entre 2% a 2.8%, verifica-se que a potência líquida gerada diminui. Para compensar tal diminuição o caudal n-pentano deverá ser variado de acordo com o ilustrado no gráfico 10.

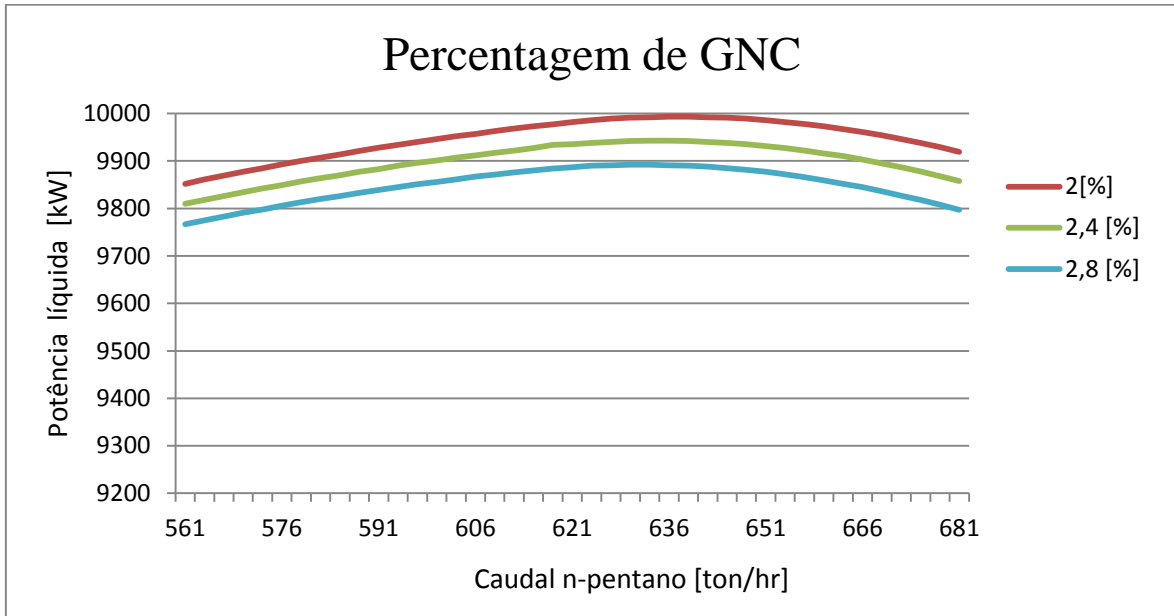


Gráfico 10: Variação do caudal n-pentano para um aumento de gases não condensáveis.

Ao efetuar-se a análise, verifica-se que, se o aumento dos GNC's for acima de 2%, não há possibilidade da variação do caudal n-pentano compensar a perda de potência daí decorrente. Também se verifica que quanto maior for a presença de GNC's, menor é o máximo atingido para a potência líquida e menor é o caudal necessário para se obter este objetivo.

6.8.2. Potência calorífica no vaporizador

Pelo gráfico 11, também se verifica que qualquer diminuição da potência calorífica no vaporizador, provoca a impossibilidade de se alcançar a potência líquida desejada somente pelo aumento do caudal n-pentano.

Ao examinar os cenários envolvidos, percebe-se que quanto maior é a diminuição da percentagem da potência calorífica, menor é a potência líquida gerada, mesmo compensando com a variação do caudal n-pentano.

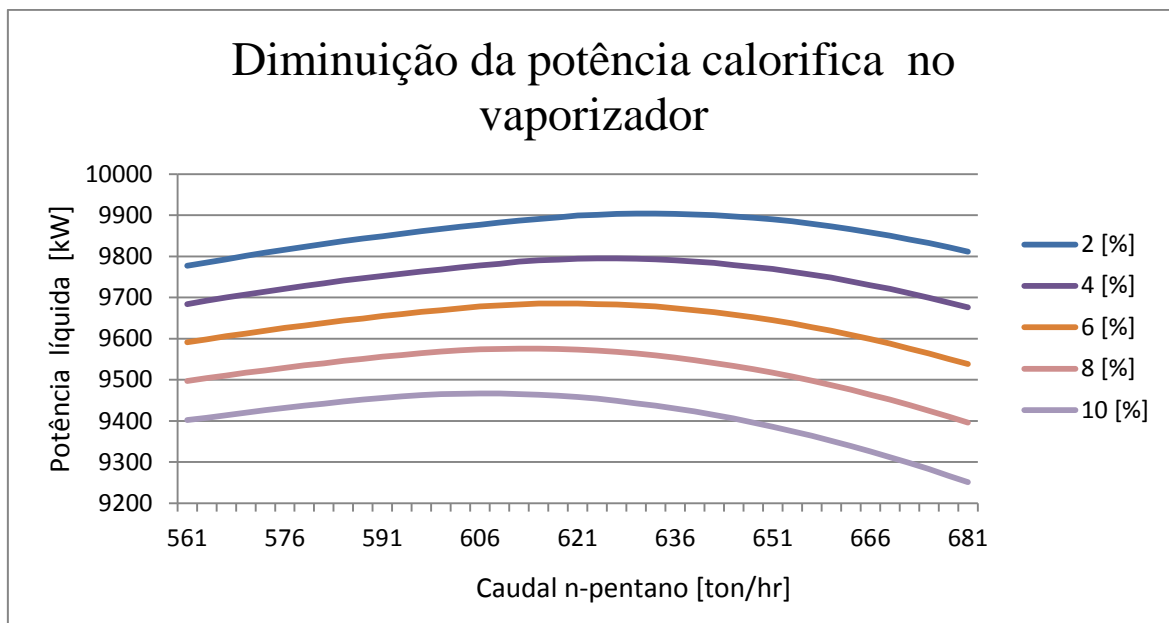


Gráfico 11: Variação do caudal n-pentano com a diminuição da percentagem da potência calorífica no vaporizador.

6.8.3. Queda de pressão

Relativamente à queda de pressão, até aos 6%, a mesma pode ser compensada por um aumento do caudal de n-pentano, alcançando-se desta forma potências líquidas superiores a 10 MW. No entanto, para quedas superiores a 8%, não se atinge a potência desejada, verificando-se a impossibilidade da variação do caudal n-pentano compensar a perda de potência resultante da queda de pressão do geofluido.

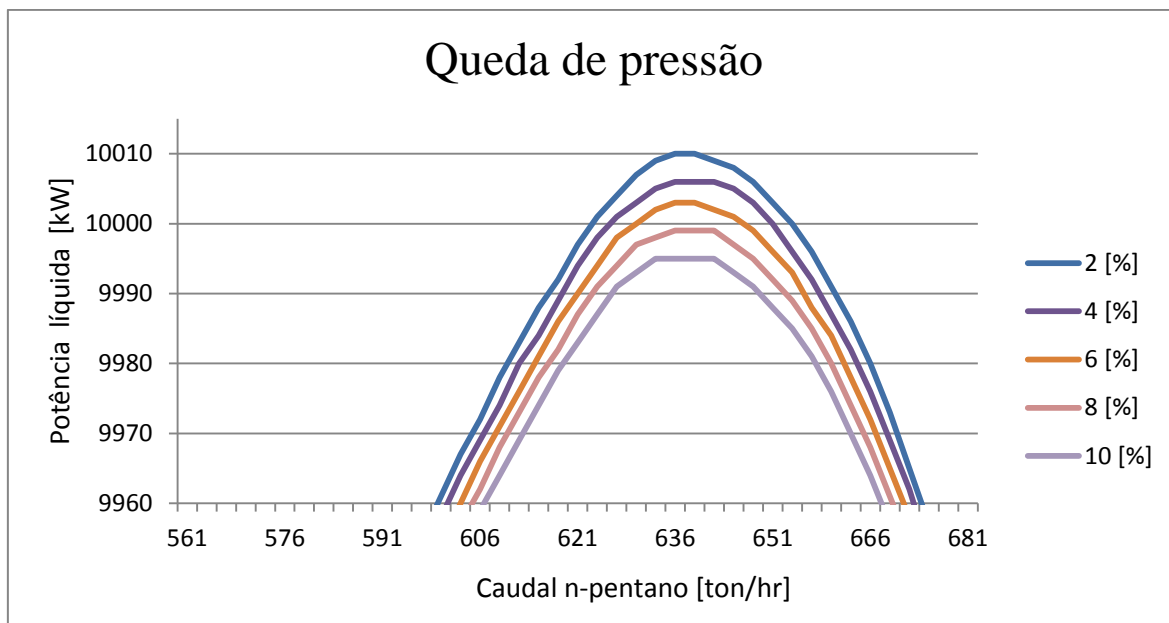


Gráfico 12: Variação do caudal n-pentano com a queda de pressão.

6.9. Estudo da variação de potência com a variação do caudal do fluido primário

O estudo da variação de potência com a variação do caudal do fluido primário permite uma análise semelhante à que foi efetuada para o caso de utilização do caudal n-pentano para compensar as perdas da potência líquida.

6.9.1. Gases não condensáveis

Para um aumento dos gases não condensáveis presentes no geofluido entre 2% a 2.8%, verifica-se que as perdas de potência líquida gerada são compensadas com o aumento do caudal do fluido primário, como se verifica no gráfico 13.

A análise mostra que, ao aumentar-se os GNC's presentes no geofluido, a potência líquida pode ser obtida com o aumento do caudal do fluido primário. Na modelação, quando se aumentou o caudal do fluido primário, manteve-se sempre a percentagem de gases relativamente ao novo valor do caudal geotérmico. Contudo, quanto maior é a percentagem de gases não condensáveis, maior é o caudal do fluido primário requerido na central para compensar a queda da potência líquida.

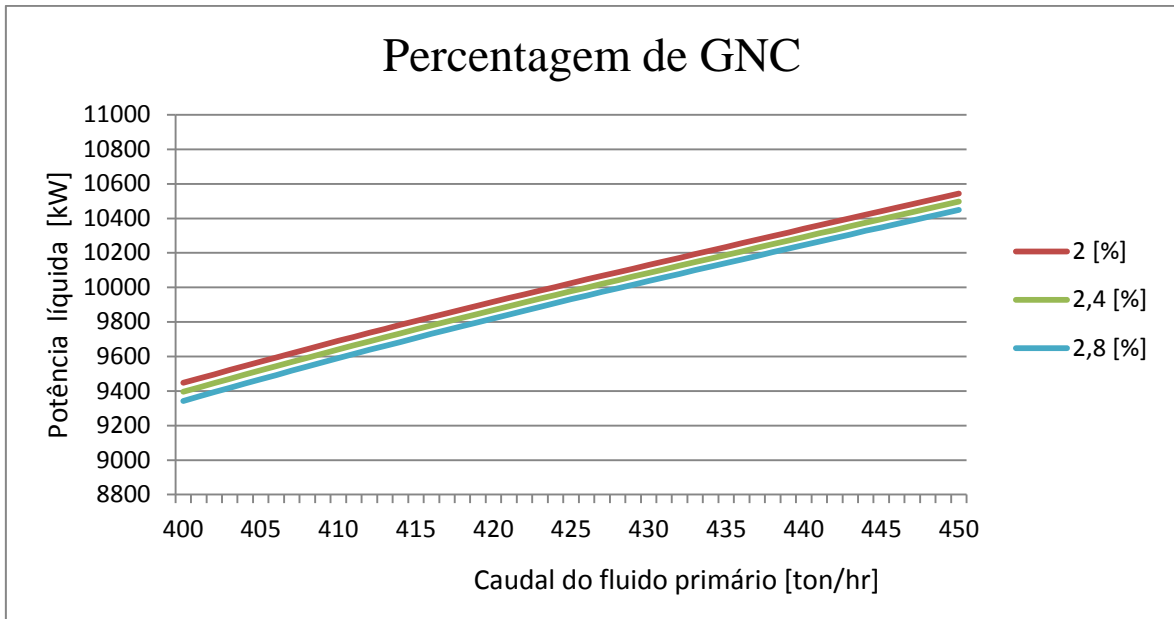


Gráfico 13: Variação do caudal do fluido primário para um aumento de gases não condensáveis.

6.9.2. Potência calorífica no vaporizador

Pelo gráfico 14, também se verifica que qualquer diminuição da potência calorífica no vaporizador, pode ser compensado por um aumento do caudal do fluido primário.

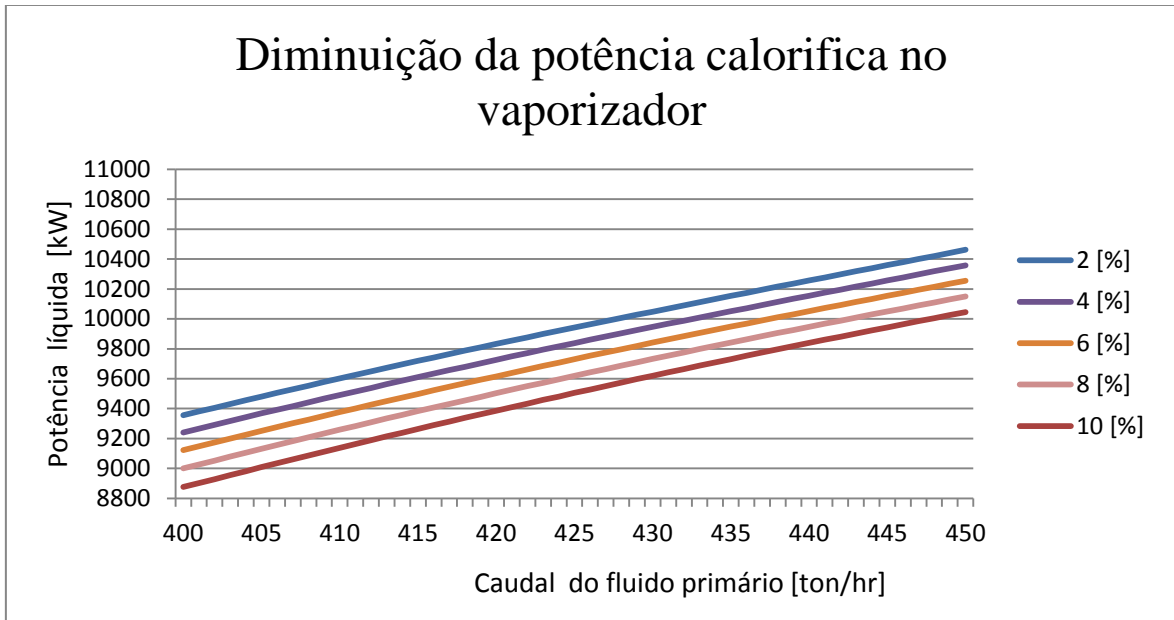


Gráfico 14: Variação do caudal do fluido primário com a diminuição da percentagem da potência calorífica no vaporizador.

6.9.3. Queda de pressão

Relativamente à queda de pressão, os resultados são semelhantes às análises anteriores. Porém, a compensação na potência líquida gerada com o aumento do caudal do fluido primário é relativamente de menor grau, comparativamente aos outros casos de estudo, devido ao facto da queda de pressão ser o fator que provoca a menor perda de potência gerada pela central.

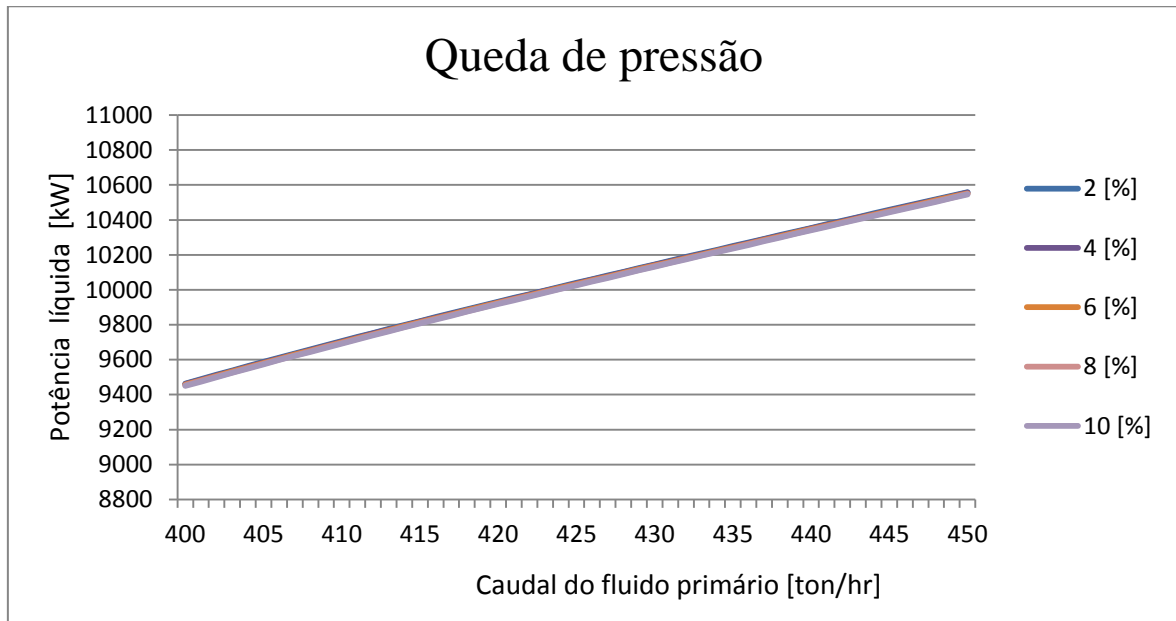


Gráfico 15: Variação do caudal do fluido primário com a queda de pressão

6.10. Variação do rendimento térmico da central

Nesta secção é apresentada a variação do rendimento térmico da central, em função das potências fornecidas e rejeitadas no ciclo, para os casos de estudo, relativamente à variação de caudal n-pentano e da variação do caudal do fluido primário.

A análise foi feita para uma variação de 1% em todos os casos, de modo a comparar o rendimento da central, relativamente à compensação das perdas de potência líquida.

Tabela 8: Dados informativos para as variações de caudais com alteração de 1% dos valores nominais.

		$\dot{Q}_{\text{Fornecido}}$ [kW]		$\dot{Q}_{\text{Rejeitado}}$ [kW]	$\dot{m}_{\text{geofluido}}$ [ton/hr]	$\dot{m}_{\text{n-pentano}}$ [ton/hr]	$\dot{W}_{\text{Líquida}}$ [kW]	η_{Ciclo} [%]
		Vaporizador	Pré-Aquecedor	Aerocondensador				
Dados Nominais		39662	31884	60198	423	621	10000	14,94
Variação do Caudal Normal-Pentano	GNC	38834	31794	59396	423	630	9887	14,97
	Potência calorífica	39266	31882	59842	423	636	9959	14,96
	Pressão	39654	31884	60192	423	621,8	10000	14,94
Variação do Caudal do Fluido Primário	GNC	39339,8	32205,2	60196,6	428,5	621	10000	14,94
	Potência calorífica	39483,4	32057,4	60192,6	425,3	621	10000	14,94
	Pressão	39662	31884	60198	423,1	621	10000	14,94

Pela tabela 8, e no que diz respeito a uma variação do caudal do fluido primário, constata-se que para uma potência líquida de 10 MW a eficiência do ciclo ronda sempre os 14.94%, em todos os casos de estudo.

Este valor de eficiência é constante, pois o aumento do caudal geotérmico debitado na central, traduz-se num aumento da potência calorífica fornecida ao sistema, ocorrendo uma compensação na potência líquida para valores desejados.

Também é notório que, com o aumento do caudal do fluido primário, a potência calorífica no vaporizador diminui, devido ao aumento dos gases não condensáveis e, conseqüentemente, à sua libertação, que é acompanhada por uma maior quantidade de vapor a ser libertado pela válvula dos gases de escape presentes neste permutador.

Relativamente ao pré-aquecedor, com o aumento do caudal do fluido primário, a potência calorífica fornecida ao sistema aumenta, atingindo-se assim o equilíbrio das potências caloríficas na obtenção de uma entalpia adequada a montante da turbina para a geração de potência. O mesmo acontece para variações de perdas superiores a 1%.

Comparativamente à variação do caudal n-pentano, como existe um maior caudal mássico, a potência fornecida ao ciclo pelos permutadores diminui, aumentando-se, assim, a eficiência de ciclo.

7. Conclusão e trabalhos futuros

A utilização de centrais geotérmicas, destinadas à produção de energia elétrica, não é exequível em muitos locais do nosso Planeta, uma vez que é necessário a ocorrência de um conjunto de fatores que são indispensáveis para a sua concretização, tais como uma entalpia favorável a pouca profundidade, bem como outras condições imprescindíveis.

Relativamente à situação da Região Autónoma dos Açores, esta encontra-se situada numa zona de enorme potencial, pois o arquipélago localiza-se junto da Crista Média Atlântica, na confluência de três placas tectónicas, a americana, a europeia e a africana, enquadramento geográfico favorável à extração de energia a partir do subsolo.

As pesquisas e os estudos efetuados mostraram que nos Açores existem as condições indispensáveis para uma exploração geotérmica, tornando-se assim possível desenvolver a produção de uma forma de energia alternativa à utilização de derivados do petróleo.

A realização do trabalho desenvolvido permitiu, desde logo, a compreensão do funcionamento de uma central geotérmica, baseada num sistema binário, operada através da tecnologia *Ciclo de Rankine*.

A técnica utilizada na conversão da energia geotérmica em energia elétrica tem de ser, necessariamente, adequada aos recursos disponíveis de acordo com as temperaturas de extração. No caso dos Açores, as temperaturas perto da superfície variam entre 100 °C a 180 °C, e com uma fase líquida dominante, o sistema binário é o indicado para a exploração, sendo o sistema que retira o melhor aproveitamento dos recursos encontrados nesta Região.

A execução da presente dissertação permitiu desenvolver um modelo básico de funcionamento de uma central geotérmica, e desenvolver cenários de desempenho da central em função de variação de alguns parâmetros críticos.

Relativamente ao modelo, este foi elaborado a partir da utilização das equações de conversão de massa e de energia em sistemas abertos. Com recurso a utilização dos parâmetros nominais, fornecidos pela SOGEO, e com o auxílio do programa EES foi possível fazer um estudo das condições envolventes em todos os processos de ciclo.

A modelação permitiu analisar o comportamento de algumas variáveis, de modo a perceber-se a sua importância na produção de energia elétrica. Para tal, procedeu-se a variações na percentagem de gases não condensáveis presentes no geofluido, simulou-se a possível existência de brine no circuito de vapor e modelou-se uma redução da potência calorífica nos vaporizadores e pré-aquecedores. Também se analisou a variação da pressão na emergência do geofluido. Por outro lado, simulou-se ainda a variação da eficiência isentrópica da turbina, atendendo a que uma contínua produção pode afetar o seu rendimento.

Pelos resultados obtidos nos diferentes cenários verifica-se que existem redução ou ganhos na produção de energia elétrica de acordo com as variações analisadas, podendo, assim, proceder-se a uma comparação dos efeitos de diminuição de um ponto percentual nas várias modelações, de modo a conhecer-se qual a variável com maior influência na redução da potência produzida.

Deste ponto de vista, verificou-se que os casos mais preponderantes, por ordem decrescente de importância, eram a diminuição da eficiência isentrópica da turbina (com a potência a descer 1.32%), a presença de gases não condensáveis no circuito de vapor (com uma diminuição de 1.17% na potência) e a diminuição do caudal geotérmico (com uma redução de potência total de 0.91%).

Desta forma justifica-se a preocupação da empresa SOGEO na manutenção da eficiência da turbina. Por outro lado, a manutenção mensal, utilizando inibidores de calcite e mudança de filtros, salvaguarda o bom funcionamento da central, pois caso contrário o caudal geotérmico diminuiria devido à obstrução causada pela calcite nas paredes das tubagens dos poços. Adicionalmente, a retenção das partículas que acompanham o fluido geotérmico provocam erosão das tubagens e depósito em zonas de transferência de calor.

De forma a compensar as perdas de potência líquida, é necessário aumentar o caudal do fluido primário de forma a obter as condições necessárias para um contínuo aproveitamento e geração elétrica por parte da central.

Em termos de trabalhos futuros, e na sequência do trabalho desenvolvido, importa estudar a influência da temperatura da fonte fria, na conversão de energia, pois o sistema porta-se de acordo com o comportamento global de uma máquina térmica, em que quanto maior for a diferença entre a temperatura da fonte fria e a temperatura da fonte quente, maior será o seu rendimento. Para compensar um menor rendimento quando a diferença de temperaturas é menor, aumenta-se o caudal do fluido de trabalho no sistema, de forma a garantir a obtenção da potência desejada.

8. Referências bibliográficas

[1] BARBIER E. – Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. ISSN 1364-0321. Vol. 6, (2002), p. 3-65.

[2] WATANABE T., KOYAGUCHI T., SENO T. – Tectonic stress controls on ascent and emplacement of magmas. Journal of Volcanology and Geothermal Research. ISSN 0377-0273. Vol. 91, (1999), p. 65-78.

[3] BICUDO C. – Geotermia: Aproveitamento Geotérmico nos Açores. **Energias Renováveis In**. Atelier Nunes e Pã, (2009), ISBN 978-989-96529-0-3. p. 122-131.

[4] DICKSON M., FANELLI M. – **What is Geothermal Energy?** [Em linha]. Itália, Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse. [Consult. 4 Maio 2012].

Disponível em

WWW:<URL:http://www.geothermal-energy.org/314,what_is_geothermal_energy.html>.

[5] CARVALHO M., FORJAZ V., ALMEIDA C. - Chemical composition of deep hydrothermal fluids in the Ribeira Grande geothermal field (São Miguel, Azores). Journal of Volcanology and Geothermal Research. ISSN 0377-0273. Vol. 156, (2006), p. 116-134.

[6] BERTANI R., UNGEMACH P. – **Geothermal Electricity and Combined Heat & Power** [Em linha]. Bélgica: EGEC – European Geothermal Energy Council. [Consult. 7 Mai. 2012].

Disponível em

WWW:<URL:http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Project_Documents/RESTMAC/EGECBrochure_Geothermal_E_CHP.pdf>.

[7] BERTANI R. - Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. Geothermics. ISSN 0375-6505. Vol. 41, (2012), p. 1-29.

[8] BICUDO C. – **Energia Geotérmica** [Em linha]. Portugal, Açores: Siaram. [Consult. 6 Mai. 2012].

Disponível em

WWW:<URL:<http://siaram.azores.gov.pt/energia-recursos-hidricos/geotermia/intro.html>>.

[9] BOLTON R., HUNT T. M., KING T., THOMPSON G. – Dramatic incidents during drilling at Wairakei Geothermal Field, New Zealand. Geothermics. ISSN 0375-6505. Vol. 38, (2009), p. 40-47.

- [10] BAHADORI A., VUTHALURU H. – Estimation of performance of steam turbines using a simple predictive tool. Applied Thermal Engineering. ISSN 1359-4311. Vol. 30, (2010), p. 1832-1838.
- [11] JALILINASRABADY S., ITOI R., VALDIMARSSON P., SAEVARSDOTTIR G., FUJII H. – Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept. Geothermics. ISSN 0375-6505. Vol. 43, (2012), p. 75-82.
- [12] KANOGLU M., BOLATTURK A. - Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy. Renewable Energy. ISSN 0960-1481. Vol. 33, (2008), p. 2366-2374.
- [13] CABEÇAS R., CARVALHO J., NUNES J. - Portugal Geothermal Update 2010. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonésia, (2010).
- [14] RAPOSO A. - A Geotermia: Riscos e impactes ambientais. Em exemplo da exploração de energia alternativas associadas ao vulcanismo. Territorium. Vol,16.
- [15] BERTANI R. - World Geothermal Generation in 2007. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany, (2007).
- [16] NUNES J. - Economic and environmental impact of geothermal production electricity in São Miguel, Açores. International Conference on Renewable Energies and Power Quality.Valencia, Spain, (2009).
- [17] Comunicação prestada pela empresa SOGEO, SA.