

THALES MALUF

**Análise comparativa de custos e técnicas de perfuração de poços para a produção de
água, energia geotérmica, petróleo e gás natural**

Thales Maluf

**Análise comparativa de custos e técnicas de perfuração de poços para a produção de
água, energia geotérmica, petróleo e gás natural**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Guaratinguetá - SP
2022

M261a	Maluf, Thales Análise comparativa de custos e técnicas de perfuração de poços para a produção de água, energia geotérmica, petróleo e gás natural / Thales Maluf - Guaratinguetá, 2023. 103 f : il. Bibliografia: f. 100-101 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Nazem Nascimento Coorientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias 1. Energia - Fontes alternativas. 2. Perfuração de poços. 3. Gás natural. I. Título CDU 620.91
-------	---

THALES MALUF

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
Orientador(a)/UNESP-FEG



Prof. Dr. DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI
Membro Externo



Eng. GUNNAR JUNQUEIRA DE SOUZA LIMA
Membro Externo

Dezembro/2022

DADOS CURRICULARES

THALES MALUF

NASCIMENTO	24.07.1999 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Luís Flávio Maluf Nery Fátima Regina Muassab Maluf
2017/2023	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Campus de Guaratinguetá

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Luís Flávio e Fátima, que sempre me apoiaram, e aos meus tios Carlos Alberto Muassab e José Roberto Muassab.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família por todo o suporte, toda a compreensão e todo o esforço que por eles foi realizado para que eu pudesse estar aqui, concluindo um curso de graduação em uma instituição como a UNESP. Gostaria de agradecer, especialmente, à minha mãe Fátima e ao meu pai Luís Flávio, por participarem mais ativamente e trabalharem incansavelmente para que eu pudesse concluir essa etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Nazem Nascimento, pela contribuição para a conclusão deste trabalho, além da contribuição para minha formação como profissional, não apenas com informações de caráter técnico, mas também com informações de caráter pessoal e profissional que foram fundamentais em minha formação como engenheiro.

Por fim, gostaria de agradecer o apoio financeiro da ANP, FINEP e MCTI, que através do programa PRH 34.1 FEG/UNESP, providenciaram os recursos necessários para que eu pudesse redigir o presente trabalho.

Este trabalho tem o apoio financeiro da ANP, FINEP e MCTI, através do programa PRH 34.1 FEG/UNESP.

*“The greatest successes come from having
the freedom to fail.”*

Mark Zuckerberg

RESUMO

O desenvolvimento da sociedade atual depende diretamente da exploração de recursos naturais e utilização destes em diferentes áreas, desde consumo direto para a realização de atividades cotidianas, até a produção de energia. Alguns desses recursos merecem destaque por sua vital importância para o funcionamento da sociedade, como é o caso da água subterrânea, do petróleo e do gás natural, e outros merecem atenção por representarem soluções alternativas em algumas situações, inclusive no que se refere à produção de energia, como é o caso da geotermia. Apesar de diferentes em sua essência, todos os recursos mencionados apresentam uma característica em comum: todos são extraídos do subsolo por meio da perfuração de poços. Nesse sentido, o trabalho desenvolvido tem o intuito de ampliar o conhecimento acerca dos processos de exploração através da realização de uma análise comparativa de custos e técnicas de perfuração de poços para a produção desses recursos. Tal análise foi baseada na revisão bibliográfica de fontes relevantes que abordavam não apenas aspectos técnicos dos processos de exploração tais como equipamentos empregados, métodos de perfuração utilizados, características do procedimento de completação e bombeamento, mas também características particulares de caráter químico e físico de cada um dos elementos. A partir dessa análise, foram observadas similaridades em termos de mecanismos de perfuração, porém, por conta de diferenças de propriedades entre os recursos, existem algumas particularidades em cada um dos processos, principalmente no que diz respeito à métrica dos poços (profundidade mais especificamente) e nos materiais que compõem equipamentos e outros elementos, o que refletiu diretamente nos custos associados. Desse modo, foi observado que as propriedades físicas e químicas dos recursos associadas diretamente ao seu processo de formação e armazenamento no subsolo, interferem diretamente no seu processo exploratório.

PALAVRAS-CHAVE: Recursos Naturais; Energia; Subsolo; Exploração

ABSTRACT

The development of today's society depends directly on the exploitation of natural resources and their utilization in various fields, ranging from direct consumption in daily activities to energy production. Among these resources, certain ones stand out due to their vital importance for societal development, such as groundwater, oil, and gas whereas others warrant attention for representing alternative solutions in specific situations, particularly for energy production, such as geothermal systems. Despite their differences in essence, all the resources mentioned share a common characteristic: they are extracted from underground sources through well drilling. Given this context, the purpose of this work is to broaden our understanding of exploration processes through a comparative analysis of drilling costs and techniques associated with the production of these resources. This analysis is rooted in a comprehensive review of pertinent literature sources, which not only assess the technical aspects of exploration processes—such as the equipment employed, drilling methods used, completion characteristics, and pumping procedures—but also delve into the chemical and physical attributes of each element. Through this analysis, similarities have emerged in terms of drilling mechanisms. However, owing to the varying properties of the resources, distinct nuances are present in each process. This is especially evident in factors such as well metrics (specifically depth) and the materials used in equipment, both of which directly impact the associated costs. Consequently, it becomes apparent that the physical and chemical properties of these resources, intrinsically linked to their formation and storage underground, exert a direct influence on their exploratory processes.

KEYWORDS: Natural Resources; Energy; Underground; Exploration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de água doce no planeta.....	19
Figura 2 – Distribuição da utilização das águas subterrâneas no Brasil em 2018.....	20
Figura 3 – Processo de formação dos recursos geotérmicos.....	22
Figura 4 – Etapas da perfuração de poços para a extração de recursos.....	26
Figura 5 – Estrutura perfuratriz para percussão.....	31
Figura 6 – Sonda de perfuração rotativa.....	33
Figura 7 – Imagem ilustrativa de um martelo DTH.....	35
Figura 8 – Tipos de broca.....	37
Figura 9 – Tipos de completção.....	42
Figura 10 – Estrutura dos poços.....	58
Figura 11 – Processo de construção do poço petrolífero e geotérmico.....	59
Figura 12 – Estruturação de poços para a exploração de petróleo, gás e geotermia.....	60
Figura 13 – <i>DTH button bit</i>	66
Figura 14 – Classificação da completção quanto ao número de zonas exploradas.....	77
Figura 15 – Bomba manual.....	78
Figura 16 – Sistemas de bombeamento mecânico/elétrico.....	79
Figura 17 – Estrutura de bombeio mecânico.....	80
Figura 18 – Análise de custo por metro perfurado.....	83
Figura 19 – Custos de perfuração em função da profundidade perfurada.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes API de cimento Portland.....	40
Quadro 2 – Estudo comparativo de propriedades.....	47
Quadro 3 – Estudo comparativo da perfuração de poços e extração dos recursos.....	54
Quadro 4 – Associação entre métodos de perfuração e tipos de solo perfurado.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição percentual do petróleo.....	49
Tabela 2 – Custos de perfuração de poços para a extração de petróleo e gás.....	82
Tabela 3 – Custos de perfuração para a extração de energia geotérmica.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPG	Associação Brasileira de Petróleo e Gás
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanço Energético Nacional
BOP	Blowout preventer
BP PLC	Brittish Petroleum Company PLC
CEI	Cornell Energy Institute
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMC	Carboxi Metil de Celulose
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTOG	Custo total para a construção de poços para extração de petróleo e gás
CTG	Custo total para a construção de poços para extração de energia geotérmica
DTH	<i>Down-the-hole</i>
EGS	Enhanced Geothermal System
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESP	Electrical Submersible Pump
GLP	Gás liquefeito de petróleo
IGA	International Geothermal Association
IRENA	International Renewable Energy Agency
LSP	Line Shaft Pump
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PDC	Polycrystalline diamond compacts
PGT	Petroleum Geoscience Technology
PM	Profundidade medida
PVC	Polyvinyl chloride
ROP	Rate of penetration
TSP	Thermally stable polycrystalline

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
kg	quilograma
t	tonelada
°API	graus API
m	metros
cm	centímetros
km	quilômetros
“	polegadas
US\$	dólares americanos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	ÁGUA SUBTERRÂNEA	19
2.2	ENERGIA GEOTÉRMICA	21
2.3	PETRÓLEO E GÁS NATURAL	25
2.4	FUNDAMENTOS DA EXPLORAÇÃO E PERFURAÇÃO	26
2.4.1	Estudo da geologia	27
2.4.2	Design do poço	29
2.4.3	Perfuração	29
2.4.3.1	Métodos de perfuração	30
2.4.3.1.1	<i>Método percussivo</i>	31
2.4.3.1.2	<i>Métodos rotativos</i>	32
2.4.3.1.3	<i>Método rotopercussivo</i>	34
2.4.3.2	Brocas	35
2.4.3.3	Fluidos de perfuração	37
2.4.4	Revestimento	38
2.4.5	Cimentação	39
2.4.6	Completação	41
2.4.7	Sistemas de elevação	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	MÉTODOS PARA A ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO	44
3.2	MÉTODOS PARA A ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS	44
4	ANÁLISES COMPARATIVAS	46
4.1	COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS RECURSOS	47
4.1.1	Composição	47
4.1.2	Formação	49
4.1.3	Armazenamento	51
4.1.4	Meios de exploração	52
4.2	COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO E EXTRAÇÃO	53
4.2.1	Estudo da geologia	55
4.2.2	Estruturação do poço, profundidades e diâmetros	57

4.2.3	Métodos de perfuração	63
4.2.4	Brocas	66
4.2.5	Fluidos de perfuração	67
4.2.6	Revestimento	69
4.2.7	Cimentação	72
4.2.8	Completação	74
4.2.9	Bombeamento	77
4.3	COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE PERFURAÇÃO	81
5	CONCLUSÃO	86
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	86
5.2	RECURSOS HUMANOS	88
	REFERÊNCIAS	90
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	100
	APÊNDICE A	102
	APÊNDICE B	103

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade atual gira em torno do montante de energia possuída e seu consequente consumo (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003). Com o passar dos anos, houve uma notória evolução na forma de se obter energia, o que passa diretamente pela obtenção de certos recursos naturais, que, além de servirem como matéria prima para a geração de energia, são empregados em diversas áreas essenciais para a manutenção da vida da população. Tais recursos naturais, definidos por Brito (2006) como recursos que se originam sem qualquer intervenção humana, englobam uma vasta gama de componentes, incluindo recursos minerais, recursos biológicos, recursos ambientais e recursos incidentes (LACERDA, 2014). De forma geral, são divididos em dois grandes grupos com base em sua capacidade de esgotamento: recursos naturais renováveis e não renováveis.

Os recursos naturais renováveis são os recursos naturais que, após serem explorados, podem voltar para seus níveis de estoque anteriores por um processo natural de crescimento ou reabastecimento, sendo a sua manutenção na natureza definida pela forma e pela intensidade com que são explorados (OECD, 2022). Dentre os diversos recursos naturais renováveis existentes, pode-se citar a luz solar, vento, vegetais, água subterrânea, fontes geotérmicas, dentre outros. Já os recursos naturais não renováveis consistem nos que não podem ser realocados no meio ambiente pelo homem ou renovados pelo próprio ambiente após sua exploração, correndo risco de deixarem de existir se explorados de maneira desequilibrada (OECD, 2022). Dentre os recursos não renováveis existentes, pode-se mencionar o petróleo e o gás natural.

Nesse trabalho, serão abordados tanto recursos naturais renováveis (água subterrânea e as fontes geotérmicas) quanto não renováveis (petróleo e gás natural). Apesar de classificados em categorias diferentes, esses recursos apresentam uma característica em comum: todos podem ser encontrados em reservatórios naturais profundos no subsolo. Desse modo, para que esses elementos sejam explorados e devidamente aproveitados, torna-se necessário o acesso ao subsolo através do processo de perfuração de poços que, por sua vez, exige uma preparação adequada e equipamentos capazes de permitir a ocorrência dessa extração (FANCHI; CHRISTIANSEN, 2017).

No entanto, a perfuração de poços e todos os processos posteriores que visam sua adequação para a extração de recursos, envolvem técnicas complexas, diferentes materiais e diferentes equipamentos, tornando-se necessário um estudo que defina a configuração mais apropriada e benéfica para se empregar em cada situação. Portanto, com o intuito de

verificar os padrões de perfuração de poços para a extração de água subterrânea, energia geotérmica, petróleo e gás natural, e associar esses padrões às características particulares de cada um desses recursos e dos reservatórios onde são armazenados, de modo ampliar a área de conhecimento acerca do tema, o trabalho realizará uma comparação de ordem técnico-econômica entre esses procedimentos.

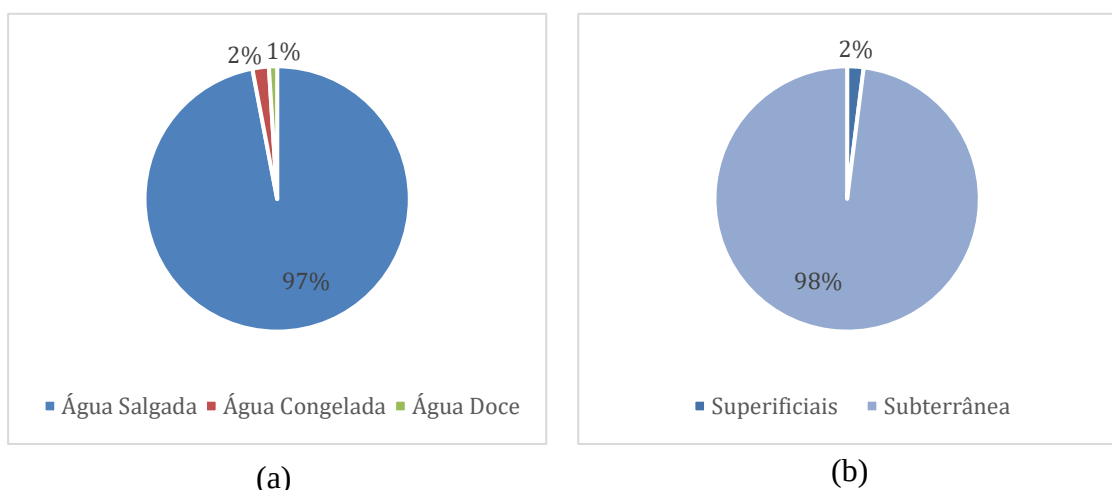
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA

A importância da água para a sociedade e para as relações biológicas existentes no planeta é um assunto amplamente discutido na atualidade. Apesar de apresentar grande importância para a geração de energia, representando, de acordo com o Balanço Energético Nacional referente ao ano de 2020 disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2021), cerca de 65,2% de toda a energia elétrica e 12,6% de toda a energia primária produzida no Brasil, sua atuação não se restringe apenas a isso. A água tem participação nas mais diversas esferas da sociedade, tais como desenvolvimento agrícola e industrial, composição bioquímica dos seres vivos, produção de bens de consumo e até como fator representativo de valores sociais e culturais. No entanto, por ser um recurso que tem um reabastecimento controlado pela natureza através do ciclo hidrológico, muitas vezes é alvo de explorações mal planejadas que comprometem a integridade e a disponibilidade do recurso para uso.

A água subterrânea é definida como água que circula entre espaços vazios de rochas e sedimentos abaixo da superfície (FARACINI, 2014). Embora, de modo geral, não seja uma fonte energética de elevado potencial, os reservatórios de água subterrânea são considerados como uma das principais fontes de água doce disponíveis. A Figura 1 a seguir mostra a distribuição atual da água no planeta.

Figura 1 – Distribuição de água no planeta: (a) Ocorrência de água no planeta; (b) Disponibilidade de água doce no planeta

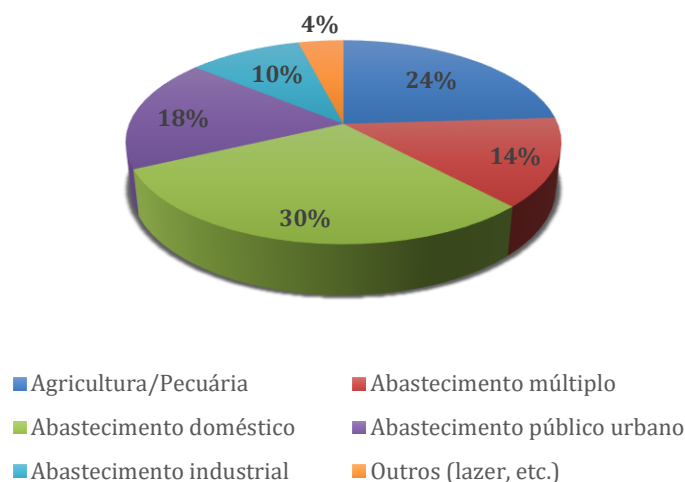


Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022)

Através da Figura 1 (a) é possível observar que apenas 1% de toda água do planeta é composta por água doce disponível para consumo, enquanto a Figura 1 (b) mostra que, desse 1%, cerca de 98% estão disponíveis em reservatórios subterrâneos. Portanto, esse recurso se apresenta como uma alternativa extremamente atraente para o abastecimento, sendo captado a partir da perfuração de poços tubulares profundos e poços artesianos (CETESB, 2022).

O uso da água subterrânea é consideravelmente diverso, podendo ser explorado de diferentes maneiras. Tomando o Brasil como exemplo, segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), o uso das águas presentes no subsolo no ano de 2018 estava distribuído conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição da utilização das águas subterrâneas no Brasil em 2018



Fonte: CPRM (2018)

Através da Figura 2 é possível verificar que a água subterrânea faz parte dos mais diversos setores dentro da sociedade, tendo participação tanto no setor de produção de alimentos através da agricultura e pecuária, no consumo diário por parte da população, na produção industrial, nos sistemas de saneamento, no lazer, dentre outras áreas. Também é possível perceber que há um predomínio do uso da água subterrânea para consumo humano, representado na Figura 2 pelo abastecimento doméstico e pelo abastecimento público urbano, o que é um reflexo da Política Nacional dos Recursos Hídricos, estabelecida pela lei nº 9.433 de 1997, a qual apresenta como uma de suas diretrizes, a água como bem econômico de domínio público e de uso prioritário para consumo humano (HAGER; D'ALMEIDA, 2008). Ademais, vale ressaltar que a utilização da água subterrânea no

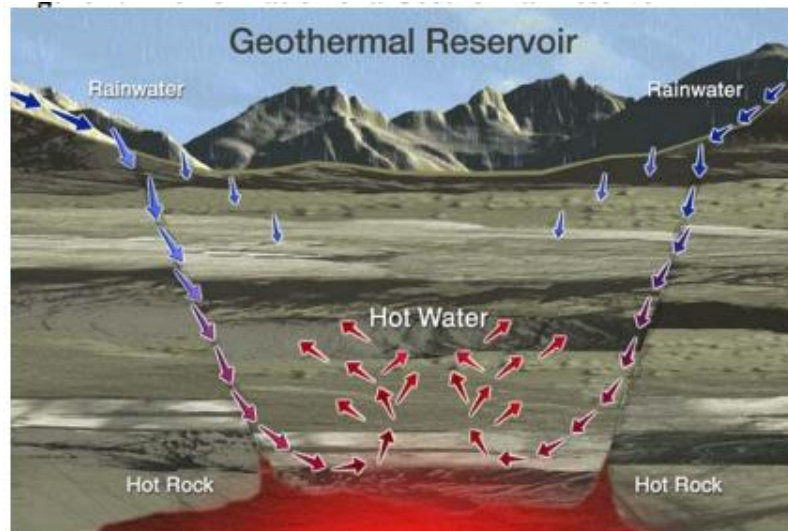
Brasil ocorre como fonte alternativa ou complementar de água em caso de falhas no abastecimento público, se constituindo como uma alternativa mais econômica do que o uso das águas fornecidas pelos serviços públicos (HIRATA; FERNANDES; BERTOLO, 2016).

2.2 ENERGIA GEOTÉRMICA

A energia geotérmica, de acordo com Anjos (2018), consiste em uma alternativa energética relacionada ao calor proveniente das camadas mais interiores da terra, que atinge as camadas mais superficiais em função de mecanismos de transferência de calor, tais como a condução e a advecção. A condução, descrita matematicamente pela lei de Fourier, está relacionada à propagação de movimentos atômicos ou moleculares sem o movimento geral do meio ou fluido onde ocorre, enquanto a advecção consiste em um processo de transposição de energia movendo um fluido que contém energia (FITTS, 2015). Nas regiões mais próximas do núcleo externo mais líquido, a transferência se dá por advecção, enquanto na crosta terrestre o calor flui principalmente por condução em uma taxa constante, por conta da condutividade térmica constante dos materiais que a compõe. Desse modo, é criado um gradiente geotérmico (variação de temperatura em função da profundidade) que é essencial de ser determinado na exploração geotérmica (FITTS, 2015).

Através desses dois principais mecanismos de transferência de calor que ocorrem na subsuperfície, e de outros mecanismos menos significantes, o calor proveniente do núcleo terrestre atinge camadas próximas à crosta terrestre alcançando regiões de aquíferos subterrâneos alterando a temperatura das águas e provocando, possivelmente, alterações de estado, originando-se o vapor. Essa água quente ou vapor gerado em detrimento a esse processo, pode ficar preso em rochas porosas cercadas por rochas impermeáveis, dando origem aos reservatórios geotérmicos. Desse modo, a extração de vapor e água quente aquecidos pelo calor da terra, quando não há a manifestação espontânea na superfície terrestre como no caso dos *hot springs* e dos gêiseres, exige uma perfuração desses reservatórios geotérmicos e, por vezes, a perfuração de poços de injeção de água quando a fonte natural de água subterrânea não disponibiliza o volume de água suficiente para extração (BLODGETT; SLACK, 2009). O processo de formação e fluxo dos recursos geotérmicos são ilustrados pela Figura 3.

Figura 3 – Processo de formação dos recursos geotérmicos



Fonte: Blodgett e Slack (2009)

Através da Figura 3 é possível observar que a água proveniente da precipitação adentra o solo, sendo armazenada em regiões que, quando sujeitas à ação do calor da terra, permitem o aquecimento dessa água que pode ser armazenada ou ascender diretamente à superfície, a depender da permeabilidade do solo onde fica armazenada.

Segundo Reis (2019), o vapor e a água quente extraídos dos reservatórios geotérmicos são destinados a três usos principais: uso direto, geração de energia elétrica em centrais geotérmicas e controle térmico de ambientes através das bombas de calor. O uso direto dos recursos geotérmicos seria o aproveitamento do vapor e da água quente de forma direta tanto para aquecimento de ambientes, estufas, lagos de aquicultura e piscinas termais, quanto para secagem agrícola, derretimento de neve, dentre outros usos (LUND; BOYD, 2016). Para uso direto, a fonte geotérmica não necessariamente precisa apresentar uma temperatura extremamente elevada, de modo que a exploração de fontes de baixa e média entalpia (temperaturas de armazenamento variando entre 50 °C e 150 °C) é suficiente para essa finalidade (CONFESSOR; SILVA; SOUZA, 2020; SINGHAL; GUPTA, 2010).

Já o uso de recursos geotérmicos para a geração de energia elétrica consiste no direcionamento dos vapores extraídos para as centrais geotérmicas através de tubulações, destinando-os para o acionamento das turbinas. As turbinas convertem a energia do vapor de alta pressão incidente em um movimento giratório no rotor, o qual transfere esse movimento a um alternador que é responsável por convertê-lo em energia elétrica direcionada à rede (REIS, 2019). É válido ressaltar que a exploração de geotermia para geração de energia elétrica exige que a fonte de extração dos recursos geotérmicos seja de

alta entalpia, ou seja, que a temperatura dos reservatórios alvos da exploração seja superior a 150 °C, sendo que quanto maior a temperatura, maior o potencial energético da fonte (SOUZA FILHO, 2012). Entretanto, diferentemente das fontes de baixa entalpia, as fontes de alta entalpia não são encontradas em qualquer lugar do planeta, mas apenas em zonas de intrusão magmática, representadas principalmente pelas regiões de transição de placas tectônicas, e regiões vulcânicas, o que torna a geração de energia elétrica a partir da geotermia limitada a certas regiões (CONFESSOR *et al.*, 2020).

O emprego da geotermia para o controle térmico de ambientes se dá através das chamadas bombas de calor (*heat pumps*). Essas bombas se baseiam em ciclos de refrigeração e são definidas como equipamentos mecânicos que retiram calor de um local e transferem para outro, através da circulação de água por tubos dispostos abaixo do solo e nos arredores dos prédios ou estabelecimentos a serem aquecidos. De maneira simplificada, para a geração de calor para o ambiente, a bomba promove a circulação de água por entre regiões de elevada temperatura no solo de modo a extrair o calor da terra e torná-lo disponível em outro local, que seria o ambiente que se deseja aquecer. Com a inversão do ciclo, a bomba de calor é capaz de retirar o calor do ambiente e transferi-lo para o subsolo (NEAVE, 2002; BLODGETT; SLACK, 2009).

Apesar de ser um recurso natural cuja exploração ainda está em desenvolvimento e de não ser consolidado em diversos lugares do mundo, a energia geotérmica se apresenta como uma alternativa confiável e relativamente limpa para geração de energia elétrica e para aquecimento. Segundo Turgeon e Morse (2012), os recursos geotérmicos têm disponibilidade independente de fatores climáticos, o que significa que sua exploração pode ser feita em qualquer período do ano, além de seu uso envolver apenas baixas emissões de dióxido de enxofre, óxidos nítricos e particulados. Dentre os países que mais aproveitam a energia geotérmica como recurso, encontra-se a Islândia, que apesar de não ser o maior produtor, é o país em que a energia geotérmica tem a maior participação na matriz energética. Segundo IRENA (2021), cerca de 92% de toda a energia elétrica produzida na Islândia é proveniente de fontes renováveis, sendo que desses, 85% são extraídos de fontes geotermiais, além de que a energia geotérmica é responsável por suprir mais de 90% da demanda de calor do país. Como consequência dessa aplicação, a qualidade do ar islandês foi considerada como sendo uma das melhores do mundo juntamente com a Finlândia, segundo um estudo publicado pela organização Greenpeace e a empresa de software *AirVisual*, no ano de 2019 (EUROPEAN WAY, 2019).

Levando em consideração a exploração de energia geotérmica no Brasil, é possível

afirmar que apesar de o cenário apresentado ser de desenvolvimento, ainda é um cenário bastante discreto. Analisando-se o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022, referente ao ano de 2021 e disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é possível observar que não há uma menção individualizada da energia geotérmica como participante da matriz elétrica do país, de modo que ela se mostra praticamente descartada considerando-se a produção total de energia elétrica. No entanto, por existirem esforços que visam garantir a viabilidade da aplicação dos recursos geotérmicos no país, tanto na área de geração de energia elétrica, quanto na produção para uso direto desde a década de 70, tornou-se possível o emprego da energia geotérmica em aplicações agrícolas, industriais e no turismo, especialmente em parques de fontes termais localizados em municípios como Caldas Novas (GO), Pirituba (SC), Olímpia (SP), Águas de Lindóia (SP) e Águas de São Pedro (SP) (ARBOIT *et al.*, 2013).

Segundo Castro *et al.* (2009) são dois os principais fatores que fazem com que o Brasil não apresente tanta eficiência na exploração e altas taxas de aproveitamento de recursos geotérmicos. O primeiro fator é a estabilidade da fonte primária de energia elétrica do país em função da abundância hídrica, associada à disponibilidade de outras fontes renováveis alternativas. O Brasil é um país com corpo hídrico extremamente extenso, de modo que as fontes hidráulicas representam mais da metade da oferta interna de energia elétrica do país. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022 disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no ano de 2021, cerca de 56,8% da oferta interna de energia elétrica estava associada a fontes hidráulicas, 10,6% associados à energia eólica, 8,2% à biomassa e 2,47% à energia solar. Desse modo, por ter uma matriz elétrica bem estabelecida em recursos naturais renováveis, poucos são os incentivos que visam o desenvolvimento de novas fontes, dificultando o crescimento da exploração geotérmica no país. O segundo fator está diretamente relacionado às condições geológicas do país, uma vez que, em território brasileiro, as atividades tectônicas e magmáticas são praticamente inexistentes em tempos geológicos recentes, o que torna as fontes geotérmicas disponíveis na região deprimidas de elevado conteúdo energético. Assim sendo, mesmo contendo um elevado volume de águas subterrâneas armazenadas em grandes aquíferos, o que representa uma enorme vantagem em termos de exploração de energia geotérmica, a exploração em território nacional esbarra em fontes de baixa entalpia, tendo que destinar sua exploração para aplicações diretas.

2.3 PETRÓLEO E GÁS NATURAL

O petróleo é definido como uma mistura de hidrocarbonetos (cadeia de moléculas de carbono e hidrogênio) que pode ser encontrada nos estados líquido, sólido ou gasoso a depender das condições de temperatura e pressão a que são submetidos, apresentando traços de outros componentes como o enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais (Fe, Ni, V, etc) (Selley e Sonnenberg, 2016). É classificado em função da porcentagem de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e compostos aromáticos presentes em sua estrutura, o que é determinado pela matéria orgânica original e pelas variáveis termodinâmicas envolvidas no processo de formação (GARCIA BAUTISTA, 2008).

Assim como o petróleo, o gás natural é um recurso natural não renovável composto por hidrocarbonetos e não hidrocarbonetos, porém de grupos física e quimicamente distintos (SELLEY; SONNENBERG, 2016). Os hidrocarbonetos que compõem o gás natural, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, são predominantemente parafínicos leves com proporções consideravelmente menores de outros hidrocarbonetos de maior peso molecular, de modo que esse recurso é encontrado apenas em fase gasosa ou em solução juntamente do petróleo em reservatórios naturais de subsuperfície (LYRA, 2014; TEIXEIRA, 2015).

Tanto o petróleo quanto o gás natural apresentam uma importância extremamente elevada para a sociedade em função do seu elevado conteúdo energético. De acordo com o Balanço Energético Nacional referente ao ano de 2020, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2021), o petróleo (44,8%) e o gás natural (13,6%) representaram cerca de 58,4% da produção total de energia primária consumida pela população brasileira, ou seja, os dois recursos são responsáveis por mais da metade da produção energética do país. No entanto, essa realidade não é restrita apenas ao cenário brasileiro. Embora muitas alternativas energéticas tenham sido buscadas como forma de solucionar a elevada emissão de gases poluentes em função da queima dos combustíveis fósseis, segundo o *Statistical Review of World Energy 2022*, disponibilizado pela *British Petroleum Public Limited Company* (2022), o petróleo (30,95%) e o gás natural (24,42%), em 2021, representaram cerca de 54,4% de toda a energia primária consumida pela população mundial. Desse modo, pode-se afirmar que tais recursos são os maiores responsáveis pela produção e consumo de energia primária no mundo.

Entretanto, é necessário ressaltar que o petróleo bruto não tem aplicação direta. É necessário que, após ser extraído, o petróleo passe por um processo de variação contínua de

pressão e temperatura, conhecido como refino, de modo que possam ser extraídos produtos derivados, tais como gasolina, GLP, querosene, lubrificantes, asfalto, nafta, propano, dentre outros (ISSA, 2015; ANP, 2021). Assim sendo, por conta dos variados tipos de derivados que podem ser obtidos do petróleo bruto, sua aplicação vai além da queima para a geração de energia para a movimentação de automóveis, trens, aviões e navios. Derivados do petróleo são empregados também na pavimentação de estradas, na lubrificação de máquinas, na produção de plásticos, fibras, borrachas, tintas, cosméticos, dentre outros produtos, o que faz com que esse recurso assuma um valor econômico muito significativo (FARAH, 2013). O gás natural, por sua vez, é utilizado no setor industrial, tanto em segmentos de produção de ferro, aço, papel, dentre outros produtos, quanto como fonte de energia elétrica para aquecimento e climatização de ambientes; é utilizado também no setor domiciliar e comercial sendo utilizado para a cocção de alimentos, climatização de ambientes e aquecimento da água; é usado no setor de transporte, como substituto do etanol e da gasolina em veículos leves, e como substituto do óleo diesel em veículos pesados e embarcações; e também é usado no setor de cogeração, onde auxilia na produção de energia elétrica a partir da sua queima associada a uma turbina a gás ligada a um gerador, e na produção de energia térmica sendo utilizado como gás de exaustão para a alimentação de uma caldeira de recuperação (TEIXEIRA, 2015).

2.4 FUNDAMENTOS DA EXPLORAÇÃO E PERFURAÇÃO

O processo de perfuração de poços e a exploração dos recursos naturais armazenados em reservatórios subterrâneos possuem particularidades em função das características geológicas dos reservatórios e das características físico-químicas dos próprios recursos. No entanto, passam, em geral, por uma mesma sequência de procedimentos, a qual é ilustrada pela Figura 4.

Figura 4 – Etapas da perfuração de poços para a extração de recursos



Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.1 Estudo da Geologia

Primeiramente, para que seja realizada a exploração de recursos subterrâneos em um determinado local, é necessário que se tenha um conhecimento acerca da região que se deseja explorar e da localização exata do reservatório. Para isso, são realizados estudos de propriedades geológicas e geofísicas das formações que se deseja explorar, as quais são capazes de fornecer informações acerca das áreas mais prováveis de armazenamento do recurso desejado e gerar estimativas para a perfuração de poços, indicando a viabilidade da exploração (THOMAS, 2001; KANA *et al.*, 2014).

De modo geral, a exploração se inicia com um estudo da geologia do local, o qual envolve um mapeamento geológico através de técnicas específicas como: a fotogeologia, que se refere a fotografias aéreas de dobras, falhas e mergulhos das camadas geológicas visíveis; aerofotogrametria, que envolve fotografias aéreas dos terrenos a partir de um avião carregado com equipamentos; e análise da geologia de subsuperfície (MANZELLA, 1999; THOMAS, 2001). Em alguns casos, a coleta de informações é realizada por meio da perfuração de poços pioneiros, embora seja um procedimento relativamente custoso.

Realizados os estudos geológicos da região onde a exploração irá ocorrer, inicia-se a série de estudos acerca das características geofísicas das formações a partir de procedimentos experimentais. O principal intuito desse estudo é a verificação do perfil da formação quanto à algumas propriedades como condutividade elétrica, propriedades elásticas, suscetibilidade magnética, temperatura, dentre outras. Tais propriedades podem auxiliar na identificação da composição de cada camada rochosa do subsolo, e na determinação de importantes propriedades como espessura das camadas, porosidade, prováveis fluidos nos poros, dentre outras informações (MANZELLA, 1999; THOMAS, 2001).

Os métodos geofísicos são divididos em dois grandes grupos: os métodos diretos e os indiretos. Os métodos diretos fornecem informações sobre parâmetros influenciados diretamente pela presença do recurso em análise, sendo usualmente executados durante a perfuração ou através da perfuração de poços exploratórios por meio do uso de uma sonda inserida no interior do poço. Esses métodos também são conhecidos como métodos de avaliação da formação, ou métodos de perfilagem geofísica que garantem uma imagem visual que correlaciona uma certa característica da formação em função da profundidade. Os principais exemplos de perfis existentes são: a perfilagem por raios gama, que consiste nos pulsos emitidos pela radiação natural emitida por elementos como urânio, tório e

potássio presentes nas rochas através de um cintilômetro; a perfilagem por métodos elétricos, que definem a condutividade das rochas, ou a resistência à passagem de corrente elétrica através de um pacote de rocha localizado entre eletrodos, podendo variar de acordo com o número de eletrodos empregados e o modo de arranjá-los na sonda; o método de potencial espontâneo, que consiste na medição da difusão de cargas elétricas devido a presença de fluidos e outros compostos eletrolíticos dentro das camadas porosas, ou seja, faz a medição da diferença de potencial entre a superfície e o interior do poço, auxiliando em cálculos relativos à porosidade e à permeabilidade da formação; perfilagem por indução, cujo princípio físico tem por base o acoplamento indutivo entre bobinas e rochas, isto é, através de bobinas, é induzido um campo eletromagnético variável que penetra radialmente as camadas vizinhas, permitindo a identificação da condutividade dessas camadas; perfilagem sônica, que consiste em um método para se obter a porosidade dos aquíferos medindo o tempo de propagação de uma onda acústica por um determinado espaço de rocha; o perfil neutrônico, que é utilizado para a detecção da porosidade, litologia e presença de hidrocarbonetos leves, através do bombardeamento de nêutrons na formação e medição de nêutrons termais da rocha; e o perfil de densidade, que permite não só a definição da densidade, mas também da porosidade e das zonas de gás através da detecção de raios gama defletidos por elétrons orbitais dos elementos componentes das rochas (FEITOSA *et al.*, 2008; MORAIS, 2014; THOMAS, 2001).

Já os métodos indiretos fornecem informações mais gerais sobre a geologia, tendo a capacidade de evidenciar a existência de reservatórios com precisão. Geralmente são empregados anteriormente à perfuração dos poços, com o auxílio de alguns equipamentos especiais de medição. Os principais métodos indiretos que podem ser mencionados são: o método gravimétrico, que está associado à detecção da variação da densidade na subsuperfície, de modo a tornar possível a estimativa de espessura dos sedimentos, identificar a presença de certas rochas, especialmente rochas magmáticas localizadas em fontes de calor, e avaliar a capacidade de recarga dos reservatórios; a prospecção magnética, que consiste na verificação da intensidade magnética das regiões, de modo a ser útil na identificação de rochas magnéticas, rochas ígneas e bacias sedimentares; e os métodos sísmicos, que podem ser tanto de refração quanto de reflexão, baseando-se na análise da propagação de ondas elásticas emitidas ao subsolo através de fontes artificiais, e que são capazes de prever a profundidade e a espessura de uma formação geológica específica (ARETOUYAP *et al.*, 2016; KANA *et al.*, 2014; THOMAS, 2001). Os métodos indiretos e diretos podem ser empregados tanto individualmente, quanto em conjunto, garantindo um

maior detalhamento das informações coletadas (THOMAS, 2001).

2.4.2 Design do Poço

Após o estudo prévio da região e determinação dos objetivos a serem alcançados com o processo de perfuração e construção do poço, a equipe de perfuração desenvolve o plano de perfuração, o qual compõe uma proposta que necessita ser aprovada pelo responsável pela administração do processo para que seja executado (PURBA *et al.*, 2022). Nessa etapa são definidos parâmetros métricos como os diâmetros de perfuração, dos revestimentos e a profundidade estimada total e das seções (se o poço for construído em etapas). Além do método de perfuração a ser empregado, essa etapa envolve a definição de todos os elementos envolvidos no processo de perfuração, o que inclui o tipo de broca, a composição dos materiais utilizados no revestimento, o tipo de cimento e o método de cimentação a ser empregado, os elementos a serem usados na completação, os tipos e materiais das brocas, dentre outros fatores. No entanto, conforme a perfuração do poço é realizada e mais informações são coletadas, alguns desses fatores pré-definidos podem sofrer alterações visando uma melhoria na eficiência do processo.

2.4.3 Perfuração

Após realizada a etapa de planejamento de construção do poço, inicia-se o processo de perfuração propriamente dito. A perfuração é o método mais efetivo de exploração de recursos subterrâneos e apesar de ser uma prática antiga, com registros de até 4000 anos atrás, vem se desenvolvendo continuamente, permitindo o acesso a regiões cada vez mais profundas e a extração de quantidades cada vez maiores dos recursos (FEITOSA *et al.*, 2008; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013).

De modo geral, a perfuração de poços é realizada por uma estrutura denominada de sonda de perfuração, também chamada de sonda perfuratriz em alguns casos (THOMAS, 2001). Em essência, a sonda perfuratriz é composta por uma espécie de mastro ou torre de sustentação onde os componentes da coluna de perfuração são suspensos através de cabos e polias e conectados a um guincho que permite o movimento vertical da coluna. A alimentação do conjunto, na grande maioria das aplicações, é feita por uma fonte externa de energia que é responsável pelo funcionamento do sistema (SOULSBY, 2010). A coluna de perfuração é composta por um conjunto de tubos de composições distintas, conectados

entre si e conectados a um elemento responsável pela desagregação da formação rochosa, o qual pode ser uma broca, um trépano ou um martelo DTH. Segundo Plácido e Pinho (2009), as principais funções da coluna de perfuração são aplicar peso sobre a broca (WOB) (do inglês, *Weight-on-bit*), conduzir fluido de perfuração para o fundo do poço, garantir a direção desejada do poço e transmitir o movimento de rotação para a broca.

Conceitualmente, as sondas de perfuração mais complexas são compostas por um conjunto de sistemas, os quais executam funções específicas ao mesmo tempo que funcionam em conjunto para a realização da perfuração de poços e para permitir o acesso a reservatórios subterrâneos (MALOUF, 2013). Os sistemas que compõem as sondas de perfuração podem variar de acordo com o método de perfuração que se decidiu empregar e de acordo com o recurso que está sendo explorado. Segundo Thomas (2001), as sondas de perfuração mais empregadas para a perfuração de poços de elevada profundidade são formadas por um sistema de sustentação, um sistema de geração e transmissão de energia, um sistema de movimentação de carga, um sistema de rotação (pode não existir, como no caso de perfurações percussivas), um sistema de circulação de fluidos, um sistema de segurança do poço e um sistema de monitoramento.

Apesar de existirem algumas diferenças específicas em função do método de perfuração executado, do tipo de solo e do recurso que está sendo explorado, o processo de perfuração segue um procedimento bem definido. Nos sistemas convencionais, quando os motores das sondas são acionados, o sistema de transmissão de energia transporta essa energia para a coluna de perfuração, gerando o movimento da coluna. A partir desse movimento e do peso que a coluna de perfuração aplica sobre o elemento responsável pela ruptura da rocha (broca, trépano ou martelo DTH) localizado em sua extremidade, a fratura da rocha é realizada. Durante a realização da perfuração, é bombeado um fluido pelo interior ou pela parte externa da coluna de perfuração, conhecido como fluido de perfuração, o qual alcança o interior do poço de modo a resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca, facilitar o processo de desagregação das rochas e transportar os cascalhos do fundo do poço. Esse fluido, após retirado do interior do poço, é captado e tratado pelo sistema de circulação para ser reutilizado no processo (BARBOSA, 2019).

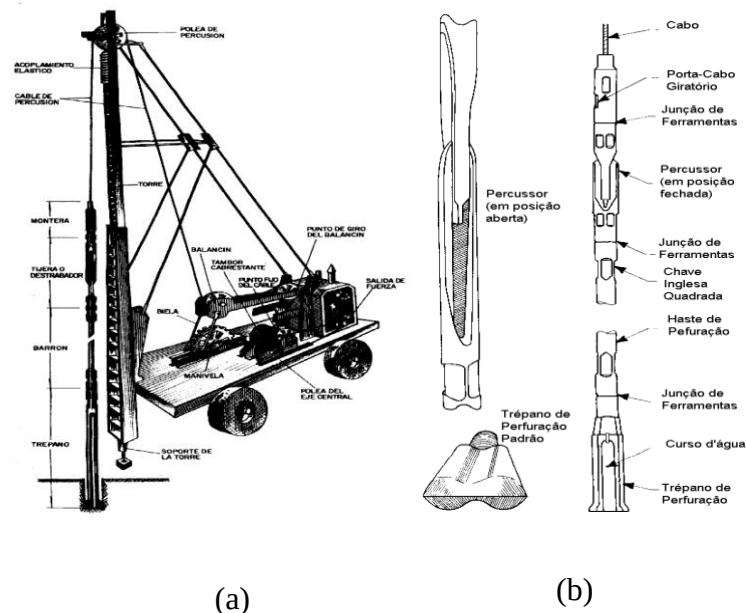
2.4.3.1 Métodos de perfuração

São 3 os principais métodos de perfuração historicamente empregados: o método percussivo, os métodos rotativos e os métodos rotopercussivos.

2.4.3.1.1 Método percussivo

O método percussivo promove a perfuração da formação rochosa por sucessivos golpes efetuados por um conjunto de ferramentas composto por porta-cabo, percussor, haste e trépano, com peso total variando entre 800 e 1000 kg, que executa movimentos verticais ascendentes e descendentes continuamente (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Esse conjunto de ferramentas é suspenso por um cabo enrolado sobre um carretel ou tambor, e o acionamento do conjunto geralmente é feito por motores a diesel. Esse método é mais indicado para a perfuração de rochas sedimentares consolidadas, embora também possa ser realizado em rochas sedimentares inconsolidadas e em formações cristalinas, exige um fluxo constante de fluidos de perfuração, se limita a profundidades de até 200 m e é um processo relativamente lento, o que tornou rara sua utilização na atualidade (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013; SOULSBY, 2010). É possível observar, na Figura 5, uma ilustração da estrutura perfuratriz utilizada para a perfuração pelo método percussivo e a ferramenta que executa a perfuração.

Figura 5 – Estrutura perfuratriz para percussão: (a) Máquina percussora; (b) Ferramenta de uma percussora



Fonte: Costa Filho *et al.* (1998)

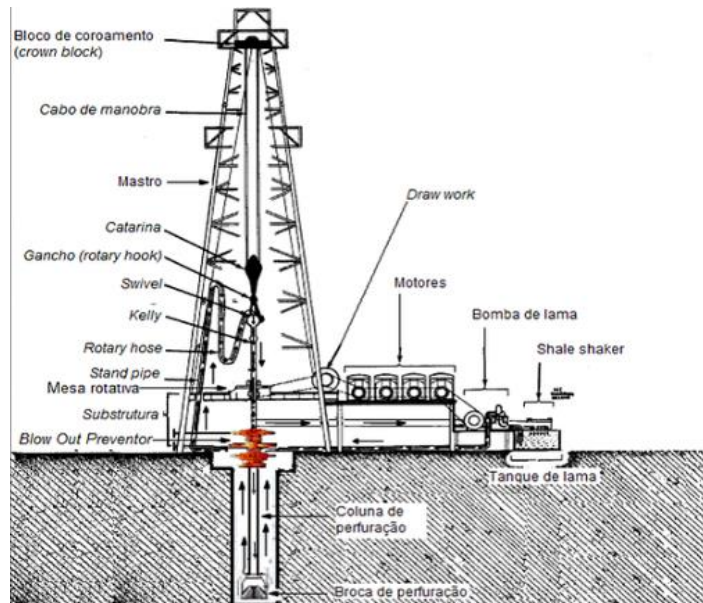
A sonda perfuratriz, ilustrada pela Figura 5 (a) é composta basicamente por guincho com 3 tambores (carretel principal, de revestimento e da caçamba), que permite a

suspensão do ferramental, uma torre de sustentação, uma unidade motriz, um balancim, que regula a altura da queda do ferramental, cabos de aço, polia de percussão e uma caçamba de limpeza. Já a ferramenta de perfuração, ilustrada pela Figura 5 (b), é composta por um porta cabo, que prende o cabo de aço ao restante da coluna, o percussor, que possui maior resistência e imprime um segundo choque do trépano na formação, a haste, que acrescenta peso à coluna ajudando a manter a verticalidade do poço, e o trépano, que é a ferramenta que efetivamente promove a fratura da formação rochosa (COSTA FILHO *et al.*, 1998). É válido mencionar que, para perfurações mais elaboradas, as perfuratrizes são montadas sobre chassis, enquanto para perfurações mais simples elas são armadas no solo por uma única pessoa (SOULSBY, 2010).

2.4.3.1.2 Métodos rotativos

Essencialmente, a sondagem rotativa é um método de perfuração no qual uma broca, elemento que entra em contato direto com a rocha promovendo sua desagregação, é conectada a um sistema rotativo de modo a desgastar a rocha por esforços abrasivos (GAUTO *et al.*, 2016). Os métodos rotativos são mais indicados para perfurações em formações sedimentares e inconsolidadas, por garantirem maior eficiência em termos de taxa de penetração (ROP) (do inglês, *Rate of Penetration*) e menor taxa de desgaste das brocas em comparação com os demais métodos de perfuração (SILVA, 2017). Assim como os demais métodos, exigem fluxo constante de fluidos de perfuração para resfriar e lubrificar a broca, exercer pressão hidrostática e para transportar os fragmentos (cascalhos) para a superfície, e são recomendados para perfurações em grandes profundidades (de 400 m até milhares de metros como no caso do pré-sal) (CULVER, 1991; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). A Figura 6 ilustra uma sonda perfuratriz rotativa comumente empregada em explorações petrolíferas.

Figura 6 – Sonda de perfuração rotativa



Fonte: Dipippo (2012)

Como pode-se observar na Figura 6, em termos de composição, a sonda perfuratriz rotativa, assim como a máquina percussora, é composta por alguns elementos essenciais: sistema de sustentação, sistema de geração e transmissão de energia, sistema de movimentação de cargas e um sistema de circulação de fluidos. A estrutura de sustentação é composta por um mastro ou por uma torre e por uma base, tendo a função principal de garantir a sustentação geral da sonda, além de suportar deflexões, vibrações e deslocamentos. O sistema de geração e transmissão de energia é responsável por gerar energia e transmitir energia para a alimentação dos demais elementos da sonda como a bomba de lama, a mesa rotativa e o guincho. Os motores, que podem ser tanto elétricos quanto de combustão interna, são responsáveis pela geração de energia e a transmissão pode ocorrer tanto mecanicamente por meio de eixos e rodas, quanto por correntes elétricas através de conjuntos motores e geradores. O sistema de movimentação de carga é o sistema que permite a movimentação vertical da coluna de perfuração, do revestimento e dos equipamentos, sendo composto por um guincho (*draw work*), um bloco de coroamento (*crown block*), a catarina, cabos de aço e um gancho (*rotary hook*). O sistema de circulação, representado na Figura 6 pela bomba de lama e pelo tanque de lama, é responsável pela circulação de fluidos no poço e tratamento do fluido de perfuração, sendo usualmente composto por bombas e estações de tratamento.

Além desses elementos, é composta ainda por um sistema rotativo formado pela mesa rotativa e uma haste de conexão conhecida como *kelly*, por um elemento integrante do

sistema de circulação conhecido como *swivel*, e pela coluna de perfuração. No sistema rotativo, os motores são responsáveis por promover a rotação da mesa rotativa, a qual está conectada diretamente ao *kelly* que, por estar fixada ao restante da coluna de perfuração, transfere essa rotação para a coluna. Em alguns casos, a mesa rotativa e o *kelly* são substituídos por um cabeçote hidráulico conhecido como *top drive*, o qual fica suspenso pelo gancho, é conectado aos tubos de perfuração e, além de apresentar um motor em sua estrutura que promove a rotação da coluna de perfuração, permite a passagem de fluido de perfuração para o interior do poço (DAVIS, 1995). Já o *swivel*, conectado ao gancho logo abaixo da catarina, é integrante do sistema de circulação de fluidos e, além de impedir que a parte da sonda acima do gancho rotacione, permite a circulação de fluidos de perfuração para o interior da coluna (THOMAS, 2001). O sentido de circulação dos fluidos de perfuração pode ser variado, dando origem a diferentes métodos de perfuração rotativa, tais como métodos de circulação direta (fluido é injetado dentro da coluna de perfuração alcançando o poço por orifícios presentes na broca, e sai do poço através do espaço anular entre a parede do poço e a coluna de perfuração) e circulação reversa (fluido inserido pelo espaço anular e succionado para dentro da coluna de perfuração) (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Já a coluna de perfuração é composta por três tipos de estruturas: tubos de perfuração, que permitem a conexão do *kelly* com o restante da coluna; tubos pesados, que fazem uma transição de rigidez na coluna de modo a evitar falhas por fadiga; e os comandos que são tubulações rígidas, espessas e pesadas, sendo os principais responsáveis por garantir peso sobre a broca e garantir rigidez à coluna. A broca é inserida na coluna a partir de uma conexão com o comando, através de elementos de ligação conhecidos como *subs* (CAVALCANTI NETO, 2016).

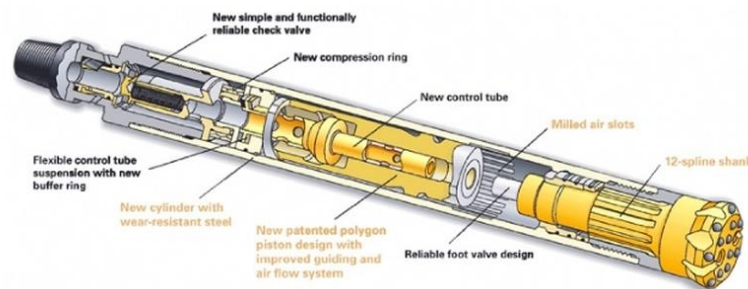
Ademais, apesar de não representado na Figura 6, o conjunto ainda conta com um sistema de segurança e monitoramento, que são responsáveis pela prevenção de acidentes e pelo controle do processo de perfuração, respectivamente (COSTA FILHO *et al.*, 1998, THOMAS, 2001).

2.4.3.1.3 Método rotopercussivo

O método rotopercussivo de perfuração envolve a combinação de uma percussão de alta frequência, promovido por um martelo pneumático de perfuração conhecido como martelo DTH, com o movimento rotativo da coluna de perfuração promovido pelo *top drive* (COSTA FILHO *et al.*, 1998; CULVER, 1991; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). O martelo

down the hole (DTH) é um componente posicionado entre a broca e a coluna de perfuração, e é acionado pelo ar comprimido, proveniente de compressores de elevada potência, que passa por dentro das hastes até alcançar o martelo, de modo a promover percussões de alta frequência que auxiliam na ruptura da rocha (FEITOSA *et al.*, 2008). A Figura 7 ilustra um martelo DTH comumente utilizado na perfuração rotopneumática.

Figura 7 – Imagem ilustrativa de um martelo DTH



Fonte: Gill Drilling Services (2020)

É importante mencionar que nos sistemas rotopercussivos, o próprio ar comprimido utilizado para acionamento do martelo DTH sai por dutos de ar presentes no corpo das brocas, sendo utilizado como fluido de perfuração em conjunto com alguns aditivos (SAPINSKA SLIWA *et al.*, 2015). Desse modo, além de estudos comprovarem o melhor desempenho de métodos rotopercussivos em formações cristalinas, consolidadas e de elevada dureza, o uso desse equipamento em solos mais macios com grãos mais refinados aumenta a probabilidade da ocorrência do entupimento dos dutos de ar e de travamento dos pistões que promovem o movimento de percussão (TEODORIU; CHEUFFA, 2011; SOULSBY, 2010).

2.4.3.2 Brocas

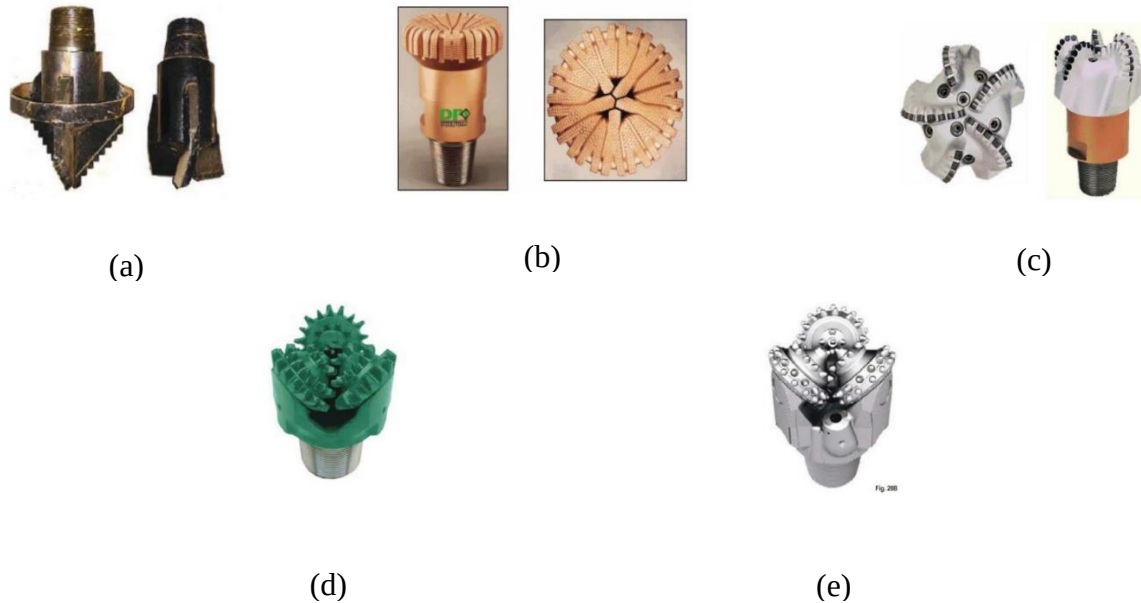
As brocas são as ferramentas posicionadas na extremidade da coluna de perfuração, de modo a entrarem em contato direto com a formação rochosa se tornando as responsáveis por promover a ruptura das rochas e permitir a passagem de fluido de perfuração para o fundo do poço (PEIXOTO, 2014). São empregadas nos métodos de perfuração rotativos e rotopneumáticos, que são os métodos mais empregados pela indústria, e apresentam três elementos principais: elementos cortantes, responsáveis pela ruptura da rocha; rolamentos (inexistentes em algumas brocas), que permitem a rotação do corpo visando um aumento na

eficiência da perfuração; e o corpo, que recebe os elementos cortantes e apresenta elemento de conexão com o resto da coluna, além de canais para a passagem de fluido (PROMINAS, 2015).

De modo geral, as brocas são divididas em dois grandes grupos: as brocas sem partes móveis e as brocas com partes móveis. As brocas sem partes móveis, além de não apresentarem nenhum elemento móvel, não apresentam rolamentos, o que reduz a probabilidade de falha do conjunto, embora envolva um desgaste acelerado dos elementos cortantes. Os principais tipos de brocas sem partes móveis são as brocas de lâmina de aço, que são empregadas em situações especiais em função do seu elevado desgaste e baixa eficiência, as brocas de diamante natural, que rompem a rocha por esmerilhamento além de apresentarem elevada resistência à abrasão, e as brocas de diamante sintético (*polycrystalline diamond compacts* - PDC ou *thermally stable polycrystalline* - TSP), que são formadas por pastilhas de carbetto de tungstênio revestidas por diamantes sintéticos aglutinados com cobalto montadas sobre bases cilíndricas que são instaladas no corpo da broca (BARBOSA, 2019; MA; CHEN; ZHAO, 2016; THOMAS, 2001).

As brocas com partes móveis apresentam de 1 a 4 corpos rolantes compostos por corpo, rolamento e insertos, sendo que a broca mais comumente empregada é a de 3 corpos (trícônica). Os corpos, ou cones, rotacionam em torno do seu próprio eixo por conta da presença dos rolamentos, e apresentam em sua estrutura, fileiras de estruturas cortantes que se interpoem umas as outras. As estruturas cortantes podem ser dentes de aço, os quais são fresados no próprio corpo da broca, ou insertos de carbetto de tungstênio que são posicionados por um processo de interferência em orifícios presentes nos cones da broca (THOMAS, 2001). Quanto aos rolamentos mais utilizados existem os roletes ou esferas não seladas, que não possuem sistema próprio de lubrificação, roletes ou esferas seladas, que possuem sistema próprio de lubrificação e não entram em contato com o fluido de perfuração e mancais de fricção do tipo *journal*, compostos por metais nobres e com dispositivo interno de lubrificação (THOMAS, 2001). Cada um dos tipos de broca está ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Tipos de broca: (a) broca de lâmina de aço; (b) broca de diamante natural; (c) broca de diamante sintético; (d) broca tricônica de dentes de aço; (e) broca tricônica com insertos de carbeto de tungstênio



Fonte: Silva (2017); Prominas (2015)

A seleção das brocas é feita principalmente de acordo com o perfil geológico da formação e com as dimensões planejadas para o poço. O processo de seleção das brocas deve ser executado da melhor maneira possível, visando não apenas garantir uma elevada ROP, mas também visando aumentar a vida útil da broca, uma vez que o processo de troca das brocas é um procedimento complexo que pode demandar um certo tempo para ser executado. Desse modo, a eficiência do processo de perfuração passa diretamente pela seleção do tipo adequado de broca para a perfuração (PEIXOTO, 2014).

2.4.3.3 Fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são fluidos bombeados para o interior do poço durante o processo de perfuração para remover cascalhos que surgem com o processo de perfuração, refrigerar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração e prevenir o colapso da parede do poço (DIPIPO, 2012). Além disso, os fluidos de perfuração ainda apresentam algumas funções adicionais como minimizar a penetração de fluidos para o interior do poço, evitar problemas de contaminação, reduzir a corrosão da coluna de perfuração, deixar detritos em

suspensão durante períodos de não circulação, auxiliar na coleta de amostras e controlar a pressão da formação (CULVER, 1991; NGUGI, 2008).

Para que os fluidos sejam bombeados para o interior do poço e exerçam suas funções da melhor forma, é sempre necessário que haja um sistema de circulação que inclui o fluido, as chamadas bombas de lama e os equipamentos de limpeza desse fluido (FINGER; BLANKENSHIP, 2010). Desse modo, após circular no poço, o fluido passa por equipamentos com peneira vibratória, desaerador, dessiltador, *mud cleaner* e centrífugas, que captam partículas carregadas pelo fluido para depois eliminá-las, mantendo o fluido armazenado em um tanque, onde, por vezes, passa por um processo de resfriamento para depois ser injetado novamente no poço através da bomba (DIPIPO, 2012).

Em termos de composição, os fluidos são compostos por um elemento base e alguns aditivos que garantem algumas propriedades específicas para cada aplicação. Quanto sua composição principal, eles são classificados em fluidos à base de água, fluidos à base de ar e fluidos à base de óleo, sendo que cada um desses são empregados em situações específicas. Os aditivos misturados com o fluido principal apresentam como função principal a promoção de alterações de algumas propriedades dos fluidos base de modo que eles possam exercer sua função como fluido de perfuração da melhor forma, podendo ser de diferentes tipos, sendo que os principais são argilas e polímeros. Algumas das propriedades dos fluidos que mais interferem na sua atuação como fluido de perfuração são a viscosidade, essencial para remover dejetos do interior do poço e mantê-los em suspensão quando a circulação é cessada; a densidade, que é essencial para exercer pressão no fundo do poço evitando perda de circulação e auxiliando na sustentação; e o pH, que deve ser consideravelmente alto para evitar problemas relacionados a corrosão (FINGER; BLANKENSHIP, 2010).

2.4.4 Revestimento

O revestimento é uma sequência de tubos instalados no comprimento perfurado de modo a constituir a parede do poço. São posicionados logo após a perfuração de uma dada seção do poço, podem apresentar diferentes configurações ao longo do comprimento perfurado e sofrem dois principais tipos de esforços: tração, devido ao peso da coluna, e pressão de colapso (FEITOSA *et al.*, 2008; THOMAS, 2001).

Segundo Finger e Blankeship (2010), são três os principais parâmetros para a seleção dos revestimentos: material, peso e diâmetro. A seleção do material de composição do

revestimento, além de estar relacionada com aspectos físicos de resistência dos materiais, como a resistência a tração, a resistência ao colapso, a resistência mecânica, dentre outros fatores, é influenciada também por aspectos químicos relacionados à composição dos recursos extraídos do poço, os quais podem comprometer integridade física do revestimento através da corrosão e outras reações químicas (CULVER, 1991). O peso é influenciado diretamente pelo material selecionado e tem papel fundamental na sustentação da estrutura do poço. Já o dimensionamento do revestimento é feito levando em consideração aspectos ligados à resistência mecânica, a produtividade do poço, a profundidade da zona de produção, a temperatura esperada, o tipo de completação a ser realizado, e ainda precisa levar em consideração as dimensões do equipamento de bombeamento, de modo a permitir a extração do recurso (CULVER, 1991; FINGER; BLANKENSHIP, 2010).

Segundo Santos, Monteiro e Guimarães (2016), as principais funções dos revestimentos são: prevenir o desmoronamento das paredes do poço, dando sustentação e evitando o colapso; evitar a contaminação da água potável nas proximidades da superfície; permitir o retorno do fluido para a superfície; impedir a migração de fluidos das formações para o interior do poço; sustentar equipamentos de segurança localizados na cabeça do poço; sustentar outra coluna de revestimento em alguns casos; alojar equipamentos de elevação artificial (bombas); confinar a produção ao interior do poço; e prevenir o resfriamento do recurso em alguns casos. Para isso é necessário que o revestimento seja capaz de suportar desgastes, corrosão e atrito em função da fricção e da vibração (GUPTA; ROY, 2006).

2.4.5 Cimentação

A cimentação consiste no bombeamento de uma pasta de cimento com água e aditivos pelo interior do poço de modo que essa pasta preencha o espaço anular entre o revestimento e a formação rochosa perfurada, para isolar o poço e garantir sua sustentação (SOUZA; VELOSO, 2017). Existem dois tipos principais de cimentação: a cimentação primária e a cimentação secundária. A cimentação primária é realizada logo após a descida do revestimento no comprimento perfurado e é considerada como a principal, ou seja, a responsável por alocar a pasta de cimento em uma posição do espaço anular. Dentre as principais funções da cimentação pode-se mencionar o isolamento entre do poço e as formações, garantir rigidez estrutural, impedir desmoronamento da formação, proteger aquíferos e zonas de água doce, além de proteger a coluna de revestimento de fluidos corrosivos (MALOUF, 2013). A cimentação secundária tem a principal função de corrigir a

cimentação primária para tamponar as zonas permeáveis, identificadas por perfis acústicos corridos por dentro do revestimento (ROCHA; ALENCAR; BARROS, 2017; THOMAS, 2001). A cimentação secundária pode ser feita através do *squeeze* do cimento, que seria a injeção forçada do cimento sob pressão para corrigir localmente a cimentação primária, através do tampão de cimento, mais usado para isolar zonas inferiores, e através da recimentação (SOUZA; VELOSO, 2017).

Os cimentos empregados na cimentação são produzidos a partir de uma mistura de calcário e argila que contém alguns aditivos, a depender das condições em que será empregado, como sulfato de cálcio na forma de gesso. O cimento Portland é o mais comum de ser empregado em diferentes tipos de poços perfurados, sendo compostos, além dos componentes originais, por cal, sílica, alumina e óxido de ferro, gerando elementos químicos como aluminato tricálcico, ferro-aluminato tetra-cálcico, silicato tricálcico e silicato dicálcico, os quais garantem suas principais características. Por envolver proporções diferentes desses componentes em algumas ocasiões, o cimento Portland utilizado para poços petrolíferos foi classificado pela API em classes de A a J com base em sua composição química e nas características que apresenta (THOMAS, 2001). Por conta dessas diferentes características, diferentes classes de cimento podem ser empregadas em diferentes tipos de poços perfurados. O Quadro 1 descreve as características de cada uma das classes API de cimento Portland.

Quadro 1 – Classes API de cimento Portland

<i>Classe</i>	<i>Características</i>
A	Utilizada em superfícies até 1830 m e não tem propriedades específicas
B	Utilizada em superfície até uma profundidade de 1830m e tem elevada resistência ao sulfato
C	Utilizada da superfície até uma profundidade de até 1830m possibilitando pega rápida e grande resistência compressiva
D	Utilizada entre 1830m e 3050m sobre condições moderadas de temperaturas e altas pressões, além de apresentar boa resistência ao sulfato
E	Utilizada entre 3050m e 4270m e em poços de elevada temperatura e pressão
F	Utilizada entre 4270m e 4880m em condições extremas de temperatura e pressão, além de apresentar alta resistência a sulfatos.
G e H	até 2440m usados com aditivos, aceleradores ou retardadores podendo ser empregadas em quaisquer condições mencionadas acima
J	Profundidades entre 3669m e 4880m sendo utilizadas em condições de temperatura e pressão extremamente elevadas

Fonte: Adaptado de Thomas (2001)

Para outras aplicações, há uma classificação reconhecida pela ABNT que separa os cimentos Portland em 8 tipos diferentes com base em sua composição percentual e, consequentemente, com base em suas propriedades.

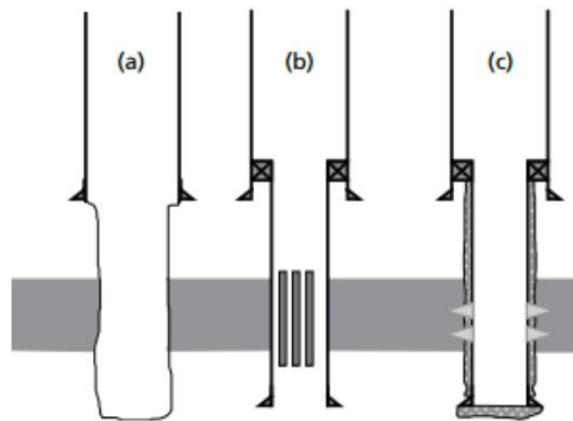
2.4.6 Completação

Após a realização da cimentação, são executados alguns testes de perfilagem, tais como potencial espontâneo, raios gama, neutrônico, indução, sônico e de densidade, para verificar se o poço apresenta boas condições para ser explorado, ou se deve ser realizado o procedimento de abandono (SILVA, 2017). Se o poço se apresentar como disponível para exploração, é necessária a realização do procedimento de completação. Segundo Cavalcante (2016), a completação consiste no processo realizado para deixar o poço em condições de operar seguramente durante toda sua vida produtiva, ou seja, consiste em equipar o poço para deixá-lo em condições de produção de modo a promover a conexão entre a formação e o interior do poço, permitindo a entrada de fluidos de maneira controlada.

A completação pode ser classificada de acordo com o revestimento de produção em: completação a poço aberto, completação com *liner* rasgado ou canhoneado e completação com revestimento canhoneado. A completação a poço aberto consiste na produção com a zona produtora totalmente aberta, sem nenhum tipo de revestimento para regular a entrada de recursos para o interior do poço. Nesse tipo de completação, o revestimento de produção não alcança a zona produtora, de modo que a perfuração prossegue pela zona produtora sem a realização de revestimento. A completação com *liner* rasgado ou canhoneado consiste no posicionamento de um *liner*, que é uma espécie de tubulação de diâmetro inferior ao do revestimento de produção, na zona de produção, de modo que o acesso do fluido ao interior do poço depende diretamente dele. O *liner* pode apresentar rasgos em sua extensão antes de ser posicionado na zona produtora (completação com *liner* rasgado), funcionando como um filtro, ou pode ter seu espaço anular cimentado e, posteriormente, passar por um processo de canhoneamento (perfuração da estrutura por meio de cargas explosivas). A completação com revestimento canhoneado consiste na perfuração do poço por completo, atravessando a zona produtora, e a descida do próprio revestimento de produção até o fundo do poço, sendo o espaço anular entre este e a formação posteriormente cimentado. Através de cargas explosivas, o revestimento e a camada de cimento que o envolve são canhoneados, isto é, perfurados nos intervalos de interesse,

colocando o reservatório em contato com o interior do poço (THOMAS, 2001). A Figura 9 ilustra a estrutura de cada um desses tipos de completação.

Figura 9 – Tipos de completação: (a) Completção a poço aberto; (b) Completção com liner rasgado; (c) Completção com revestimento canhoneado



Fonte: Thomas (2001)

É válido ressaltar que o procedimento de completação não se limita apenas à realização da conexão do interior do poço com a formação que está sendo explorada. Os procedimentos mais complexos de completação envolvem ainda procedimentos como: instalação de equipamentos de superfície, os quais permitem a instalação de equipamentos de segurança e de equipamentos que permitem a extração dos recursos; condicionamento do poço, para retirar resquícios da cimentação e inserir o fluido de completação; avaliação da qualidade da cimentação primária; canhoneio do revestimento ou do *liner*, caso sejam esses os tipos de completação selecionados; e a instalação da coluna de produção acima da zona de interesse, que consiste em um conjunto de tubos metálicos descidos pelo interior do revestimento com a função de conduzir fluidos produzidos para a superfície, permitir a instalação de equipamentos para a elevação artificial e permitir a circulação de fluidos (SILVA, 2016). Além disso, em algumas situações, é necessária a instalação de equipamentos de controle da produção compostos por um conjunto de válvulas (BAKER, 1979).

2.4.7 Sistemas de elevação

A extração dos recursos do fundo do poço e condução para a superfície pode se dar através de duas formas: naturalmente ou artificialmente (KAYA; MERTOGLU, 2005). Nos

casos em que a pressão no reservatório é suficientemente elevada a ponto de vencer os diferenciais de pressão existentes ao longo da coluna até alcançar a superfície, a elevação do recurso é dita como natural. No entanto, quando a pressão no reservatório não é suficiente para vencer a pressão no poço e os diferenciais de pressão ao longo da coluna, são necessários equipamentos ou métodos de suplementação de energia para que a elevação até a superfície se torne possível. Tais métodos são conhecidos como métodos de elevação artificial (FREITAS; SOUZA, 2021).

Dentre as diversas técnicas e operações existentes para tornar a taxa de produção do poço viável economicamente, as mais difundidas na exploração de recursos naturais subterrâneos são as técnicas de bombeamento. Tais técnicas fazem uso de diferentes tipos de sistemas de bombeamento, os quais transformam movimentos rotativos de um motor, seja ele elétrico ou de combustão interna, em energia para a movimentação do fluido, de modo a aumentar a pressão disponível para a elevação do fluido (SENAI CIMATEC, 2021). Os sistemas de bombeamento utilizados podem variar de acordo com os recursos que estão sendo extraídos, as condições encontradas nos reservatórios e a profundidade perfurada, sendo necessário, em alguns casos, a realização de testes de bombeamento para verificar a performance do poço e quantificar propriedades dos reservatórios (SOULSBY, 2010).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho foi dividida em duas partes: métodos para a realização da análise comparativa das técnicas de perfuração e métodos para a realização da análise comparativa de custos dos processos exploratórios.

3.1 MÉTODOS PARA A ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO

Para a realização da análise comparativa das técnicas de perfuração, foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada primeiramente acerca das características particulares de cada um dos recursos, levando em consideração aspectos como composição química e física dos recursos, processo de formação no meio ambiente, características das regiões de armazenamento e meios de exploração de cada um dos recursos.

Em seguida, com base nas informações coletadas a partir da análise das características particulares de cada um dos recursos e de informações coletadas a partir da revisão de fontes bibliográficas relacionadas diretamente ao processo de perfuração e extração de cada um destes, buscou-se não apenas traçar comparações acerca das particularidades de cada um dos processos, mas também explicações acerca de tais particularidades fundamentadas na natureza química e física dos recursos e nas características geológicas dos locais onde são armazenados. Dentre os principais aspectos relacionados à perfuração, foi dado um enfoque em aspectos como os métodos de estudo da geologia, design e estruturação dos poços, os métodos de perfuração mais empregados, a estrutura de perfuração utilizada, os tipos de brocas mais empregados, as características dos fluidos de perfuração, os materiais do revestimento, funções específicas da cimentação, completação e os métodos de elevação.

Dentre as fontes consultadas para a realização do trabalho estão inclusos livros, artigos publicados em revistas, trabalhos acadêmicos relacionados tanto a composição e propriedades dos recursos, quanto às particularidades dos processos de extração, além de bases de dados, pesquisas, levantamentos e manuais de perfuração. Também foram coletadas informações cedidas em palestras ministradas em eventos e em aulas disponíveis em plataformas digitais.

3.2 MÉTODOS PARA A ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS

Para a realização da análise de custos, em virtude da dificuldade existente na coleta de dados referentes a custos de perfuração de poços para a exploração de certos recursos, foi necessário recorrer a modelos matemáticos existentes na literatura.

No caso dos custos de poços perfurados para a extração de água, a ideia inicial era a realização da coleta de dados a partir do contato com uma empresa especializada na área de perfuração de poços tubulares profundos. Seriam solicitadas informações como a cidade, o bairro, o ano em que o poço foi perfurado, o diâmetro do poço, a profundidade do poço, a taxa de penetração média, a vazão nominal, custos de estudo da geologia, custo de instalação das estruturas de perfuração (preparação do local, transporte dos equipamentos e montagem da estrutura), custos de revestimento, cimentação e completação, custo de instalação do sistema hidráulico (quadro elétrico, tubulação e bomba) e custos adicionais de 16 poços perfurados em diferentes locais. No entanto, como não foi possível realizar o contato com a empresa, tal análise foi descartada.

Para a análise de custos de perfuração de poços geotérmicos e petrolíferos, foram buscadas informações estruturais de poços em bases de dados disponíveis para acesso na *internet* e, a partir destas, foram selecionados 16 poços perfurados para a extração de petróleo e gás natural e 16 poços perfurados para a extração de energia geotérmica. A partir de estudos realizados por Lukawski *et al.* (2014), onde foram desenvolvidos experimentalmente modelos matemáticos que fornecem uma previsão média de custos de perfuração e completação de poços, foram obtidas equações capazes de estimar custos da construção de poços de produção com base em sua profundidade. Para estimar os custos de perfuração e completação de poços para a exploração de petróleo e gás, os autores desenvolveram a equação (1):

$$CTOG = 1,65 \times 10^{-5} \times (PM)^{1,607} \quad (1)$$

Onde, CTOG se refere ao custo total do poço em milhões de dólares americanos e PM se refere à profundidade medida em metros. Já para estimar os custos de perfuração e completação de poços para a exploração de energia geotérmica, os autores desenvolveram a equação (2):

$$CTG = 1,72 \times 10^{-7} \times (PM)^2 + 2,3 \times 10^{-3} \times PM - 0,62 \quad (2)$$

Onde, CTG se refere ao custo total para a construção do poço em milhões de dólares

americanos e PM a profundidade medida em metros.

As equações matemáticas explicitadas pelas equações (1) e (2) foram desenvolvidas para custos referentes ao ano de 2009. Portanto, para poços perfurados em anos anteriores, foi necessário utilizar um índice de custo que permitisse uma atualização desses valores para o ano de 2009. No presente trabalho, o índice utilizado foi o *Cornell Energy Institute Index* (CEI Index), o qual é válido apenas para poços petrolíferos, de modo, que para os poços geotérmicos, por conta da inexistência de um índice de custo apropriado, não foram feitas correções.

É válido ressaltar também que esse método, por falta de dados disponíveis, não leva em consideração fatores relacionados à complexidade da perfuração em função das formações rochosas, apenas a profundidade perfurada. Ademais, é necessário mencionar que a análise se limitou a poços verticais, *onshore* e de produção, pois, levando em consideração os três recursos estudados, são os poços mais comumente encontrados.

4 ANÁLISES COMPARATIVAS

4.1 COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS RECURSOS

Após o estudo das características individuais da água subterrânea, da energia geotérmica, do petróleo e do gás natural, foi confeccionado o Quadro 2, que tem o intuito de servir como base para a comparação das propriedades.

Quadro 2 – Estudo comparativo de propriedades

	Água Subterrânea	Geotermia	Petróleo e Gás
Composição	Moléculas de H ₂ O com solutos orgânicos ou inorgânicos dissolvidos	Energia na forma de calor. Líquido geotérmico com mesma composição da água subterrânea, elevada concentração de sal e de sulfeto	Cadeias de hidrocarbonetos com compostos oxigenados, hydrogenados, sulfurados e outros componentes associados
Formação	Meteórica, conata ou juvenil, armazenando-se em camadas rochosas do subsolo	Fluxo de calor, proveniente do núcleo, pelas camadas da terra	Degradação de matéria orgânica por bactérias anaeróbias
Armazenamento	Aquíferos, aquífugos, aquícludes e aquítardeas	Reservatórios geotérmicos formados por fonte de calor, rochas permeáveis e líquido	Jazidas, formadas por rocha geradora, rocha reservatório e rocha selante, localizadas em bacias sedimentares
Meios de exploração	Perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes	Exploração de gêiseres e <i>hot springs</i> , ou perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes	Perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.1 Composição

As águas subterrâneas são consideradas como a parcela da hidrosfera que ocorre abaixo da superfície terrestre, podendo ser armazenadas em elevadas profundidades (BOVOLATO, 2007). Por conta de circularem em regiões do subsolo e apresentarem uma natureza polar, o que as torna excelentes solventes para moléculas iônicas e polares, naturalmente apresentam certas moléculas e íons dissolvidos em sua estrutura. Os solutos dissolvidos na água subterrânea podem ser classificados como naturais, que são os

presentes na estrutura da água subterrânea sem qualquer influência de atividades humanas, ou como não naturais, que são os introduzidos por atividades humanas. Dentro do grupo dos naturais há uma subdivisão em solutos orgânicos, que possuem uma estrutura de átomos de carbono unidos entre si e com outros elementos químicos, e inorgânicos, representados pelos sólidos totais dissolvidos e pelos íons. Dentre os solutos inorgânicos mais comuns estão o cálcio, magnésio, sódio, bicarbonato, cloreto, sulfato dentre outros, sendo que sua concentração irá depender diretamente do local onde a água está armazenada. Já os compostos orgânicos, presentes em baixas concentrações nas águas subterrâneas, são representados por substâncias húmicas, que consistem em moléculas originadas da degradação microbiológica da matéria orgânica, como por exemplo os ácidos húmicos (FITTS, 2015).

A energia geotérmica, segundo o próprio nome já indica, é classificada como calor proveniente do núcleo da terra, que é irradiado e conduzido para as camadas mais superficiais da terra por processos de transferência de calor (FITTS, 2015; ZOET *et al.*, 2011). Desse modo, para que possa ser explorada, é essencial a existência de fluidos circulantes no subsolo ou de fluidos injetados no subsolo, os quais são aquecidos ou vaporizados e, em seguida, extraídos para serem aproveitados. Embora a geotermia em si deva ser tratada como energia na forma de calor, os líquidos que permitem a exploração dessa energia são os que influenciam mais diretamente no processo de perfuração. De forma generalizada, a composição dos líquidos geotérmicos é a mesma da água subterrânea. Porém, por conta de seu armazenamento, apresentam elevada concentração salina, elevada concentração de sulfeto e elevada concentração de moléculas de carbono, o que confere a estes um caráter corrosivo que deve ser considerado.

O petróleo e o gás natural, de acordo com a ASTM (2011), são definidos como misturas de ocorrência natural composta principalmente por hidrocarbonetos associados a derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e outros elementos. O petróleo, além de ser classificado com base no tipo de hidrocarboneto predominante em sua estrutura (parafina, nafteno ou compostos aromáticos), apresenta em sua estrutura traços de componentes como o enxofre, nitrogênio, oxigênio, alguns sais e metais (ferro, níquel e vanádio). De modo geral, apresentam uma densidade menor que a da água, sendo essa densidade expressa através de uma relação entre óleo e água conhecida como °API, e uma viscosidade maior além de serem imiscíveis em água (SELLEY; SONNENBERG, 2016). A Tabela 1 mostra a composição percentual do petróleo em seu estado mais comumente encontrado.

Tabela 1 – Composição percentual do petróleo

Elemento	Porcentagem mássica (%)
Carbono	83,0 a 87,0
Hidrogênio	10,0 a 14,0
Enxofre	0,05 a 6,0
Nitrogênio	0,1 a 2,0
Oxigênio	0,05 a 1,5
Metais (Fe, Ni, V, etc.)	< 0,3

Fonte: Adaptado de Speight (2001)

Já o gás natural, apesar de ser usualmente apresentado juntamente do petróleo por serem compostos de mesma natureza, pode apresentar uma composição um pouco diferente. São compostos principalmente por hidrocarbonetos da família das parafinas, tais como o metano, butano, etano e propano. Os outros gases que compõem a estrutura dos gases naturais são o hélio, o argônio, radônio, hidrogênio, dióxido de carbono e gás sulfídrico. Em termos de propriedades, é quimicamente não reativo, moderadamente solúvel em água e é mais leve que o ar, podendo ser seco ou úmido, a depender da presença de vapor líquido na sua composição, e básico ou ácido, a depender da presença ou ausência de gás sulfídrico (SELLEY; SONNENBERG, 2016).

4.1.2 Formação

“As águas subterrâneas representam a parcela da hidrosfera que ocorre na subsuperfície da Terra. Elas têm três origens principais: meteórica, conata e juvenil.” (BOVOLATO, 2007, p. 26). A origem meteórica se refere à infiltração das águas que precipitam naturalmente na forma de chuva, neve ou neblina, como etapa do ciclo hidrológico natural. As águas de origem conata são as águas presentes em sedimentos desde a formação dos depósitos, sendo caracterizadas como águas de formação. Já as águas de origem juvenil, são geradas a partir de processos magmáticos, integrando o mecanismo de circulação de água que ocorre no interior da terra (FETTER, 1988). Embora existam esses três mecanismos de formação das águas subterrâneas, o ciclo hidrológico, definido por Carvalho e Silva (2006, p. 11) como “fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre”, é o principal responsável pela recarga de água no subsolo, sendo essencial para que ela esteja disponível para exploração e uso por parte

da população. Outro fator importante de ser mencionado é que o processo de formação em si não é o principal responsável pela determinação da composição química final das águas subterrâneas, mas sim o solo em que são formadas ou armazenadas e as atividades humanas desenvolvidas nesses locais.

Já a energia geotérmica, como mencionado anteriormente, é proveniente do calor presente no núcleo da terra, o qual, através de mecanismos de transferência de calor, alcança águas subterrâneas armazenadas em reservatórios próximos à superfície, de modo a aumentar sua temperatura e, por vezes, provocar uma alteração em seu estado físico (ANJOS, 2018; BLODGETT; SLACK, 2009). No entanto, apesar de estar disponível em todas as regiões do mundo independente das condições climáticas, a formação de recursos de elevado conteúdo energético, que possibilita a produção de energia elétrica, depende das condições geológicas e geográficas da região. Segundo Assumpção e Neto (2000), a terra é formada por um conjunto de placas tectônicas que mantêm a superfície isolada da parte interior composta por magma e rochas derretidas. No entanto, por conta do movimento da crosta terrestre, nas regiões localizadas sobre bordas de placas tectônicas e em regiões vulcânicas ocorre o fenômeno das intrusões magmáticas (penetração direta do magma para camadas superficiais), as quais aumentam consideravelmente o fluxo natural de calor em regiões mais próximas da superfície e aumentam o conteúdo energético da região. Portanto, quanto mais próximo de regiões de transição de placas tectônicas e de regiões vulcânicas, maior será o potencial geotérmico do local analisado (CONFESSOR *et al.*, 2020).

O petróleo e o gás natural, por sua vez, têm sua origem estudada por diversos cientistas ao redor do mundo. A teoria mais aceita afirma que o petróleo e o gás natural se formaram a partir da degradação de matéria orgânica, representada por restos de animais e vegetais, microfauna, plânctons e outras substâncias orgânicas, depositada junto a sedimentos de baixa permeabilidade, realizada pela ação degradante de microbactérias anaeróbias presentes nessas regiões (FARAH, 2013). Considerando o processo como um todo, os detritos orgânicos se transformam em compostos químicos por meio da ação de bactérias anaeróbias associada com a temperatura e pressão das camadas rochosas, dando origem ao querogênio em um processo conhecido como diagênese. Esses compostos continuam sofrendo ação das bactérias anaeróbias, dando origem a um composto de consistência pastosa. Através de reações termoquímicas que dependem da elevação da temperatura e pressão na rocha geradora e da presença de minerais que fazem a catalisação da reação, esse composto, formado por uma cadeia de hidrocarbonetos, se torna óleo condensado e gás úmido, em uma etapa conhecida como catagênese. A metagênese, etapa

final do processo, seria a transformação do composto em gás seco e resíduos carbonosos (GARCIA BAUTISTA, 2008; GAUTO *et al.*, 2016; PGT, 2010). O gás e o líquido gerados no processo migram das rochas sedimentares onde foram formadas, conhecidas como rochas geradoras, para camadas superiores do solo devido às forças geológicas existentes, até encontrarem camadas rochosas impermeáveis, conhecidas como rochas reservatório. Essas são responsáveis por armazenar o petróleo na região e impedir sua saída para a superfície (FARAH, 2013).

4.1.3 Armazenamento

As águas subterrâneas, ao penetrarem camadas rochosas que compõem o solo, ficam, na grande maioria das vezes, armazenadas em aquíferos. Os aquíferos, segundo Iritani e Ezaki (2008, p. 19), são “formações geológicas permeáveis capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos”. Levando em consideração a porosidade das rochas armazenadoras, os aquíferos podem ser classificados em: granulares, que são representados por rochas sedimentares e inconsolidadas, onde a água flui e fica armazenada entre os grãos minerais existentes; fissurais, formados por rochas maciças e compactas que não apresentam espaços vazios entre minerais, de modo que a água fica armazenada em fraturas ou fissuras; e cársticos, formados por rochas carbonáticas que se dissolvem quanto em contato com águas subterrâneas contendo elevado teor de dióxido de carbono, de modo a formar canais e cavidades por onde a água flui (IRITANI; EZAKI, 2008). Segundo Bovolato (2007), algumas unidades rochosas que compõem aquíferos são areias inconsolidadas, arenitos, calcários, dolomitos, basaltos, rochas metamórficas fraturadas, dentre outras, demonstrando que os locais de armazenamento das águas subterrâneas podem apresentar composição extremamente variada.

Além dos aquíferos, as águas subterrâneas também podem ser armazenadas em formações que não apresentam permeabilidade suficiente para transmitir água, de modo a serem muito difícil de serem exploradas. Dentre elas vale mencionar os aquitardes, que são camadas de baixa permeabilidade que podem armazenar água subterrânea ou transmitir para aquíferos adjacentes, os aquícludes, que apresentam baixa permeabilidade, mas participam do fluxo de água subterrânea de certa maneira, e os aquífugos, que são impermeáveis e não transmitem nenhuma quantidade de água (FETTER, 1988). Por conta da baixa permeabilidade dessas formações, a exploração de água subterrânea nelas

armazenada não é economicamente favorável, de modo que o foco das explorações são os aquíferos.

Para a existência de um reservatório geotérmico, três elementos são fundamentais: fonte de calor, permeabilidade e água disponível. A água precipitada naturalmente como parte do ciclo hidrológico, ou inserida através de poços de injeção, atinge camadas mais profundas do subsolo através da permeabilidade deste, de modo a ficar armazenada em poros de certas rochas. O calor naturalmente gerado no núcleo da terra aquece a água armazenada em rochas fazendo com que ela se mantenha na forma de água aquecida ou na forma de vapor. Esse recurso aquecido fica preso nessas rochas por camadas rochosas impermeáveis que a envolvem, dando origem aos reservatórios geotérmicos (BLODGETT; SLACK, 2009). Por estarem, na grande maioria das vezes, associados a regiões vulcânicas, onde as fontes de calor natural apresentam maior conteúdo energético, os reservatórios geotérmicos são formados por rochas magmáticas de elevada dureza, abrasivas, consolidadas e com elevada quantidade de fraturas, além de manterem os recursos sempre em elevada temperatura e pressão. Dois exemplos de rochas encontradas em reservatórios geotérmicos são granito e basalto (PURBA *et al.*, 2022).

Já o petróleo e o gás natural são expulsos da rocha geradora por diferença de pressão e encontram regiões impermeáveis onde são retidos (rochas reservatório). Os locais de armazenamento do petróleo e do gás são em bacias sedimentares, definidas como depressões do terreno onde se formam as rochas sedimentares, formadas a partir de fenômenos como intemperismo, erosão e transporte de fragmentos extraídos de outras rochas (MENDES *et al.*, 2016). Ali, rochas sedimentares, como as siliclásticas, as evaporíticas e as carbonáticas, se depositam ao longo dos anos e armazenam petróleo e gás natural em seus poros (GAUTO *et al.*, 2016). As formações sedimentares geralmente apresentam grande permeabilidade, estrutura granular e podem ser tanto não consolidadas quanto consolidadas. Alguns exemplos de rochas que compõem bacias sedimentares são calcários, arenitos, siltitos, dentre outros (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Vale mencionar que o gás natural pode ser encontrado acompanhado do petróleo em alguns reservatórios, mas também praticamente sem petróleo associado, dando origem aos reservatórios naturais (TEIXIERA, 2015).

4.1.4 Meios de exploração

Embora existam evidentes diferenças em termos de composição química, formação e

em alguns aspectos do armazenamento, tanto a água subterrânea quanto a energia geotérmica, o petróleo e o gás natural são recursos que apresentam uma característica em comum: todos podem ser encontrados no subsolo. Com exceção de alguns reservatórios geotérmicos que associam elevado potencial geotérmico e elevada pressão com escassez de rochas impermeáveis para retenção do recurso, originando erupções de vapor e água quente para a superfície (gêiseres e *hot springs*), o acesso aos recursos estudados para aproveitamento nos mais diversos setores da sociedade depende da perfuração de poços para que possa ocorrer.

Por serem recursos que naturalmente apresentam diferenças como foi observado, os processos de perfuração de poços e de extração dos recursos, embora apresentem uma mesma lógica sequencial ilustrada pela Figura 4, apresentam algumas particularidades técnicas de modo a se adaptarem ao tipo de solo perfurado e ao recurso extraído. Tais particularidades se referem não apenas as técnicas de perfuração utilizadas, mas também nos equipamentos empregados na perfuração, nos materiais empregados no revestimento e cimentação, nos fluidos de perfuração mais indicados, nos tipos de broca que devem ser empregados, no processo de completação selecionado, dentre outros fatores. Desse modo, torna-se essencial a realização de uma comparação técnica dos processos que permita identificar as técnicas e os materiais mais recomendados de serem empregados em cada situação, e de modo a possibilitar o surgimento de soluções e ideias para melhoria na eficiência dos processos.

4.2 COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO E EXTRAÇÃO

Após o estudo das técnicas de perfuração de poços e extração de cada um dos elementos analisados, foram observadas algumas particularidades que estão diretamente associadas às propriedades e características evidenciadas no Quadro 2. O Quadro 3 aponta as características de cada um dos processos de perfuração, dos materiais e compostos químicos empregados nas diferentes etapas, e do procedimento de extração dos recursos, que serão posteriormente associadas às características estudadas no item 4.1.

Quadro 3 – Estudo comparativo da perfuração de poços e extração dos recursos

	Água Subterrânea	Geotermia	Petróleo e Gás
Estudo da geologia	Estudo geológico: Poços pioneiros, aerofotogrametria, fotogeologia, mapas topográficos Estudo geofísico: perfilagem geofísica (raios gama, elétricos, potencial espontâneo, indução, sônico, cáliper, desvio do poço)	Estudo geológico: Poços pioneiros, aerofotogrametria, fotogeologia, mapas topográficos Estudo geofísico: testes magnéticos, gravitacionais, sísmicos, sensoriamento remoto e perfilagem (análise térmica, potencial espontâneo, elétricos)	Estudo geológico: Poços pioneiros, aerofotogrametria, fotogeologia, mapas topográficos Estudo geofísico: testes, magnéticos, gravitacionais, sísmicos e perfilagem (potencial espontâneo, raios gama, neutrônico, indução, sônico e avaliação por densidade)
Estruturação do poço	Câmara de bombeamento e zona filtrante ou composto por uma única coluna	<i>Casing strings</i> - Seccionado em partes com diâmetros diferentes (reduzidos com aumento da profundidade)	<i>Casing strings</i> - Seccionado em partes com diâmetros diferentes (reduzidos com aumento da profundidade)
Profundidades mais comuns	Usualmente de dezenas a centenas de metros (até 1,5/2 km no máximo)	Centenas de metros (uso direto e para controle térmico) a milhares de metros (para produção de energia), chegando a 5 km	Apenas em milhares de metros, podendo alcançar profundidades de até 8 km
Diâmetros mais comuns	Superficial: 6” a 36” Zona filtrante: 6” a 36”	Superficial: 17 ½” a 36” Produção: 7” a 9 ⅝”	Superficial: 17 ½” a 36” Produção: 4 ½” a 5”
Métodos de Perfuração	Percussão a cabo, rotação com circulação direta e reversa, rotopercussivo (martelo DTH)	Majoritariamente rotopercussivo (com martelo DTH)	Majoritariamente rotativo com circulação direta
Brocas	Tricônicas, sem partes móveis com lâmina de aço e <i>DTH button bits</i> . Composição predominante de aço ou carbeto de tungstênio	Tricônicas, brocas de diamante natural ou sintético (PDC ou TSP) e <i>DTH button bits</i> com carbeto de tungstênio	Sem partes móveis com PDC ou tricônicas com insertos de carbeto de tungstênio
Fluido de Perfuração	Lama bentonítica, lama à base de polímeros, lama com soda caustica e com argila natural	Fluidos a base de água com soda caustica e potássio caustico e fluidos a base de ar (ar pressurizado e espumas)	Lama bentonitica majoritariamente
Revestimento	Metal e PVC aditivado	Termoplásticos, fibra de vidro com aditivos e aço inox	Revestimento metálico
Cimentação	Região: Apenas na região da câmara de bombeamento Função principal: vedação, fixação e correção de desvios Classe do cimento: tipos I, II, e III	Região: Cada seção perfurada Função principal: limitar a deformação do revestimento por conta da alta pressão Classe do cimento: A, G, H e J	Região: Cada seção perfurada Função principal: proteção contra corrosão do revestimento Classe do cimento: A, B, C, G e H
Completação	Filtro e pré-filtro ou sem coluna de produção	Completação com liner ou a poço aberto	Majoritariamente revestimento canhoneado
Bombeamento	Bombas manuais ou bombas mecânicas (elétricas submersíveis ou de deslocamento positivo)	<i>Line shaft pumps</i> (LSPs) e <i>Electrical submersible pumps</i> (ESPs)	Métodos pneumáticos (<i>gás lift</i>) ou métodos bombeados (bombeio mecânico, bombeio por cavidades progressivas e bombeamento centrífugo submerso)

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1 Estudo da geologia

Como mencionado na seção 2.4.1, é necessário, inicialmente, um estudo das características geológicas e posteriormente das características geofísicas da formação rochosa que compõe o subsolo para a identificação das regiões que apresentam a maior probabilidade de armazenar os recursos e determinação de suas propriedades. Porém, apesar de todos os estudos visarem à identificação dos tipos litológicos atravessados, os intervalos produtivos e o potencial de exploração das formações, existem particularidades em termos de características analisadas por esses estudos para cada um dos recursos explorados (FEITOSA *et al.*, 2008).

No caso da exploração de água subterrânea, além desses objetivos, o estudo hidrogeológico visa determinar a estratigrafia, a transmissividade da formação, o coeficiente de armazenamento, o nível estático, a vazão específica e a qualidade da água explorada (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). No caso da exploração da energia geotérmica, de acordo com Aretouyap *et al.* (2016), os cinco principais parâmetros dos reservatórios geotérmicos são temperatura, porosidade, permeabilidade, propriedades químicas dos líquidos armazenados e pressão. Portanto, além da formação geológica, o estudo deve garantir uma caracterização da estrutura tectônica da região, da permeabilidade do solo *in situ* e do campo de tensão existente, para aumentar a probabilidade de encontrar um reservatório geotérmico (ARETOUYAP *et al.*, 2016). No caso da exploração de petróleo e gás, segundo Thomas (2001), as duas principais funções dos estudos de formação são localizar dentro da bacia sedimentar regiões que apresentem características consideradas propícias para o armazenamento de petróleo e quais dessas regiões tem a maior probabilidade de se armazenar petróleo. Portanto, definir características como a estruturação do solo, a porosidade das formações, a saturação dos poros, a permeabilidade e a densidade da formação, é essencial em um estudo geológico destinado à exploração petrolífera (SELLEY, 1998; TIMM, 2017).

Em termos de estudos geológicos, tanto para a exploração da água subterrânea quanto para a exploração de geotermia, petróleo e gás natural, é necessário que haja uma revisão da literatura existente acerca de poços já perfurados ou de estudos realizados nas regiões que se deseja explorar, de modo a facilitar a caracterização do solo. Ademais, é essencial um estudo das rochas que afloram para a superfície, e o uso de técnicas como aerofotogrametria e fotogeologia para a realização de um mapeamento da região e para a detecção de regiões propícias para a perfuração de poços pioneiros. Tais poços pioneiros,

somados com os métodos de estudo geológico previamente executados, podem assegurar informações mais precisas sobre a estrutura geológica da superfície (THOMAS, 2001).

Em se tratando de estudos geofísicos das formações, os quais servem de base para a definição de importantes propriedades do solo perfurado, existem algumas particularidades para cada tipo de exploração. Para a definição de características de solos voltada para a exploração de água subterrânea, é mais comum o uso de métodos diretos, ou seja, de métodos de perfilagem de diferentes naturezas. Dentre eles, pode-se mencionar a perfilagem por raios gama, a perfilagem por métodos elétricos, o método de potencial espontâneo, a perfilagem por indução e a perfilagem sônica. Outros dois métodos auxiliares que também podem ser empregados são: o cáliper, que é um perfil auxiliar na avaliação, assumindo um papel importante na correção de efeitos ambientais registrando a relação entre o diâmetro do poço e o diâmetro nominal da broca que o perfurou e, consequentemente, verificando a integridade das paredes do poço; e o perfil de desvio ou inclinação do poço, que também consiste em uma perfilagem auxiliar, que verifica a verticalidade do poço através de diferentes ferramentas evitando problemas no uso de outras ferramentas de perfilagem e na instalação de revestimentos, filtros e equipamentos de bombeio (FEITOSA *et al.*, 2008).

Já para a determinação das características dos solos visando à exploração de petróleo, gás natural e energia geotérmica, são utilizados tanto métodos de perfilagem, que são considerados como métodos diretos, quanto métodos indiretos, que são executados anteriormente à perfuração dos poços e fornecem informações mais gerais sobre a geologia. No caso dos métodos indiretos, tanto na exploração petrolífera quanto na exploração geotérmica, são utilizados: prospecção magnética, método gravimétrico, e métodos sísmicos, tanto de refração quanto de reflexão (ARETOUYAP *et al.*, 2016; KANA *et al.*, 2014; THOMAS, 2001). No caso da exploração geotérmica, ainda é utilizado o sensoriamento remoto, que faz uso de radiação ultravioleta para a geração de imagens e de bandas eletromagnéticas, sendo útil para avaliar as respostas espectrais dos minerais e verificar alterações significativas de padrões do subsolo (KANA *et al.*, 2014).

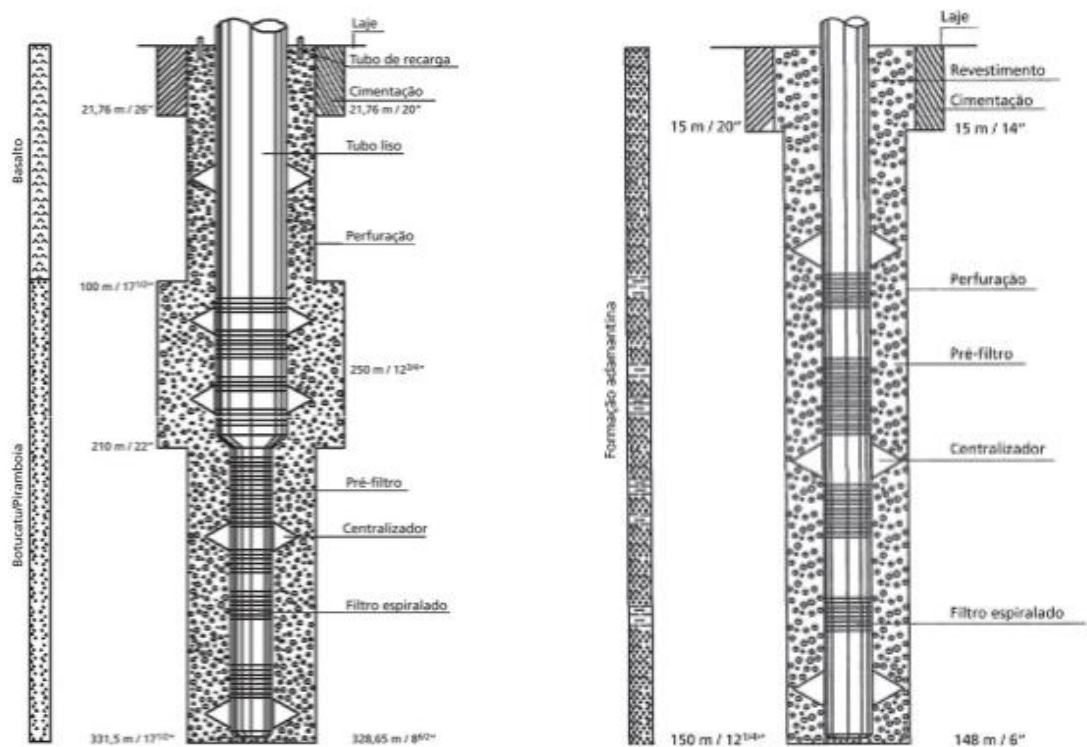
Em se tratando dos métodos diretos, existem algumas particularidades em cada um dos casos. Na exploração geotérmica, além da perfilagem por potencial espontâneo e por métodos elétricos, que são extremamente recomendados para a identificação de rochas ígneas e magmáticas através da análise de propriedades, a perfilagem por análise térmica é indispensável na identificação e caracterização de reservatórios geotérmicos. Esse método consiste em uma medição direta da temperatura do subsolo em diferentes faixas de

profundidade ao longo do poço visando determinar o gradiente térmico e o fluxo térmico ao longo deste. Desse modo, torna-se possível a identificação e a caracterização de fontes de calor provenientes do interior da terra (MANZELLA, 1999). Já métodos geofísicos diretos mais utilizados para a exploração de petróleo englobam não somente alguns métodos utilizados na perfuração de poços de água e de geotermia, como potencial espontâneo, raios gama, sônico e indução, mas também métodos adicionais como o neutrônico e a avaliação da densidade. É válido mencionar que os principais métodos de estudo geofísico e geológico foram desenvolvidos para a exploração de petróleo e gás, e, posteriormente, foram adaptadas para a exploração de outros recursos subterrâneos, o que explica a semelhança perceptível entre os métodos mais empregados.

4.2.2 Estruturação do poço, profundidades e diâmetros

A estruturação do poço está relacionada com a forma como ele é projetado, estando diretamente relacionada com o seu desenho final. Essa estruturação pode variar de acordo com a composição dos recursos explorados, com as propriedades do solo explorado, com as solicitações previstas sobre os revestimentos, dentre outros fatores. Nesse sentido, após a realização da análise bibliográfica, foi observado que poços construídos para extração de água subterrânea são estruturados de forma diferente dos poços de exploração de petróleo, gás natural e geotermia. A Figura 10 ilustra as duas principais estruturas que podem ser adotadas para a construção de um poço destinado a extração de água subterrânea.

Figura 10 – Estrutura dos poços: (a) poço com câmara de bombeamento; (b) poço de coluna única



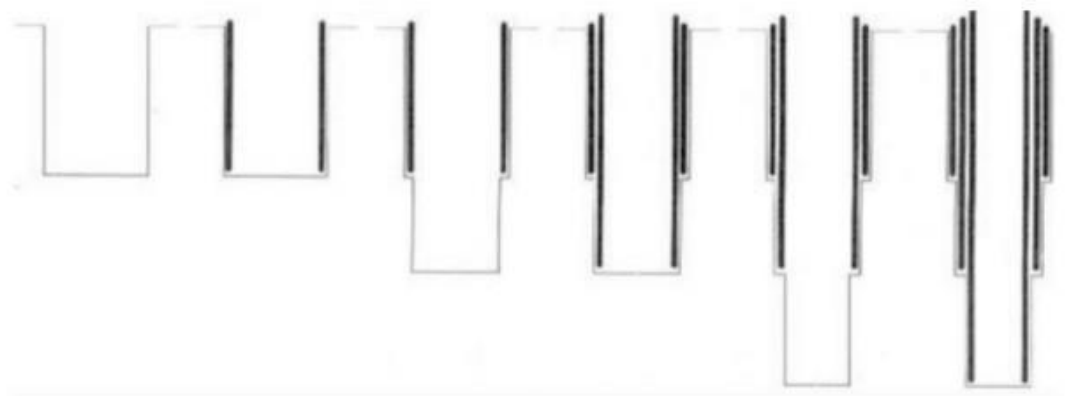
Fonte: Giampá e Gonçalves (2013)

Como pode ser observado a partir da Figura 10, existem dois tipos principais de estruturas de poços para a exploração de água subterrânea: poços com câmara de bombeamento e poços de coluna única. Os poços com câmara de bombeamento, ilustrados pela Figura 10 (a), apresentam uma estrutura composta por um tubo de boca para proteção sanitária, o qual é perfurado inicialmente a uma profundidade de 10 a 20 metros e é cimentado para proteger o poço contra águas e substâncias indesejadas; uma câmara de bombeamento, que consiste na parte do poço destinada a instalação de equipamentos de bombeamento tendo o seu diâmetro associado às dimensões desses equipamentos; e uma coluna de produção, que possui diâmetro inferior ao da câmara de bombeamento e contém zonas filtrantes que permitem a entrada da água para o interior do poço. Dependendo das características do solo perfurado e da localização dos aquíferos, é possível que existam variações nessa estrutura, como a presença de zonas filtrantes ao longo da câmara de bombeamento, o que é mais comum em aquíferos de granulometria mais fina, e a presença de uma coluna de adução de diâmetro intermediário entre a câmara de bombeamento e a coluna de produção, o que é comum em poços com profundidades acima de 600 metros para garantia de sustentação da estrutura (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Em rochas

presentes em aquíferos fraturados, os quais apresentam composição única ao longo de sua extensão, ou seja, não são multicamadas, a própria perfuração da rocha representa a câmara de bombeamento, coluna de adução e coluna de produção. Por conta de apresentar um único diâmetro ao longo de sua extensão, esses poços são classificados como poços de coluna única, ilustrados pela Figura 10 (b), e estão sempre associados a profundidades reduzidas e a formações de elevada permeabilidade (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Os poços de coluna única podem estar presentes também em aquíferos multicamadas ou em formações sedimentares, porém, nesses casos, a região do poço que se encontra em formações menos consolidadas precisa ser revestida (COSTA FILHO *et al.*, 1998).

Em se tratando da exploração de energia geotérmica, petróleo e gás natural, a perfuração dos poços é feita em seções de diferentes profundidades e diferentes diâmetros, de modo que esses poços, ao serem concluídos, ficam estruturados em intervalos conhecidos por *casing strings*. Desse modo, a perfuração se inicia utilizando-se uma broca de maior diâmetro e é realizada com uma profundidade pré-definida no projeto. Em seguida, essa seção é revestida e cimentada, dando origem a uma *casing string*. Posteriormente, é selecionada uma broca de diâmetro inferior a anteriormente utilizada, e a perfuração do poço é retomada, até alcançar uma profundidade pré-definida no projeto do poço. A nova seção também é revestida e cimentada, dando origem a uma nova *casing string*, e assim sucessivamente até se alcançar o reservatório do recurso, como pode ser observado a partir da Figura 11.

Figura 11 – Processo de construção do poço petrolífero e geotérmico

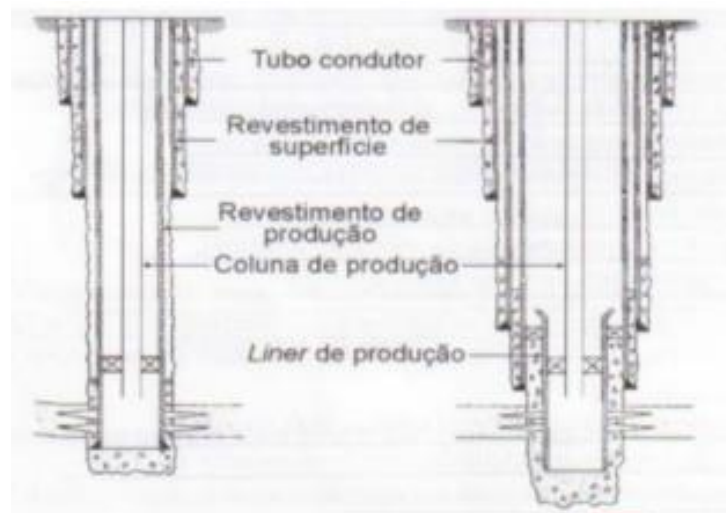


Fonte: Souza e Veloso (2017)

Cada revestimento posicionado ao longo do poço apresenta uma denominação específica e uma função específica. O posicionamento de cada revestimento ao longo do

poço e sua denominação estão ilustrados na Figura 12.

Figura 12 – Estruturação de poços para a exploração de petróleo, gás natural e geotermia



Fonte: Santos, Monteiro e Guimarães (2016)

De acordo com Rocha, Alencar e Barros (2017), apesar de todos os revestimentos apresentarem funções comuns independentemente da sua classificação, como prevenir desmoronamento, evitar contaminação dos lençóis freáticos, permitir retorno do fluido de perfuração, suportar pressões internas e externas, dentre outras, eles podem ser classificados com base nas suas dimensões, posições e funcionalidades em 6 diferentes tipos: condutor, que seria o primeiro revestimento do poço, com comprimento de 10 a 50 metros e diâmetros típicos de 30", 20" e 13 3/8", colocado com a função de sustentar sedimentos não consolidados sendo assentados por cravação, jateamento ou cimentação; revestimento de superfície, que possui comprimento variando entre 100 e 600 metros e com diâmetros típicos de 20", 16", 13 3/8", 10 3/4" e 9 5/8", tendo a função de proteger a porção superficial contra a infiltração de água, evitar desmoronamento de formações não consolidadas e servir como base de apoio para o equipamento de segurança do poço; revestimento intermediário, que nem sempre é necessário, mas tem a função de proteger zonas de alta e baixa pressão, zonas de perda de circulação e zonas onde existem fluidos corrosivos, sendo apoiados na cabeça do poço, e possuindo um comprimento variando entre 1000 e 4000 metros com diâmetros de 13 3/8", 9 5/8" e 7"; revestimento de produção, que possibilita o isolamento entre intervalos produtores, possuindo diâmetros de 9 5/8", 7" e 5 1/2", 5" e 4 1/2" e comprimentos reduzidos; *liner*, que em certas situações não são

empregados, mas revestem a parte inferior do poço aberto, tem o topo ancorado em uma estrutura colocada no revestimento de produção, e ainda permitem a entrada do fluido explorado por conta de sua estrutura perfurada, tendo diâmetros de 13 $\frac{3}{8}$ ", 9 $\frac{5}{8}$ ", 7", 5 $\frac{1}{2}$ ", 5", e 4 $\frac{1}{2}$ "; e *tie back*, que é usado apenas quando existem limitações técnicas que exigem que o revestimento anterior seja protegido, tendo diâmetros de 9 $\frac{5}{8}$ ", 7" e 5 $\frac{1}{2}$ ", 5" e 4 $\frac{1}{2}$ ".

As diferenças estruturais observadas entre poços perfurados para a exploração dos diferentes recursos estão diretamente relacionadas não somente às características físicas dos solos em que são armazenados, mas também ao local, dentro da estrutura rochosa, onde o recurso é encontrado para extração. Por conta deste fator, os poços acabam apresentando profundidades e diâmetros diferentes uns dos outros em alguns casos. No caso da água subterrânea, que é um recurso que pode ser armazenado em camadas mais superficiais por fazer parte do ciclo hidrológico, a profundidade dos poços perfurados apresenta grande variação, podendo estar na ordem de dezenas, centenas ou milhares de metros. No caso dos poços tubulares profundos, as profundidades mais comuns a serem encontradas estão na ordem das centenas e milhares de metros, sendo que poços estruturados em coluna única normalmente atingem profundidades de no máximo 300 metros e poços estruturados com câmara de bombeamento atingem profundidades de 300 até 1500 ou no máximo 2000 metros (CARDOSO, 2016; GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Em se tratando dos diâmetros mais comuns dos poços tubulares profundos, considerando-se os diâmetros comerciais dos revestimentos existentes (de 3" a 30") e os diâmetros comerciais das brocas de perfuração (de 6" a 36") é possível estimar que o diâmetro externo dos poços tubulares profundos varia entre 15 e 95 cm, assim como seu diâmetro interno. Como a estrutura dos poços pode apresentar um único diâmetro ao longo de toda sua extensão, foi assumido que tanto o diâmetro superficial quanto o diâmetro da zona de produção podem apresentar esses valores.

Em se tratando da profundidade dos poços perfurados para a exploração de geotermia, petróleo e gás, é possível perceber certa disparidade em comparação com os poços tubulares profundos visando a exploração de água subterrânea. No caso do petróleo e do gás natural, muito por conta do seu processo de formação, que envolve a participação de microrganismos anaeróbios e de condições específicas da estrutura rochosa onde são encontrados, a profundidade dos reservatórios, e, conseqüentemente, dos poços de exploração localizados em terra (*onshore*), são da ordem de milhares de metros. De acordo com Selley (1998), os poços petrolíferos apresentam em média profundidades entre 1 e 3 km, informação que está de acordo com o estudo realizado por Sun *et al.* (2013), o qual averiguou que a média de profundidade de poços petrolíferos na China em 2011 foi de

2946 metros. No entanto, de acordo com Sun *et al.* (2015), globalmente, é extremamente comum encontrar reservatórios de profundidades entre 3000 e 6000 metros, e até reservatórios com profundidade superior aos 7000 metros, que são considerados reservatórios ultraprofundos. Segundo os autores, o Mills Ranch Field, localizado no Texas, apresenta exemplos de reservatórios *onshore* ultraprofundos com profundidades variando entre 7600 e 8100 metros. Os diâmetros desses poços petrolíferos também podem ser estimados a partir dos diâmetros comerciais dos revestimentos. Como mencionado anteriormente, o diâmetro do tubo condutor, que seria o maior diâmetro do poço, varia de 133/8” a 30”. Considerando que é necessário que haja um certo espaçamento entre o revestimento e a parede do poço, e que os diâmetros comerciais das brocas imediatamente superiores a esses valores são 17 ½” e 36” respectivamente, estima-se que, considerando possíveis variações de diâmetros em função de diferentes fatores ou diferentes brocas utilizadas, o diâmetro da porção superficial dos poços varie entre 45 e 100 cm (17 ½” e 36”). Segundo Tester *et al.* (2006 *apud* Lukawski *et al.*, 2014, p. 8)¹ e Bush e Siega (2010 *apud* Lukawski *et al.*, 2014, p. 8)² na zona de produção, onde o diâmetro é conhecido como diâmetro de completação, o diâmetro mede de 11 a 13,5 cm (4 ½” a 5”).

Já a profundidade dos poços geotermais depende diretamente da finalidade do poço. No caso da perfuração de poços geotermais para uso direto do recurso como em aquecimento de piscinas, uso na agricultura, uso em estufas, dentre outros, ou para aquecimento de ambientes, não é necessário perfurar em elevadas profundidades (apenas centenas de metros), uma vez que, para essas finalidades, não é necessária uma fonte de calor de elevada entalpia, isto é, uma fonte de calor que apresente temperatura superior a 150°C (SOUZA FILHO, 2012). Como ao longo da extensão do solo existe um aumento de temperatura com o aumento de profundidade (gradiente geotérmico) em função da maior proximidade das regiões mais profundas com o núcleo da terra, as regiões mais rasas são, em geral, regiões de baixa entalpia e baixo conteúdo energético (TURGEON; MORESE, 2012). Em geral, poços com tais finalidades são perfurados em profundidades acima de 500 metros, pois é a partir dessa profundidade que o calor armazenado no solo está mais

¹ TESTER, J. W.; AUGUSTINE, C.; ANDERSON, B.; PETTY, S.; LIVESAY, B. A comparison of geothermal with oil and gas well drilling costs. In: THIRTY-FIRST WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING, 31., 2006, Stanford. Proceedings [...]. Stanford: Stanford University, 2006. p. 15-29.

² BUSH, J.; SIEGA, C. Big bore well drilling in New Zeland: a case study. In: WORLD GEOTHERMAL CONGRESS, 2010, Bali. Proceedings [...]. Bali: International Geothermal Association, 2010. p. 1-7.

associado às camadas mais internas da terra do que propriamente ao calor proveniente da radiação solar (BGS, 2021). Já para a produção de energia elétrica, é exigido fontes de elevados teores energéticos, ou seja, fontes de alta entalpia (acima dos 150°C), que, em função do gradiente térmico, são encontradas em regiões mais profundas (SOUZA FILHO, 2012; FITTS, 2015). Para essa finalidade, a profundidade dos poços gira em torno de milhares de metros, alcançando extensões próximas a 5 km, como é o caso de poços localizados no campo de Habanero, na Austrália, onde as extensões variam de 4 a 5 km e a temperatura atinge 244°C (AYLING *et al.*, 2016). Os poços geotérmicos, por conta de terem evoluído a partir de poços construídos para a extração de petróleo e gás, além de apresentarem uma estrutura extremamente semelhante a estes, apresentam diâmetros superficiais inseridos na mesma faixa determinada para os poços petrolíferos (NGUGI, 2008). Utilizando a mesma ideia de previsão dos diâmetros superficiais a partir dos revestimentos comerciais, a estimativa é a de que os diâmetros superficiais também variam entre 45 e 100 cm (17 ½” e 36”). No entanto, de acordo com Tester (2006 *apud* Lukawski *et al.*, 2014, p. 8)¹ e Bush e Siega (2010 *apud* Lukawski *et al.*, 2014, p. 8)², por conta de fluidos geotérmicos apresentarem uma maior capacidade de fluxo por serem menos densos e menos viscosos do que o petróleo e o gás, o diâmetro de completação desses poços é ligeiramente maior, medindo entre 18 e 24,5 cm (7” a 9 ⅝”).

4.2.3 Métodos de perfuração

Quanto aos métodos de perfuração utilizados, há uma variação muito grande em função do tipo de solo onde os recursos são encontrados. O Quadro 4, baseado em estudos desenvolvidos por Giampá e Gonçales (2013), Soulsby (2010) e Sapinska-Sliwa *et al.* (2015), associa as vantagens e desvantagens de cada método de perfuração nos diferentes tipos de solo existentes.

Quadro 4 – Associação entre métodos de perfuração e tipos de solo perfurado

	Solo sedimentar pouco consolidado (aluviões e sedimentos pouco consolidados)	Solo sedimentar consolidado (calcários, siltitos e calcarenitos)	Formações cristalinas (rochas ígneas e metamórficas)
Percussão a cabo	Garante boa amostragem, é simples e barato. Processo lento de perfuração (1 a 2 m/h), alto risco de prisão ferramental, limitado a perfurações rasas.	Melhor rendimento (2 a 3 m/h), bom controle de amostragem, simples e barato. Limitado a perfurações rasas.	Simple, barato e boa amostragem. Baixo rendimento (0,4 a 0,7 m/h) e limitado a perfurações rasas.
Rotativa com circulação direta	Amostragem em padrão médio, rápida penetração (5 a 20 m/h) e não tem limite de profundidade. Procedimento custoso, exige grande espaço e exige monitoramento do fluido de perfuração.	Boa taxa de penetração (6 a 10 m/h) e não tem limite de profundidade. Procedimento custoso, exige grande espaço e exige monitoramento do fluido de perfuração.	Inadequada, por conta do alto custo, baixo rendimento e falhas constantes. Utilizada apenas em perfurações extremamente profundas e em casos específicos.
Rotativa com circulação reversa	Boa amostragem, rápida penetração (5 a 20 m/h), mantém as condições das paredes do poço, bom fluxo de fluido de perfuração. Caro, exige elevada quantidade de água, e o fluido de perfuração deve ser a base de água.	Boa taxa de penetração (6 a 10 m/h), especialmente em amplos diâmetros, bom fluxo de fluido de perfuração e não tem limite de profundidade. Procedimento custoso, exige grande espaço e exige monitoramento do fluido de perfuração.	Inadequada, por conta do alto custo, baixo rendimento e falhas constantes. Utilizada apenas em perfurações profundas e em casos específicos.
Rotopercussiva	Inadequado em função do baixo rendimento e do elevado risco de entupimento das saídas de ar responsáveis pela percussão e pelo fluxo de fluido de perfuração.	Extrema rapidez na perfuração (6 a 10 m/h), mais flexível quanto ao uso de ar como fluido de perfuração, detritos mais fáceis de serem extraídos. Limitações em função da pressão hidráulica, e riscos de entupimento das saídas de ar.	Rápida penetração (6 a 12 m/h), bom controle de amostras e flexível quanto ao uso de ar como fluido de perfuração. Procedimento custoso.

Fonte: Giampá e Gonçalves (2013); Soulsby (2010); Sapinska-Sliwa *et al.* (2015)

Como mencionado na análise comparativa de armazenamento dos recursos (subseção 4.1.3), as águas subterrâneas podem ser armazenadas nos mais diversos tipos de formações rochosas. Por conta dessa variedade, as técnicas empregadas na exploração desse recurso podem ser variadas, devendo ser sempre adequada ao tipo de solo que se deseja perfurar. No caso de recursos armazenados em reservatórios constituídos por rochas sedimentares não consolidadas, o método de perfuração mais recomendado é o método rotativo, tanto de circulação direta, que é o mais empregado, em que o fluido passa por dentro da coluna de perfuração até chegar ao fundo do poço, quanto o de circulação reversa, mais empregado em perfurações rasas, em que o fluido entra pelo espaço anular e retorna por dentro da

coluna de perfuração. A percussão a cabo ainda é utilizada de certo modo, mas por ser adequada apenas para formações pouco consolidadas, ser menos eficiente que métodos rotativos e se limitar a profundidades de até 200 metros, é menos utilizada que os demais métodos na atualidade (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013; SOULSBY, 2010). No caso de rochas sedimentares consolidadas, os métodos empregados podem ser tanto os de rotação com circulação direta e reversa, quanto o método rotopercussivo. Em termos de rendimento, como pode ser observado através do Quadro 4, os três métodos oferecem boas taxas de penetração. Assim sendo, é necessário que se faça uma seleção levando em consideração as características do solo, os custos que cada método envolve e as dimensões do poço desejado, de modo a garantir o melhor custo-benefício na operação. Já em formações cristalinas, o método predominante é o rotopercussivo, pois, de acordo com estudos realizados por Finger (1984), são consideravelmente mais eficientes que os demais métodos, especialmente em grandes profundidades. Isso ocorre muito por conta da elevada frequência de vibração das colunas, do tamanho dos detritos formados, que são grandes o suficiente para não entupirem as saídas de ar e a possibilidade do uso do próprio ar fornecido pelos compressores para promover a percussão como fluido de perfuração (SAPINSKA-SLIWA *et al.*, 2015; THOMAS, 2001).

Realizando uma associação entre o Quadro 4 e o Quadro 2, é possível definir quais os métodos mais empregados na perfuração de poços geotérmicos e na perfuração de poços para a extração de petróleo e gás natural. No caso da exploração de energia geotérmica, por conta de os reservatórios serem encontrados em regiões de rochas ígneas e magmáticas, ou seja, em formações cristalinas, o método rotopercussivo com martelo DTH é o método mais comumente empregado na exploração desse recurso (TEODORIU; CHEUFFA, 2011). Embora exista a possibilidade de uso do método rotativo, a profundidade dos reservatórios, a abrasividade e a dureza das rochas limitam muito o uso desse método de perfuração, fazendo com que, para que haja uma melhoria na eficiência do processo de perfuração, seja necessário o uso de tecnologias que potencializem o método rotopercussivo. Um mecanismo que vem sendo muito utilizado é o sistema EGS (*Enhanced Geothermal System*), o qual aumenta a produtividade de um processo de extração promovendo um aumento na permeabilidade dos reservatórios através do bombeamento de fluidos à elevada pressão (FITTS, 2015; TURGEON; MORSE, 2012). Na perfuração de poços para a exploração de petróleo e gás natural, por conta de o armazenamento desses recursos ocorrer em bacias sedimentares e em elevadas profundidades, o método mais comumente utilizado é o método rotativo de circulação direta, muito por conta do seu ótimo rendimento nessas

formações (THOMAS, 2001). O método rotativo por circulação reversa, embora seja de uso menos comum, pode ser utilizado principalmente na perfuração de formações sedimentares não consolidadas, por oferecer resistência a desgaste por erosão, enquanto o método rotopercussivo pode ser empregado na perfuração de formações sedimentares consolidadas.

4.2.4 Brocas

O tipo de broca empregada na perfuração do poço e o material que a compõe também deve ser selecionado de acordo com o tipo de solo que está sendo perfurado. No caso da perfuração de poços tubulares profundos, onde há uma grande variedade de formações e profundidades, podem ser empregadas tanto brocas sem partes móveis quanto brocas com partes móveis. No caso de formações sedimentares, onde há um predomínio do uso dos métodos rotativos de circulação direta e os métodos de circulação reversa, os tipos de broca mais empregados são as brocas tricônicas com dentes de aço ou com insertos de carbetto de tungstênio, especialmente em formações de maior profundidade (acima de 400 m), ou as brocas sem partes móveis formadas por lâminas de aço, especialmente em rochas sedimentares pouco consolidadas e em menores profundidades (PROMINAS, 2015). Já no caso de formações cristalinas, onde há predomínio do método rotopercussivo, as brocas utilizadas são chamadas de *DTH button bits*, as quais apresentam corpo de aço com insertos constituídos por carbetto de tungstênio conhecidos como botões (PROMINAS, 2015), conforme ilustrado pela Figura 13.

Figura 13 – *DTH button bit*



Fonte: Fastnersweb (2022)

Considerando a exploração de recursos geotérmicos, os quais são armazenados em regiões de elevadas temperaturas e de rochas magmáticas e ígneas extremamente duras e abrasivas, é necessário que seja feita uma seleção adequada das brocas levando em consideração todos esses fatores. Assim sendo, como há um predomínio muito grande do método rotopercussivo nessa exploração, as DTH *button bits* com insertos de carbetto de tungstênio são as mais empregadas, apresentando propriedades como resistência ao impacto e ao desgaste. Quando empregado o método de perfuração rotativo, as brocas utilizadas podem ser tanto as tricônicas com insertos de carbetto de tungstênio quanto as brocas sem partes móveis de diamante natural, por conta de suas propriedades adequadas à perfuração em rochas duras e abrasivas. Além dessas, também podem ser empregadas as brocas de diamante sintético (PDC ou TSP), as quais são adequadas para exploração em elevada temperatura (FINGER; BLANKENSHIP, 2010; THOMAS, 2001).

Na exploração de recursos petrolíferos, considerando que estes ficam armazenados em formações sedimentares, em elevadas profundidades e que há um predomínio do uso de métodos rotativos, as brocas mais utilizadas são as brocas tricônicas com insertos de carbetto de tungstênio, especialmente em formações sedimentares consolidadas, e as brocas sem partes móveis de diamante sintético em formações sedimentares não consolidadas. O diamante sintético mais empregado é o PDC, que é um compacto de diamante policristalínico que reveste elementos cortantes de carbetto de tungstênio e garante a dureza e resistência necessária para um desempenho adequado em rochas não consolidadas (BARBOSA, 2019). Em formações mais duras e abrasivas, o PDC dá lugar ao TSP, outro tipo de diamante sintético que não contém cobalto em sua composição, o que lhe garante maior resistência ao calor (THOMAS, 2001).

4.2.5 Fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração podem apresentar diferentes bases e diferentes aditivos de acordo com o tipo de cascalho formado, o tipo de solo perfurado, a natureza do recurso extraído e até com o método de perfuração utilizado. Segundo Feitosa *et al.* (2008) e Soulsby (2010), os fluidos utilizados para a perfuração de poços tubulares profundos são, na grande maioria das aplicações, à base de água com aditivos que garantem propriedades como viscosidade aparente, viscosidade plástica, pH, densidade e teor de areia, para garantir transporte dos cortados, refrigeração da broca, lubrificação, pressão hidrostática às paredes e capacidade de manter cascalhos em suspensão. Para isso, os principais aditivos

colocados na água para se garantir essas propriedades são a argila natural, bentonita, polímeros (CMC) e soda caustica, embora alguns outros possam incorporar a estrutura dos fluidos de perfuração como é o caso do *polysafe* e do *spersene* (COSTA, 1992; SOULSBY, 2010).

No caso da perfuração de poços geotérmicos, que ocorrem, sobretudo, em formações cristalinas de elevada temperatura, elevada dureza e elevada abrasividade e que fazem uso do método rotopercussivo de perfuração, o critério de seleção dos fluidos de perfuração é ligeiramente diferente. De acordo com Ngugi (2008) e Finger e Blankenship (2010), além da viscosidade, que está relacionada à remoção dos cascalhos, da densidade, que está relacionada à pressão hidrostática exercida sobre a parede, do pH, relacionado à prevenção contra a corrosão, e da resistência ao trabalho em elevadas temperaturas, é necessário verificar a capacidade do fluido de prevenir vazamento do poço para a formação rochosa, para evitar um problema extremamente comum em formações permeáveis que é a perda de circulação (penetração do fluido na região permeável e ausência de retorno para a superfície). Assim sendo, de acordo com Culver (1991), os fluidos de perfuração podem ser tanto a base de água, quanto a base de ar. Os fluidos a base de água são geralmente empregados nas zonas mais superficiais do poço, por conta do baixo rendimento de fluidos a base de ar nessas regiões, e apresentam como aditivos a bentonita e polímeros, que garantem a viscosidade e a densidade necessárias, cromo-lignito e cromo-lignosulfonato, os quais são recomendados para exploração de reservatórios com temperaturas acima de 150°C, e soda caustica e potássio caustico, para a proteção contra corrosão e aumento da solubilidade de componentes (DIPIPO, 2012; FINGER; BLANKENSHIP, 2010; GUPTA; ROY, 2007). Os fluidos a base de ar são mais empregados em regiões próximas à zona de produção, para se evitar problemas de entupimento, e são utilizados ou na forma de ar pressurizado, em que o próprio ar utilizado para a realização do movimento pneumático é usado como fluido de perfuração, ou na forma de espumas, que seria uma dispersão de gás em um filme delgado de fase líquida estabilizada por um espumante, apresentando algumas vantagens como maior taxa de penetração, menores danos à formação e aumento da vida útil da broca, embora apresente deficiência na sustentação das paredes e no carregamento de partículas (CULVER, 1991). Existe também a possibilidade de, nas regiões de elevada perda de circulação, onde se torna necessário uma maior capacidade de fornecer pressão hidrostática ao poço, fazer a utilização de fluidos aerados, que consistem em fluidos de perfuração com a adição de ar ou nitrogênio (THOMAS, 2001). Alguns aditivos estão sendo testados para melhoria no desempenho dos fluidos de perfuração nessas condições, e

um deles é o THERMA-VIS, que consiste em uma hectorita sintética que garante ao fluido uma mistura de viscosidade com estabilidade térmica extremamente adequada para a perfuração de poços geotérmicos (MOHAMED; SALEHI; AHMED, 2021).

Em se tratando da perfuração de poços de petróleo e gás natural, as características da composição rochosa sedimentar, a profundidade dos reservatórios aliados com o método de perfuração rotativo com circulação direta geralmente adotado para esse tipo de perfuração e o tempo de exposição previsto para o fluido, são fatores que influenciam diretamente a seleção dos tipos de fluido utilizados. Para tais fluidos, características como estabilidade química, capacidade de separar cascalhos, flexibilidade em termos de tratamentos físicos e químicos, capacidade de ser bombeável, baixo custo, baixo grau de corrosão, capacidade de fornecer pressão hidrostática para evitar fluxo de fluido para o interior do poço (*kick*) e auxílio nas interpretações geológicas, são essenciais durante as perfurações (PEIXOTO, 2014). Desse modo, segundo Silva (2017), propriedades físicas como massa específica, que garante a pressão hidrostática e evita a ocorrência de *kicks*, que seria um influxo de fluidos presentes na formação para o interior do poço por conta da diferença de pressão existente, a reologia, que está relacionada ao comportamento do fluido em repouso ou em movimento, e os parâmetros de filtração, relacionados à taxa de penetração de fluido para as paredes do poço e propriedades químicas como o pH e teores de elementos químicos, devem ser manipuladas com precisão para que o rendimento do processo de perfuração seja satisfatório. Assim sendo, nesse tipo de exploração, embora o fluido mais empregado na grande maioria das aplicações seja a lama bentonítica, que apresenta a bentonita como sólido ativo, com a função de garantir viscosidade ao fluido, e a baritina como sólido inerte, também podem ser utilizados fluidos a base de água com aditivos alcalinizadores, floculantes e surfactantes; fluidos a base de óleo, menos empregados devido ao alto grau de poluição e elevado custo inicial, mesmo apresentando vantagens como alta lubricidade, amplo intervalo de variação de densidade e propriedades controláveis em elevadas temperaturas; e fluidos a base de gás, tanto na forma de ar quanto de espuma e de fluido aerado, que não são muito eficientes nesse tipo de exploração por conta da natureza do tipo de solo perfurado (THOMAS, 2001).

4.2.6 Revestimento

O revestimento, como explicado na seção 2.4.4, é o conjunto de tubulações que constitui as paredes do poço com a função de garantir a sustentação deste e impedir a

drenagem de águas superficiais para o interior do poço. A seleção dos materiais que compõem o revestimento e de suas dimensões depende não apenas do tipo de formação que está sendo perfurada, mas também da natureza química do recurso que está sendo explorado e do fluido de perfuração, o qual entra em contato direto com esse componente.

No caso de poços tubulares construídos para a exploração de água subterrânea, a seleção do material do revestimento passa por uma análise da água bombeada, análise de risco de ataques químicos, análise de bactérias presentes nas formações e análise de esforços sofridos pela coluna, como tração e pressão de colapso (FEITOSA *et al.*, 2008). Os materiais empregados na composição dos revestimentos de poços tubulares profundos são contribuições da indústria petrolífera para essa exploração, sendo que os mais comuns de serem empregados são o PVC, utilizados em poços de menor profundidade por conta de serem mais frágeis e deformáveis, o aço inox e o aço galvanizado, que apresentam propriedades adequadas para poços mais profundos (COSTA FILHO *et al.*, 1998; FEITOSA *et al.*, 2008; SOULSBY, 2010). Em termos de instalação, de acordo com Costa Filho *et al.* (1998), o revestimento é feito em toda a extensão do poço, quando a formação perfurada é sedimentar, apresentando ranhuras em sua porção próxima da área de produção (filtro), e é executado apenas na porção mais superficial do poço, referente à câmara de bombeamento, em formações cristalinas, porém sempre fazendo o uso de centralizadores para garantir a verticalidade e a equidistância do revestimento para a parede do poço, facilitando a instalação do pré-filtro.

Na perfuração de poços voltados para a exploração geotérmica, os materiais e a extensão dos revestimentos empregados em cada região do poço são selecionados com base em aspectos como: pressão da formação; fraturamento da estrutura rochosa; profundidade estimada da zona de produção; fluxo estimado de recurso explorado; resistência ao colapso e resistência à tração, assim como nos poços tubulares; resistência à corrosão, por conta da elevada produção de H_2S e fluidos com elevada concentração de sal; e resistência a elevadas temperaturas, de modo a não sofrer queda brusca no limite de escoamento em função do efeito térmico (CULVER, 1991; FINGER; BLANKENSHIP, 2010). Além disso, os revestimentos de poços geotérmicos apresentam algumas funções específicas, tais como: prevenção contra *kicks*; proteção contra perda de circulação, que é um fenômeno extremamente comum e pronunciado em formações cristalinas; e garantir meios pelos quais seja possível instalar equipamentos de segurança como os *blowout preventers* (BOPs) e *wellheads* (NGUGI, 2008). Assim sendo, os materiais mais empregados para revestimento de poços geotérmicos são: termoplásticos, que não são recomendados para aplicações

envolvendo alta entalpia dos reservatórios por conta da redução drástica da resistência ao colapso em elevadas temperaturas; fibras de vidro reforçadas com *epoxy* ou poliéster, apresentando excelente proteção contra corrosão e boa relação entre resistência e peso, embora envolva custos mais elevados e exija a perfuração em maiores diâmetros; e aço inox e de baixo carbono, que são os mais utilizados em explorações em elevadas temperaturas por apresentarem a maior resistência a elevadas temperaturas e boas propriedades de condução, além de ótima resistência a tração. Existe também a possibilidade do uso de materiais como concreto e asbesto, mas estes não são muito comuns por apresentarem menor custo-benefício (CULVER, 1991).

Os revestimentos utilizados em poços de petróleo e gás natural, a partir dos quais foram desenvolvidos revestimentos empregados em outras explorações, também tem seu material e suas dimensões definidas a partir de alguns critérios. Os principais critérios utilizados para a definição do material e das dimensões do revestimento estão relacionados às solicitações previstas em sua estrutura, de modo que os revestimentos devem suportar esforços de tração, flexão e pressão interna, e devem ser resistentes ao colapso e à corrosão (SANTOS; MONTEIRO; GUIMARÃES, 2016; THOMAS, 2001). Segundo Rocha, Alencar e Barros (2017), é necessário que fatores como volume de gás invadindo o poço, pressão de poros da formação, pressão da fratura da formação, áreas de perda de circulação, variações de inclinação, presença de fluidos corrosivos, dentre outros, sejam considerados no dimensionamento dos revestimentos, pois eles auxiliam na previsão de esforços atuantes sobre estes. Assim como os revestimentos de poços geotérmicos, os revestimentos de poços destinados à exploração de petróleo apresentam funções específicas como sustentação de equipamentos de segurança, alojamento de equipamentos de elevação artificial e sustentação de outra coluna de revestimento, sendo essenciais para a construção do poço (ROCHA; ALENCAR; BARROS, 2017). Por conta de todos esses fatores, o material mais recomendado para esse revestimento é o aço, de diferentes graus API, com adição de alguns outros componentes em certas situações, como manganês, molibdênio, cromo, níquel, cobre e silício, que são utilizados com base nas solicitações previstas durante a descida do poço e sua vida em operação (ROCHA; ALENCAR; BARROS, 2017; THOMAS, 2001). Juntamente do material metálico é colocada uma película para proteção do revestimento que pode ser tanto metálica, quanto não metálica e orgânica ou inorgânica, para gerar uma proteção contra o fenômeno da corrosão por parte de elementos químicos e bactérias encontradas em bacias sedimentares (SOUZA, VELOSO; 2017).

4.2.7 Cimentação

Como já explicado na seção 2.4.5, a cimentação consiste no deslocamento de uma pasta de cimento por dentro do revestimento posicionado e alocação dessa pasta do espaço anular entre o poço perfurado e o revestimento. Embora o procedimento de inserção do cimento no espaço anular seja fundamentalmente o mesmo em todas as explorações, a função principal da cimentação, o tipo de cimento empregado e o posicionamento dessa pasta de cimento ao longo do poço varia de acordo com a complexidade da exploração, com as características da formação rochosa e com as condições físico-químicas a que a pasta de cimento estará sujeita. No caso da perfuração de poços tubulares, a cimentação apresenta quatro funções principais: vedação, que seria impedir a chegada de poluentes para dentro do poço; a fixação, que seria a estabilização da rocha; proteção sanitária, que seria o impedimento da contaminação por águas vindas da superfície; e a correção de desvios de perfuração, que podem comprometer a continuidade da perfuração (FEITOSA *et al.*, 2008). Ademais, ao longo da cimentação de poços tubulares, a cimentação é feita apenas na porção superficial do poço, ou seja, na região da câmara de bombeamento, justamente com o intuito de realizar a fixação, a vedação, a proteção sanitária e a correção de desvios, e, ao mesmo tempo, dar espaço para a instalação do pré-filtro que preenche o espaço anular na zona de produção. Desse modo, a zona de produção não é cimentada para que o fluxo de recurso para o interior do poço ocorra com mais facilidade e, ao mesmo tempo, de maneira segura (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). O tipo de cimento empregado nessa perfuração varia de acordo com as dimensões do poço perfurado e com o tipo de formação que está sendo perfurada. De acordo com Culver (1991), na perfuração de poços de água subterrânea, onde os cimentos utilizados não seguem a classificação estabelecida pela API, e sim a classificação reconhecida pela ABNT, os tipos de cimento Portland mais empregados são os tipos I, II e III, os quais apresentam basicamente a mesma composição, porém em proporções diferentes. Segundo a ABCP (2022), esses três tipos de cimento apresentam material pozolânico e escória como aditivos, porém em proporções diferentes, sendo o tipo I o que apresenta menor proporção desses aditivos, o tipo II o que apresenta proporções intermediárias e o tipo III o que apresenta maiores proporções.

Já na perfuração de poços geotérmicos, a elevada permeabilidade do solo aliada com a elevada concentração de sulfato e substâncias ácidas e com condições de elevada temperatura e pressão, faz com que o tipo de cimento empregado e a função principal da cimentação sejam diferentes em comparação com poços tubulares profundos. De acordo

com Purba *et al.* (2022) e Ngugi (2008), as funções principais da cimentação em poços geotérmicos são proteção contra corrosão, proteção contra fluxos indesejados para o interior do poço, redução de riscos de *blowouts*, proteção contra deformação ou transformação do revestimento em função da alta pressão e alta temperatura, e prevenção de fadiga por fatores térmicos. Para isso, a cimentação deve ser executada em praticamente toda a extensão do poço, exceto na zona de produção, e usualmente envolve a realização de uma cimentação secundária por conta da perda de cimento para a formação em função de sua permeabilidade (CULVER, 1991; NELSON; EILERS; SPANGLE, 1981). Além disso, por conta de a perfuração geotérmica ter evoluído a partir da perfuração de poços de petróleo, o cimento empregado nessas operações está incluso na classificação API. Para poços dessa natureza, são utilizados mais comumente cimentos da classe A, G e H com a adição de sílica na forma de grãos ou na forma de flúor para resistir à ação corrosiva do fluido e às altas temperaturas, independente da finalidade da perfuração (uso direto, aquecimento de ambientes ou produção de energia elétrica) (CULVER, 1991). Em poços mais profundos, há a possibilidade de se utilizar o cimento da classe J, porém seu uso é menos comum. Em alguns casos, a sílica não fornece a proteção necessária contra ataques ácidos, de modo que alguns aditivos vêm sendo estudados para garantirem essa propriedade, como é o caso do fosfato de cálcio e alumínio (CaP) e da escória ativada por silicato de sódio (SSAS) (FINGER; BLANKENSHIP, 2010).

Na perfuração de poços que visam à exploração de petróleo e gás natural, além de funções básicas como fixação da tubulação, isolamento do revestimento, correção de desvios e impedir desmoronamento das formações, a principal função da cimentação nessa operação é a proteção contra a corrosão por parte dos hidrocarbonetos (PURBA *et al.*, 2022). Para isso, a cimentação primária é feita em toda a extensão do poço, inclusive na zona produtora, independentemente do uso de *liners* ou de revestimento de produção, para que haja um isolamento dessa seção. A cimentação secundária é aplicada na grande maioria das construções, tanto na forma de *squeeze*, quanto na forma de tampões de cimento ou de recimentação, como forma de precaução contra problemas estruturais (MALOUF, 2013; THOMAS, 2001). Para que isso seja possível, cimentos de classe API A ou B são os mais empregados em profundidades de até 2000 metros, garantindo a sustentação e o isolamento requerido pela exploração petrolífera, sendo que o cimento da classe C também pode ser empregado, embora não garanta uma sustentação tão eficiente. Para maiores profundidades, é comum o uso de cimento das classes G e H, os quais se comportam adequadamente em condições de alta pressão e alta temperatura e são os mais empregados na indústria

petrolífera brasileira (CULVER, 1991, THOMAS, 2001). Apesar de essas classes serem as mais empregadas, cimentos das demais classes também são empregados na cimentação de poços. Porém, sua seleção depende de fatores envolvidos na perfuração, tais como profundidade das seções, composição do recurso explorado, propriedades da formação rochosa, condições de temperatura e pressão no fundo do poço, dentre outros fatores.

4.2.8 Completação

Como mencionado na seção 2.4.6, a completção consiste no conjunto de processos responsáveis por deixar o poço em condições de produção do recurso explorado. Muitos autores incluem no processo de completção o revestimento do poço e a cimentação do espaço anular. Porém, neste documento, a abordagem será feita em cima da instalação dos equipamentos finais que são responsáveis por permitirem a entrada de recursos para o interior do poço e em cima das técnicas envolvidas na promoção do fluxo de recursos.

Na construção de poços tubulares, a completção se baseia na instalação de dois elementos principais: o filtro e o pré-filtro. O filtro consiste em um revestimento especial que permite a passagem de água para a porção mais interna do poço e que é dimensionado com base na vazão prevista para o poço, no efeito de componentes verticais de fluxo e na perfilagem geofísica executada (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Existem diferentes tipos de filtros que são selecionados com base nas especificações do poço, na demanda a ser atendida e em recursos disponíveis para a obra, tais como filtros de PVC, padronizados com base na profundidade de aplicação e resistência ao colapso, filtros de aço, compostos por frestas dispostas longitudinalmente ou ortogonalmente com área aberta da ordem de 6% do diâmetro, e filtros de ranhura contínua, constituídos por metais e formados pelo enrolamento de arame estirado a frio e de seção transversal triangular ou trapezoidal (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). A coluna de filtro pode ser única ou segmentada e, como mencionado na seção 4.2.2, referente à estruturação dos poços, pode ser posicionada somente na zona produtora ou pode fazer parte de alguma seção da câmara de bombeamento, exceto na zona de admissão da bomba (SOULSBY, 2010). O pré-filtro consiste em um preenchimento, geralmente de cascalho, colocado no espaço anular entre o filtro e a parede do poço na zona de produção. É empregado especialmente em formações granulares e pouco consolidadas, com a função de estabilizar areias muito finas, permitir maior porcentagem de área aberta das ranhuras do filtro e reter partículas mais finas vindas do aquífero explorado (FEITOSA *et al.*, 2008). Vale ressaltar que, quando a exploração é

realizada em aquíferos fissurais, que contém uma formação rochosa cristalina e consolidada, e a profundidade não é extremamente elevada, é possível realizar a extração sem a instalação de filtro e pré-filtro, não havendo a presença de uma zona de produção (COSTA FILHO *et al.*, 1998). Outro fator que é válido ressaltar também é que, em poços tubulares, além do procedimento de limpeza, que pode ser considerada como uma etapa da completação, é realizado um procedimento de desenvolvimento, que consiste em um conjunto de procedimentos hidráulicos ou mecânicos que tem o intuito de retirar toda partícula que dificulte o fluxo de água do aquífero para o poço (GIAMPA; GONÇALES, 2013). São diversos os métodos de desenvolvimento existentes, tais como o superbombeamento, o pistoneamento, o jateamento, o bombeamento a ar comprimido, dentre outros, e eles são necessários por conta da mistura entre os detritos deixados pela perfuração com fluidos de perfuração, o que dificulta a entrada do recurso para o interior do poço (SOULSBY, 2010).

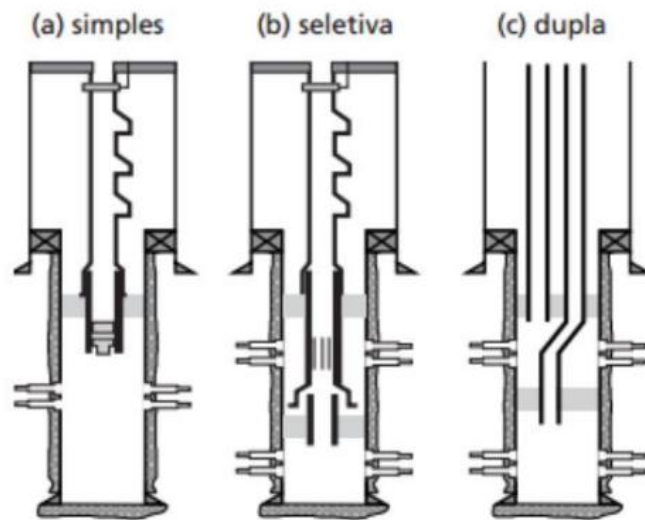
Já na exploração de poços geotérmicos, por envolverem uma perfuração em rochas cristalinas de elevada dureza e consolidadas, os procedimentos de completação predominantes são a completação a poço aberto ou a completação com *liner* rasgado (FINGER; BLANKENSHIP, 2010). Os *liners* são telas que apresentam poros espalhados em sua estrutura com a função de filtrar o recurso que entra no poço, e são pendurados por *liner hangers* instalados no interior do revestimento de produção, de modo que o *liner* não possui contato direto com a superfície (CULVER, 1991). Os *slotted liners* geralmente não são cimentados na exploração de recursos geotérmicos, principalmente por conta da estruturação dos solos onde são encontrados e da natureza do recurso geotérmico que necessita de espaço para fluir livremente para o interior do poço, e o uso de pré-filtro nesse tipo de exploração é extremamente raro (CULVER, 1991; PURBA *et al.*, 2022). A completação a poço aberto seria a ausência de revestimento ou qualquer equipamento de filtragem de vapor ou água após o revestimento de produção, deixando a zona produtora “aberta”. Após a conclusão dessa etapa, é instalada a cabeça de produção e o BOP, que são equipamentos de segurança que ficam acoplados ao revestimento de superfície, seguido da instalação da coluna de produção, por onde os recursos são conduzidos até a superfície, e onde são instaladas as bombas (CAVALCANTE, 2016).

Já na perfuração de poços para a extração de petróleo e gás natural, a qual ocorre em solos sedimentares, a completação pode envolver os três tipos mostrados na seção 2.4.6: completação a poço aberto, completação com *liner* rasgado ou canhoneado e completação com revestimento canhoneado. A completação a poço aberto é aplicada apenas em seções

de reservatórios de rochas firmes, ou seja, algumas formações sedimentares consolidadas e em situações em que não é previsto um retorno financeiro relevante, sendo de menor aplicação em comparação com os demais. A completação com *liner* rasgado ou canhoneado envolve um procedimento semelhante ao que ocorre na perfuração de poços geotérmicos, com a diferença de que na perfuração de poços petrolíferos, ou é empregado pré-filtro no entorno do *liner*, o qual geralmente é areia, ou o *liner* é inserido sem ranhuras dentro do poço, é cimentado e passa por um processo de canhoneamento que gera aberturas em sua estrutura. Na completação com revestimento canhoneado, que é o método mais empregado na completação desse tipo de poço, o poço é perfurado em toda sua extensão e o revestimento é descido até o fundo do poço, passando também pela zona de produção, sendo posteriormente cimentado. Com cargas explosivas provenientes de estruturas cilíndricas de aço conhecidas como canhões, que são descidas até a zona de produção através de um cabo, são emitidos jatos de energia que rompem partes do revestimento, do cimento e, por vezes, até da própria formação, promovendo o contato direto do poço com a formação em um processo conhecido como canhoneamento (CAVALCANTE, 2016; PEIXOTO, 2014; THOMAS, 2001). É válido ressaltar que, o processo de completação de poços petrolíferos envolve, após a instalação da estrutura que promove o contato direto entre a formação e o poço, outras etapas que tornam o poço disponível para exploração. Inicialmente, é feita a instalação da cabeça de produção e do BOP, que são equipamentos de superfície. Em seguida, é feito um condicionamento do revestimento de produção, onde, com auxílio de um fluido de completação, é descida uma broca com raspador para retirar elementos empregados na cimentação, e é feita uma avaliação da estanqueidade do revestimento. Posteriormente, é feita uma avaliação da qualidade da cimentação através de perfis sônicos e, se houver alguma falha, é necessário que seja feita uma cimentação secundária. Em seguida é realizado o canhoneio do revestimento, caso a completação seja feita por revestimento canhoneado ou *liner* canhoneado, e por fim, é realizada a instalação da coluna de produção, que tem a função de conduzir fluidos produzidos para a superfície, permitindo a instalação de equipamentos para a elevação artificial, e da árvore de natal que é um conjunto de válvulas que controlam o fluxo de óleo para a superfície (SILVA, 2017). Além disso, é importante mencionar que a completação de poços petrolíferos ainda pode ser classificada quanto ao número de zonas exploradas em: simples, onde uma tubulação passa pelo revestimento de produção e faz a extração do recurso; seletiva, onde uma coluna de produção permite a produção de zonas diferentes seletivamente; e dupla, que permite a produção a partir de duas zonas diferentes de modo controlado e independente

(CAVALCANTE, 2016). A Figura 14 ilustra cada uma dessas classificações de completação em função do número de zonas exploradas.

Figura 14 – Classificação da completação quanto ao número de zonas exploradas: (a) simples; (b) seletiva; (c) dupla



Fonte: Thomas (2001)

4.2.9 Bombeamento

Para que os recursos possam ser extraídos, quando a pressão do reservatório não é elevada o suficiente para promover a elevação natural do recurso, é necessário o emprego de métodos de elevação artificial, sendo o bombeamento o mais comum de ser empregado. No caso da exploração de água subterrânea, o bombeamento pode ocorrer através do uso de bombas manuais ou através do uso de bombas mecânicas. De acordo com Soulsby (2010), as bombas manuais são destinadas a poços de baixo rendimento, com até 30 metros de profundidade, e envolve a inserção de um pistão de acionamento manual ou o uso de um contrapeso, que, através de um movimento alternativo, gera a variação de pressão necessária para promover a elevação do recurso. Este equipamento está ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 – Bomba manual



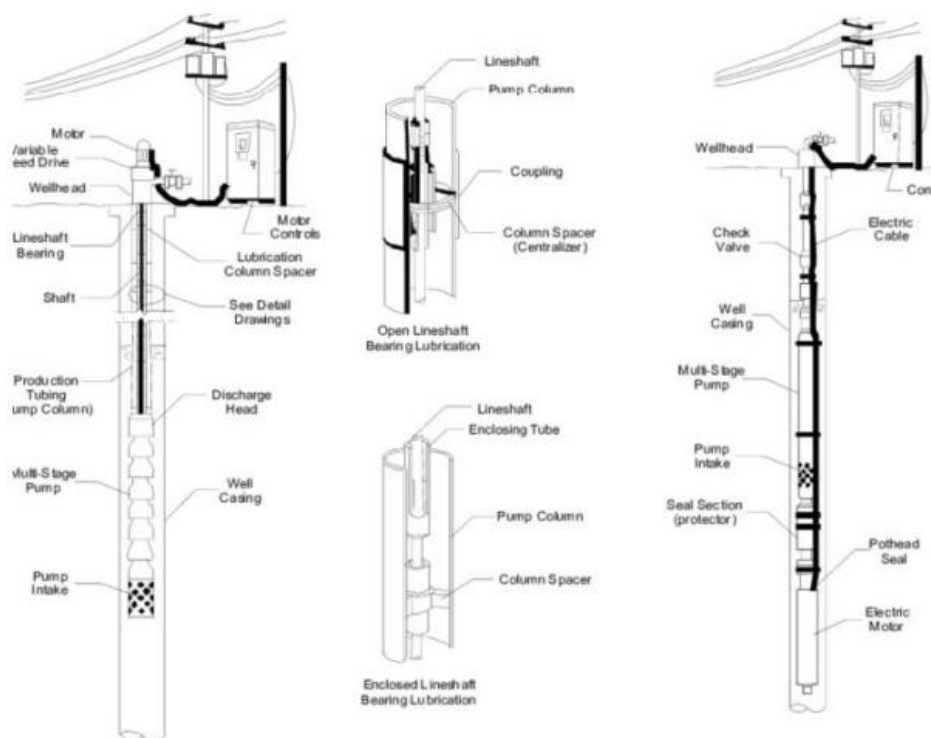
Fonte: FOGAL (2022)

Já as bombas mecânicas apresentam maior potencial de extração por conta de seu acionamento através de motores, e as principais representantes dessa categoria, tanto em poços para a extração de água subterrânea quanto para a exploração de energia geotérmica, são as bombas elétricas submersíveis (ESPs), motobombas submersas e bombas rotativas de deslocamento positivo (LSPs) (CURKAN; KLACZEK; REEDE, 2018; SOULSBY, 2010). Os conjuntos motobombas submersas são projetados para serem inseridos no poço em posição vertical e extraem água de poços tubulares através de uma bomba hidráulica submersa que funciona acoplada a um motor elétrico, também submerso, que é projetado especialmente com essa finalidade. A bomba tem a função de fornecer velocidade e pressão à água sob a forma de energia cinética através da movimentação dos rotores, gerando uma pressão no interior da bomba que favorece a elevação do fluido (PEREIRA, 2016; TSUTIYA, 2006). As bombas rotativas de deslocamento positivo promovem o movimento do fluido através do movimento rotativo do rotor que transfere energia de pressão e provoca escoamento do fluido no mesmo sentido que a força está sendo aplicada (MACINTYRE, 1997; TSUTIYA, 2006). O acionamento dessas bombas também é feito, em grande parte das aplicações, por motores elétricos que ficam localizados na superfície, e entram em contato com os rotores da bomba através de uma viga cilíndrica que permite a movimentação do fluido (BRASIL, 2010; CURKAN; KLACZEK; REEDE, 2018). É importante ressaltar que a bomba deve ser sempre instalada em uma região do poço que apresenta ausência de filtro, pois o fluxo de água atingindo a carcaça da bomba pode causar incrustação e erosão da parede (SOULSBY, 2010).

No caso da extração de recursos geotérmicos, o emprego de cada uma dessas bombas varia de acordo com as temperaturas e as profundidades exploradas. As bombas de deslocamento positivo apresentam elevada capacidade de suportar elevadas temperaturas (até 250 °C), porém se limitam a aplicações em menores profundidades (até 600 metros),

pois exige verticalidade dos poços, tem curto ciclo de operação e apresentam tempo de instalação mais longos, sendo mais empregadas na exploração da geotermia para uso direto. As bombas elétricas submersíveis são capazes de serem empregadas em poços com desvios, já que o motor é inserido no interior do poço e a conexão com a superfície é feita através de cabos, e apresenta boa resistência a elevadas temperaturas, sendo empregadas nos poços de maior profundidade. No entanto, não é um sistema de elevada confiabilidade nessas condições e não garante extração de grandes volumes energéticos. Desse modo, o desenvolvimento de um sistema de bombeamento robusto e capaz de conciliar resistência a elevadas temperaturas e elevada potência das bombas, tornou-se o maior desafio da indústria de extração de energia geotérmica na atualidade (CURKAN; KLACZEK; REEDE, 2018; PIERCE *et al.*, 2013; KAYA; MERTOGLU, 2005). A Figura 16 a seguir ilustra os dois sistemas de bombeamento mais comuns na exploração geotérmica, os quais também são utilizados em poços tubulares profundos.

Figura 16 – Sistemas de bombeamento mecânico/elétrico: (a) LSP (b) ESP



Fonte: Curkan, Klaczek, Reede (2018)

Na exploração de petróleo e gás natural, além do uso dos métodos bombeados, que aumentam a pressão disponível para a elevação do fluido, existe a possibilidade do uso de

métodos pneumáticos, ou seja, métodos que diminuem pressão no fundo do poço, facilitando a ascensão do fluido de maneira “natural” (SENAI CIMATEC, 2021). Dentre os métodos pneumáticos, os mais empregados são os métodos de *gas lift* (intermitente e contínuo), que consistem na injeção de gás comprimido no espaço anular entre a coluna de produção e o revestimento e a posterior entrada desse gás no interior da coluna por meio de válvulas, de modo a reduzir a densidade do óleo que entra no poço e reduzir a pressão requerida para a elevação do fluido. É um método que pode ser contínuo, se o gás for injetado continuamente, ou intermitente, se o gás for injetado em golfadas, e, embora seja um procedimento de alto custo, é comumente empregado em poços *offshore* por ter grande aplicabilidade em elevadas profundidades e em largas faixas de vazão (FREITAS; SOUZA, 2021; RN TECNOLOGIA, 2021). Dentre os métodos bombeados, o mais empregado, especialmente em poços *onshore*, é o bombeio mecânico com hastes, que através de uma unidade de bombeio, conhecida popularmente como cavalo de pau, transforma o movimento rotativo de um motor elétrico ou motor de combustão interna, em um movimento alternativo das hastes, promovendo a variação de pressão necessária para a ascensão do fluido (PEIXOTO, 2014). Esse método é muito empregado para elevar vazões médias em poços rasos ou pequenas vazões em grandes profundidades, não sendo recomendado para poços com desvios ou que produzem elevada quantidade de areia (THOMAS, 2001). A estrutura, ilustrada pela Figura 17, é composta por uma bomba de subsuperfície, coluna de hastes, unidade de bombeio, motor e válvulas de pé e de passeio que abrem alternadamente permitindo a entrada e saída do fluido para a linha de produção.

Figura 17 – Estrutura de bombeio mecânico



Fonte: Thomas (2001)

Outro método de bombeamento bastante empregado é o bombeio por cavidades progressivas, que consiste no uso de uma bomba imersa composta por um rotor e estator e que apresenta cavidades em sua estrutura, de modo que, conforme o rotor rotaciona, há um movimento axial simultâneo das cavidades que carregam o fluido para a descarga. O acionamento dessa bomba ocorre através de um motor elétrico, que pode estar tanto na superfície quanto submerso. O sistema é composto por uma bomba de subsuperfície, uma coluna de hastes, uma camisa estacionária, um rotor e um motor. Não é empregado em poços muito profundos, bombeia fluidos de diferentes viscosidades e não consome muita energia quanto empregado (PEIXOTO, 2014; THOMAS, 2001).

Além do bombeamento por cavidades progressivas, o bombeio centrífugo submerso também é constantemente empregado. Tal método é basicamente igual ao método de bombeamento empregado na exploração de água subterrânea e energia geotérmica, fazendo o uso de uma bomba centrífuga submersa de vários estágios juntamente de um motor elétrico também submerso. É bastante empregado em poços *offshore*, é empregado em grandes profundidades e pode ser empregado em poços com desvio, apresentando limitações quanto a exploração em ambientes que produzem muitos sólidos e gases e em poços de baixa vazão (FREITAS; SOUZA, 2021).

4.3 COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE PERFURAÇÃO

Utilizando as equações (1) e (2) descritas na seção 3.2, e dados de poços perfurados em diferentes regiões do mundo disponíveis para consulta na *web*, foi possível realizar previsões de custos de perfuração e completação de poços petrolíferos e poços geotérmicos verticais e perfurados em terra, as quais foram organizadas na Tabela 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Custos de perfuração de poços para extração de petróleo e gás natural

Nome	País	Profundidade total (pés)	Profundidade total (m)	Ano	Custo Total (US\$)	Custo/m (US\$/m)
AWI 7-8	Indonésia	9250	2819	2008	7.23	2564.93
AWI 20-1	Indonésia	8872	2704	2008	6.86	2535.80
US-1	EUA	10825	3299	2009	8.84	2679.49
US-2	EUA	8425	2568	2009	6.42	2500.26
US-3	EUA	7622	2323	2009	5.65	2432.66
IDDP-1	Islândia	6877	2096	2009	4.96	2364.71
US-10	EUA	11753	3582	2010	9.83	2743.02
US-11	EUA	12340	3761	2010	10.46	2782.04
US-12	EUA	11687	3562	2010	9.75	2738.60
US-13	EUA	9976	3041	2010	7.96	2619.17
New Zeland 1	Nova Zelândia	7566	2306	2008	5.60	2427.77
New Zeland 2	Nova Zelândia	6847	2087	2008	4.93	2361.89
New Zeland 3	Simulação	20001	6096	2008	19.79	3246.81
LC-US-3	EUA	4050	1234	2009	2.48	2009.82
LC-US-2	EUA	4010	1222	2009	2.45	2002.82
Impact Tech 1	Simulação	21001.681	6401	2012	21.15	3304.11

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Custos de perfuração de poços para extração de energia geotérmica

Nome	País	Profundidade total (pés)	Profundidade total (m)	Ano	Custo Total (Milhões US\$)	Custo/m (US\$/m)
Cypress 28 Federal #H001	EUA	10275	3132	2009	6.84	2184.98
7-SE-58-RN	Brasil	10295	3138	2007	6.91	2203.47
Cypress 33 Federal #H002	EUA	11400	3475	2009	8.09	2327.25
Frye 11	EUA	4135	1260	2007	1.55	1230.33
Federal 9-12-9-18	EUA	15433	4704	2009	13.16	2796.87
Myox 16 State COM #007	EUA	8836	2693	2009	5.37	1993.60
Wyat Draw 29 State COM #001	EUA	9850	3002	2009	6.39	2129.47
Boomerang BTR State #002	EUA	9500	2895	2009	6.03	2083.07
Banjo BNO Federal #001	EUA	8700	2652	2009	5.24	1975.12
Wild Cap State #005H	EUA	9223	2811	2009	5.75	2046.17
Cholla 1 Federal #014	EUA	8950	2728	2009	5.48	2009.28
Caprock 35 State #001H	EUA	8859	2700	2009	5.39	1996.74
Mobil Federal #010	EUA	8024	2446	2009	4.60	1880.52
7-CAM-1278-RN	Brasil	3708	1130	2009	1.33	1176.80
Judd Estate State	EUA	19140	5009	2007	17.89	3571.04
Benedict	EUA	19488	5100	2008	16.16	3169.44

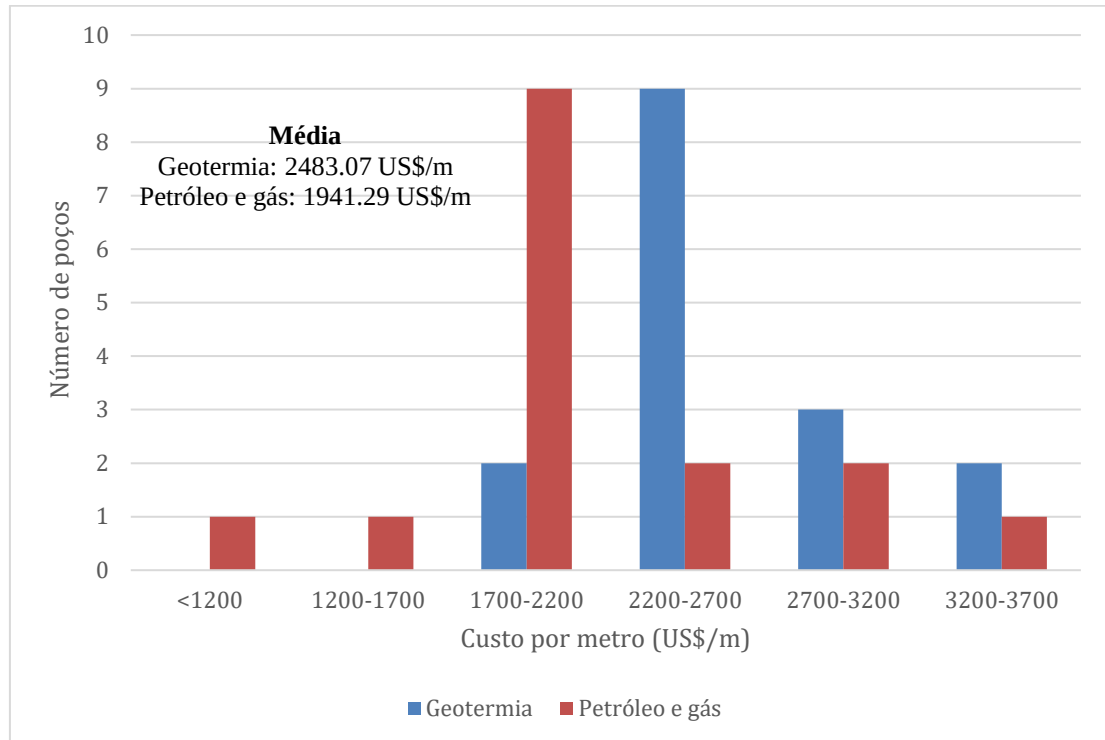
Fonte: Elaborado pelo autor

As bases de dados consultadas para a coleta das informações de cada um dos poços estão indicadas no Apêndice A, no caso dos poços de petróleo e gás natural, e no Apêndice B no caso dos poços geotérmicos. Também é válido ressaltar que a localização dos poços perfurados pouco interfere no cálculo dos valores monetários, pois assume-se que todos os poços foram construídos sobre as mesmas condições.

A partir das Tabelas 2 e 3, foi possível a construção de um gráfico, ilustrado pela

Figura 18, para facilitar a identificação do tipo de poço que exige maior quantidade de recursos financeiros para ser construído com base no seu custo por metro perfurado.

Figura 18 – Análise de custo por metro perfurado

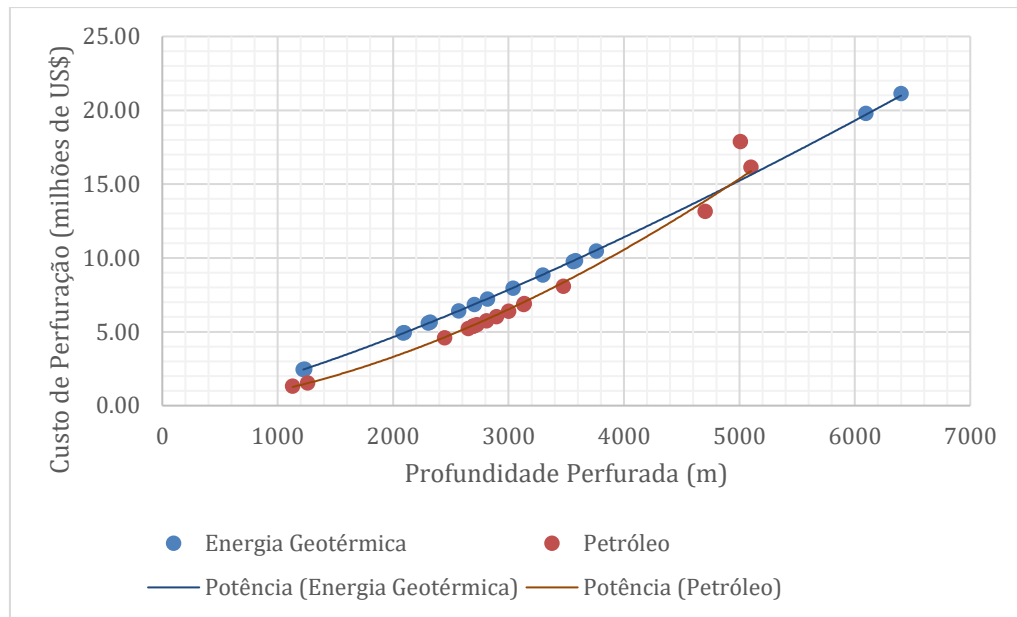


Fonte: Elaborado pelo autor

É possível verificar que, de forma geral, o custo médio de perfuração por metro perfurado de poços geotérmicos, que seria de 2483,07 US\$/m, é superior ao custo médio de perfuração por metro perfurado de poços para extração de petróleo e gás natural, que seria de 1941,29 US\$/m. É válido mencionar que a análise realizada deu maior enfoque para poços de profundidades entre 1 e 4 km, que é o intervalo de profundidade mais comum entre poços petrolíferos verticais *onshore* e geotérmicos. Portanto, de forma generalizada, em situações próximas à realidade, os custos de poços geotérmicos tendem a ser superiores aos petrolíferos *onshore* destinados à produção.

No entanto, analisando-se os dados de custos totais fornecidos pelas Tabelas 2 e 3, é possível perceber que a diferença entre custos de perfuração e completação de poços geotérmicos e de poços petrolíferos apresenta uma tendência a cair com o aumento da profundidade. Para melhor ilustrar esse efeito, foi confeccionado um gráfico que relaciona os custos totais de perfuração com a profundidade do poço perfurado, o qual é ilustrado pela Figura 19.

Figura 19 – Custos de perfuração em função da profundidade perfurada



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 19, é possível perceber que, de acordo com a análise realizada, a partir de profundidades próximas a 5000 metros, existe uma tendência de mudança no panorama financeiro relativo à construção dos poços para a extração de geotermia e para a extração de petróleo, de modo que os poços petrolíferos passam a ser mais custosos de serem concluídos. É necessário mencionar que, nessa faixa de profundidade, o cenário se torna mais hipotético do que representativo da realidade, pois poços geotérmicos ainda não alcançaram tais profundidades, e, portanto, as análises existentes relativas a essas regiões foram baseadas em simulações computacionais. No entanto, é visível a redução progressiva da diferença entre os custos totais com o aumento da profundidade, o que permite que sejam realizadas projeções nesse sentido.

De acordo com Lukawski *et al.* (2014), existem alguns fatores relativos à construção dos poços que ajudam a explicar as diferenças de custos nas diferentes faixas de profundidade. Primeiramente, os autores explicam que mesmo em baixas profundidades, a porosidade e permeabilidade de solos que armazenam recursos geotérmicos sofrem variações de ordens de magnitude, acentuando o fenômeno de perda de circulação dos fluidos de perfuração e do cimento, o que pode gerar um aumento na ordem de 10 a 20% nos custos de construção do poço. Além disso, a elevada heterogeneidade litológica dos reservatórios geotérmicos nas regiões mais superficiais gera a necessidade de intervalos de revestimento (*casing strings*) adicionais para garantir a estabilidade do poço, resultando em

um maior tempo de perfuração e, conseqüentemente, maiores custos. Em maiores profundidades, os reservatórios petrolíferos apresentam pressões que muitas vezes geram maiores riscos do que pressões em poços geotérmicos de mesma profundidade, exigindo intervalos adicionais de revestimento e composição específica, aumentando o tempo e o custo de perfuração. Outro fator que contribui para a diferença de custos de perfuração é a necessidade do uso de resfriadores de lama e equipamentos de análise geofísica resistentes a elevadas temperaturas, mesmo em poços geotérmicos considerados rasos, além da constante necessidade da cimentação secundária em função da elevada perda de circulação. Por fim, o fato de o diâmetro de produção ser maior em poços geotérmicos gera uma redução nas taxas de perfuração, exige o uso de brocas de maiores diâmetros, perfuratrizes de maior potência e maior quantidade de aço e de cimento para concluir a construção do poço, o que gera um aumento dos custos de perfuração e completação de poços geotérmicos.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Após a realização da análise comparativa, algumas inferências sobre os processos de perfuração e construção dos poços para a extração de recursos naturais puderam ser realizadas. Primeiramente, o estudo ressaltou a grande importância da aquisição de conhecimentos na área da extração de recursos naturais, em função dos seus múltiplos usos dentro da sociedade e, especialmente, do seu uso para a geração de energia. Em um momento de transição energética como o que está ocorrendo na atualidade, é extremamente necessário que sejam realizados estudos acerca de possíveis alternativas energéticas que tenham potencial para alterar o cenário de geração de energia baseado em combustíveis fósseis, o que inclui estudos sobre potencial energético dos recursos, disponibilidade no ambiente, níveis de emissão de poluentes e técnicas de extração desses recursos, sendo esse último tema abordado com detalhes ao longo do trabalho realizado. A partir desses estudos, torna-se possível o desenvolvimento de ideias e experimentos que contribuem diretamente com o avanço no setor, não apenas para o desenvolvimento da exploração de fontes alternativas, mas também para o desenvolvimento da exploração de recursos consolidados.

Em se tratando dos processos de perfuração e construção dos poços propriamente ditos, foi observada certa semelhança em termos de mecanismos de exploração, visto que a construção de todos os poços passa pela mesma série de processos e a extração de recursos é realizada através de métodos de bombeamento com princípios semelhantes, além de existirem algumas semelhanças dentro dos processos de construção, como no estudo da geologia, no revestimento, na cimentação, nos tipos de broca utilizados, dentre outras. Tais semelhanças, sobretudo as existentes entre os poços petrolíferos e geotérmicos, refletem a influência da perfuração de poços petrolíferos na extração de recursos naturais em elevadas profundidades, uma vez que essa atividade foi a precursora das demais técnicas de perfuração existentes, as quais passaram por uma série de adaptações para serem empregadas na exploração de outros recursos (CULVER, 1991; FEITOSA *et al.*, 2008; SOULSBY, 2010). No entanto, em função da natureza dos recursos explorados e das diferentes características dos reservatórios, as quais estão diretamente relacionadas ao processo de formação desses elementos, foi observada uma série de particularidades dentro dos processos de perfuração, desde os métodos empregados no estudo da geologia, até o processo de bombeamento. Tais diferenças ilustram as adaptações que foram necessárias

para que os métodos de perfuração e construção de poços pudessem ser adequados para a exploração dos diferentes recursos.

De forma mais específica, poços para a exploração de água subterrânea apresentaram maiores variedades de métodos de estudos geológicos, tipos de broca, métodos de perfuração, material no revestimento, dentre outras categorias, por não ter armazenamento restrito a um único tipo de solo, além de não apresentar condições extremas de temperatura e pressão por permanecer em regiões mais próximas da superfície. Assim, sua exploração envolve diferentes alternativas, a depender do tipo de solo e da profundidade que o reservatório está localizado. No caso dos poços geotérmicos, o maior desafio encontrado são as elevadas temperaturas e pressões dos reservatórios explorados, que condicionam todas as técnicas, materiais e equipamentos que são utilizados. Além disso, por conta da existência de um gradiente geotérmico, apesar de as formações serem majoritariamente duras e abrasivas, existe certa heterogeneidade nas regiões mais próximas da superfície terrestre que imprimem algumas dificuldades na construção dos poços e impactam diretamente nos custos de exploração. No caso dos poços para a extração de petróleo e gás, em função de a exploração ocorrer tanto em formações sedimentares consolidadas como em formações não consolidadas, existe certa flexibilidade em termos de métodos de perfuração, fluidos de perfuração, tipos de broca, dentre outras categorias. No entanto, a exploração desses dois recursos é consideravelmente consolidada, de modo que, apesar de existirem avanços nessa área, os métodos, materiais e equipamentos mais eficientes são bem determinados, tornando o procedimento de exploração bem definido na grande maioria das ocasiões.

Por fim, a análise de custos demonstrou que nas profundidades mais comuns entre poços geotérmicos e petrolíferos *onshore* e verticais, que seria a faixa de 1 a 4 km, os custos dos poços geotérmicos são mais elevados por conta de uma série de fatores que incluem perda de circulação, heterogeneidade da formação e elevadas temperaturas nos reservatórios. Já em profundidades próximas de 5000 metros, há uma tendência de inversão desse cenário, o que está relacionado ao elevado risco apresentado pelos poços petrolíferos em função da sua elevada pressão. A análise de custos realizada, embora tenha sido uma análise baseada em uma modelagem matemática desenvolvida empiricamente, apresentou um caráter teórico que limitou o resultado obtido e dificultou o detalhamento desse resultado em busca de explicações para os fenômenos observados. Desse modo, sugere-se a realização de estudos mais técnicos e práticos, a partir do contato com empresas do ramo e de análises cautelosas das etapas do processo de perfuração e construção do poço, de modo

a destacar o impacto de cada etapa nos custos totais de perfuração e assim, identificar com maior precisão os motivos que explicam a tendência observada no presente estudo.

5.2 RECURSOS HUMANOS

Em função do caráter mais abrangente e teórico da análise comparativa realizada, foi possível identificar pontos fundamentais a serem conhecidos por pessoas interessadas a se aprofundar no assunto abordado, por engenheiros que pretendem perfurar poços para a exploração de cada um dos recursos, por professores que pretendem realizar explicações sobre o tema, dentre outros. Primeiramente, é necessário que se tenha o conhecimento geral do processo de perfuração, construção e exploração dos poços (estudo da geologia, *design* do poço, perfuração, revestimento, cimentação, completação e bombeamento) e o objetivo principal de cada uma das etapas realizadas, pois é a partir dessa ideia geral que surgem as especificações relativas à adaptação para a exploração de um determinado recurso. Ademais, é importante que se tenha conhecimento das características específicas de cada um dos recursos explorados e do tipo de solo que compõe o reservatório onde os recursos são armazenados. No caso estudado, é importante que se tenha conhecimento dos tipos de soluto que compõem a água subterrânea e os tipos de compostos associados ao petróleo e gás natural, os quais determinam as propriedades físico-químicas desses recursos, além dos elementos que garantem o caráter corrosivo do fluido geotérmico, extraído para a exploração do calor. Além disso, é importante que se tenha em mente que a água subterrânea é encontrada em menores profundidades e em diferentes tipos de formações rochosas (sedimentares, abrasivas, carbonáticas, dentre outras), ficando armazenadas em aquíferos, enquanto fluidos geotérmicos ficam armazenados em reservatórios profundos de alta temperatura e pressão, compostos por rochas magmáticas de elevada dureza e abrasividade, e o petróleo e gás natural em formações sedimentares de elevada porosidade.

Por fim, é importante que se tenha conhecimento de que cada uma das etapas nos processos de perfuração apresenta técnicas, materiais e equipamentos adaptados ao tipo de recurso explorado, levando em consideração principalmente sua composição química e as propriedades do solo perfurado. Assim sendo, as técnicas de estudos da geologia buscam por características diferentes para a determinação dos locais de armazenamento, o *design* do poço é feito com base nas profundidades e características dos reservatórios, os métodos de perfuração, as brocas e os fluidos de perfuração devem ser apropriados para os tipos de solo perfurados, o revestimento e a cimentação devem ser selecionados com base nas

formações rochosas e na composição químicas dos fluidos, a completação depende da capacidade do fluido de fluir para o interior do poço e da pressão presente no reservatório, e o método de bombeamento deve ser selecionado com base nas condições de temperatura e pressão do reservatório e na composição do recurso. No caso estudado, é importante ter em mente que, por conta da variedade de formações rochosas onde são encontradas as águas subterrâneas, da menor profundidade dos reservatórios e das condições menos extremas de temperatura e pressão em que são encontradas, sua exploração é um pouco mais simplificada e diversificada que a dos demais recursos estudados. Já a perfuração geotérmica, por ocorrer em reservatórios de composição rochosa dura e abrasiva, além de envolver elevadas temperaturas e pressões, envolve materiais, equipamentos e técnicas que apresentam elevada resistência térmica e boas propriedades dentro dessas condições, o que inclui o método de perfuração rotopercussivo, o revestimento com materiais como termoplásticos, brocas de diamante sintético adaptadas para uso em elevada temperatura, dentre outros elementos. Finalmente, no caso do petróleo e do gás natural, embora sejam recursos de propriedades diferentes dos demais e sejam armazenados em reservatórios sedimentares, diferentemente de fluidos geotérmicos por exemplo, em função da sua elevada importância econômica, apresentam pioneirismo na exploração e, por isso, algumas características similares às demais explorações. De forma geral, as técnicas, materiais e equipamentos são selecionados levando em consideração a necessidade de sustentação das paredes do poço, a elevada viscosidade do recurso extraído e as elevadas pressões existentes por conta da profundidade dos reservatórios.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Estudo sobre o aproveitamento do gás natural do pré-sal**. São Paulo: ANP, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/arquivos/aproveitamentognpresal.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Acervo de dados**. São Paulo: ANP, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/acervo-de-dados>. Acesso em: 17 nov. 2022.
- ANJOS, H. V. P. **Estimativa do potencial mundial e brasileiro do aproveitamento de energia geotérmica para geração de eletricidade e uso direto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024896.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**: section 05 – petroleum products, lubricants and fossil fuels. 5th ed. Pennsylvania: ASTM International, 2011. Disponível em: <https://www.astm.org/products-services/astm-bos-5.html>. Acesso em: 01 set. 2022.
- ARBOIT, N. K. S. *et al.* Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil: uma revisão de literatura. **Revista do departamento de geografia – USP**, São Paulo, SP, v. 26, n. 2013, p. 155-168, dez. 2013. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/75194>. Acesso em: 13 jul. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo: ABCP, 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- AYLING, B. F.; ROBERT, A. H.; PETER E. R. Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia. **Geothermics**, Taupo, v. 63, n. 2016, p. 15-26, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375650515000395>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- BAKER, R. **A primer of oilwell drilling**. Houston: Petroleum Extension Services, 1979. *E-book*.
- BARBOSA, L. F. M. **Drilling optimization of petroleum and natural gas wells: application of artificial intelligence**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/180784>. Acesso em: 30 set. 2022.
- BOVOLATO, L. E. **Uso e gestão das águas subterrâneas em Araguaína/TO**. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual

Paulista, Presidente Prudente, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105019>. Acesso em: 10 out. 2022.

BLODGETT, L.; SLACK, K. **Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use**. Washington: Geothermal Energy Association, 2009. *E-book*.

BRASIL, A. N. **Bombas: classificação e descrição**. São Paulo: USP, 2022. Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasclassificacaoedescricao.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. **Geothermal energy: bgs research**. London: BGS, 2022. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/geothermal-energy/>. Acesso em: 27 out. 2022.

BRITISH PETROLEUM COMPANY PLC. **Statistical review of world energy 2022**. London: BP PLC, 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.

BRITO, M. C. A. D. **Desenvolvimento compartilhado de reservatórios comuns entre estados**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. *E-book*.

CARDOSO, F. B. F. C. 2016. **Poços para a captação de águas subterrâneas**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/eventos/oficinas-de-intercambio-1/aguas-subterraneas-1/oficina-aguas-subterraneas-brasilia-2016/apresentacoes-ana/ana-2-hidrogeologia-pocos-fabricio-bueno.pdf>. Acesso em: 27 out. 2022.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia**. Rio de Janeiro: FDocuments, 2006. Disponível em: <https://fddocuments.net/document/apostila-de-hidrologia-568838d76f2a0.html?page=1>. Acesso em: 10 out. 2022.

CASTRO, N. J. *et al.* A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica brasileira. In: SEMINÁRIO DE GERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL FUNDAÇÃO MAPFRE, 5., 2009, Rio de Janeiro. **Palestras [...]**. Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do Setor Elétrico, 2009. Disponível em: <https://dokumen.tips/documents/a-importancia-das-fontes-alternativas-e-renovaveis-na-potencial-brasileiro.html?page=1>. Acesso em: 15 out. 2022.

CAVALCANTE, I. R. M. **Estudo de caso para a caracterização e avaliação de soluções tecnológicas, econômicas, ambientais e políticas no pré-sal resoluto a exploração no campo de libra**. 2016. Monografia (Especialização em Engenharia de Energia) – Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: https://fga.unb.br/articles/0001/6992/TCC1_Irville_Petr_leo_FINAL.pdf. Acesso em: 23 jul. 2022.

CAVALCANTI NETO, M. T. O. **Petróleo e gás: noções básicas para alunos do ensino médio**. Natal: IFRN Editora, 2016. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/963/Petroleo%20e%20Gas%20-%20Ebook.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 set. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas subterrâneas**. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/>. Acesso em: 23 set. 2022.

CONFESSOR, S. L. M.; SILVA, B. R. A. S.; SOUZA, L. G. V. M. Avaliação do potencial de produção dos recursos geotermiais: um estudo de caso no município de Mossoró/RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/issue/view/2>. Acesso em: 20 set. 2022.

COSTA, R. C. Fluidos de perfuração, conceitos de perfuração petrolífera aplicados à perfuração de poços de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 1992, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1992. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24146/16168>. Acesso em: 07 out. 2022.

COSTA FILHO, W. D. *et al.* **Noções básicas sobre poços tubulares**: cartilha informativa. Recife: CPRM, 1998. *E-book*.

CULVER, G. Drilling and well construction. In: LIENAU, P. J.; LUNIS, B. C. **Geothermal direct use engineering and design handbook**. Idaho: Geo-Heat Center, 1991. cap. 6, p. 115-152.

CURKAN, B.; KLACZEK, W.; REEDE, C. High temperature ESPs for geothermal production: the ideal pump. In: GEOTHERMAL RESOURCES COUNCIL ANNUAL MEETING, 42., 2018, Reno. **Proceedings [...]**. Reno: Curran Associates Inc, 2018. Disponível em: <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1034019.pdf>. Acesso em: 03 out. 2022.

DAVIS, L. D. **Rotary drilling**: rotary, kelly, swivel, tongs, and top drive. Austin: PETEX, 1995. *E-book*.

DIPIPO, R. **Geothermal power plants**: principles, application, case studies and environmental impact. Dartmouth: Butterworth-Heinemann, 2012. *E-book*.

DEPLÁCIDO, N. F. **Água, preservação, uso e conservação**: subsídios teórico-práticos para o ensino fundamental. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/118867>. Acesso em: 23 set. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 22 nov. 2022.

EUROPEAN WAY. **Qualidade do ar de Islândia e Finlândia é a melhor do mundo, diz estudo.** São Paulo: European Way, 2019. Disponível em: <https://europeanway.com.br/qualidade-do-ar-de-islandia-e-finlandia-e-a-melhor-do-mundo-diz-estudo/>. Acesso em: 27 set. 2022.

FANCHI, J. R.; CHRISTIANSEN, R. L. **Introduction to petroleum engineering.** Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2017. Disponível em: <http://182.72.188.194:8080/jspui/bitstream/123456789/1493/1/Introduction%20to%20Petroleum%20Engineering%20by%20John%20R.%20Fanchi.pdf>. Acesso em: 21 set. 2022.

FARACINI, J. C. B. **Classificação hidroquímica das águas subterrâneas do aquífero Serra Geral na porção centro norte do estado de São Paulo.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/118969>. Acesso em: 23 set. 2022.

FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados:** definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade. Rio de Janeiro: LTC, 2013. *E-book*.

FASTNERSWEB. **Button bits.** Mumbai: Fastnersweb, 2022. Disponível em: <https://www.fastenersweb.com/impcat/button-bits>. Acesso em: 28 out. 2022.

FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrogeologia:** conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. *E-book*.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology.** Columbus: Merrill Publishing, 1988. *E-book*.

FINGER, J.; BLANKENSHIP, D. **Handbook of best practices for geothermal drilling.** Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2010. *E-book*.

FITTS, C. R. **Águas subterrâneas.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. *E-book*.

FUNDAÇÃO OLIVEIRA GONÇALVES DE APERIBÉ LTDA. **Linha de bombas.** Aperibé: FOGAL, 2022. Disponível em: https://www.fundicaofogal.com.br/lista_produtos.php?cod=5. Acesso em: 16 nov. 2022.

FREITAS, K. P. M.; SOUZA, P. S. A. **A arte da elevação de fluidos de petróleo.** Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2021. *E-book*.

GARCIA BAUTISTA, D. F. **Estudo dos sistemas petrolíferos no setor central da bacia dos Llanos Orientales, Colômbia:** um modelo para explicar as mudanças na qualidade do petróleo. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=97925. Acesso em: 19 set. 2022.

GAUTO, M. A. *et al.* **Petróleo e gás:** princípios de exploração, produção e refino. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2016. *E-book*.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo: Oficina do Texto, 2013. *E-book*.

GILL DRILLING SERVICES. **DTH hammers**. South Carolina: Gill Drilling Services, 2020. Disponível em: <https://www.gilldrilling.com/dth-hammers.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Edusp, 2003. *E-book*.

GUPTA, H.; ROY, S. **Geothermal energy**: an alternative resource for the 21st century. Amsterdam: Elsevier, 2006. *E-book*.

HAGER, F. P. V.; D'ALMEIDA, M. L. Legislação aplicada às águas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/23747/15816/86124>. Acesso em: 29 set. 2022.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J.; BERTOLO, R. Águas subterrâneas: longe dos olhos, longe dos corações e das ações para sua proteção. **Acta paulista de enfermagem**, São Paulo, SP, v. 29, n. 6, p. 3-4, dez. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ape/a/3HD44mNbHXt96v9bqjsRGCq/>. Acesso em: 13 jun. 2022.

HOMELAND INFRASTRUCTURE FOUNDATION-LEVEL DATA. **Oil and natural gas wells**. Washington: HIFLD, 2019. Disponível em: <https://hifld-geoplatform.opendata.arcgis.com/datasets/oil-and-natural-gas-wells/explore?location=26.886021%2C-109.717264%2C3.57&showTable=true>. Acesso em: 17 nov. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Energy profile**: Iceland. Masdar City: IRENA, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/IRENADocuments/Statistical_Profiles/Europe/Iceland_Europe_RE_SP.pdf. Acesso em: 26 set. 2022.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3922?show=full>. Acesso em: 11 out. 2022.

ISSA, T. C. **O papel do gás de petróleo na matriz energética brasileira**: presente e futuro. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123057>. Acesso em: 28 set. 2022.

KANA, J. D. *et al.* A review of geophysical methods for geothermal exploration. **Renewable and sustainable energy reviews**, London, v. 44, n. 5, p. 87-95, Apr. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews/vol/44/suppl/C>. Acesso em: 29 set. 2022.

KAYA, T.; MERTOGLU, O. Engineering aspects of geothermal production well with down hole pumps. *In: WORLD GEOTHERMAL CONGRESS*, 25., 2005, Antalya. **Proceedings**[...]. Antalya: IGA, 2005. Disponível em: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/1029.pdf>. Acesso em: 14 set. 2022.

LACERDA, J. M. D. A. F. Gestão de recursos naturais (grn) e conflitos. **Revista política hoje**, Recife, PE, v. 23, n.1, p. 25-64, dez. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3753>. Acesso em: 21 set. 2022.

LUKAWSKI, M. Z. *et al.* Cost analysis of oil, gas and geothermal well drilling. **Journal of petroleum science and engineering**, Amsterdam, v. 118, p. 1-14, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410514000813>. Acesso em: 29 nov. 2022.

LUND, J. W.; BOYD, T. L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. **Geothermics**, Klamath Falls, v. 60, p. 66-93, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037565051500156X>. Acesso em: 20 aug. 2022.

LYRA, M. Recursos naturais: gás natural. **Revista política hoje**, Recife, PE, v. 23, n.1, p. 149-174, dez. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3758/3062>. Acesso em: 28 set. 2022.

MA, T.; CHEN, P. ZHAO, J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources. **Geomechanics and geophysics for geo-energy and geo-resources**, Geneva, v. 2, n. 10, p. 365-395, Aug. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40948-016-0038-y>. Acesso em: 20 set. 2022.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: LTC, 1997. *E-book*.

MALOUF, L. R. **Análise das operações de perfurações de poços terrestres e marítimos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Escola Politécnica UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9577>. Acesso em: 30 set. 2022.

MANZELLA, A. **Geochemical and geophysical methods in geothermal exploration**. Pisa: International Institute for Geothermal Research, 1999. Disponível em: https://hendragrandis.files.wordpress.com/2009/04/a_manzella.pdf. Acesso em: 4 out. 2022.

MENDES, G. F. *et al.* Algumas bacias sedimentares brasileiras. *In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS*, 2., 2016, Natal. **Anais** [...]. Natal: Realize Eventos Científicos e Editora Ltda, 2016. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/26787>. Acesso em: 11 out. 2022.

MÉTODOS de elevação artificial com o prof. Alexandre Leiras [por] Alexandre Leiras. [S.l.: s.n], 2021. 1 vídeo (1:46:00 h). Publicado pelo canal SENAI CIMATEC. Disponível em:

https://www.youtube.com/results?search_query=PALESTRA+ALEXANDRE+LEIRAS. Acesso em: 05 out. 2022.

MOHAMED, A.; SALEHI, S.; AHMED, R. Rheological properties of drilling fluids containing special additives for geothermal drilling applications. *In: WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING STANFORD UNIVERSITY*, 46., 2021, Stanford. **Proceedings** [...]. Stanford: Stanford University, 2021. Disponível em: https://gdr.openet.org/files/1445/46th%20Workshop%20on%20Geothermal%20Reservoir%20Engineering_Rheological%20Properties%20of%20Drilling%20Fluids%20Containing%20Special%20Additives%20for%20Geothermal%20Drilling%20Applications.pdf. Acesso em: 13 out. 2022.

MORAIS, D. S. **Caracterização do sistema petrolífero das águas rasas da bacia do Espírito Santo com a aplicação de técnicas geofísicas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/110570>. Acesso em: 25 out. 2022.

NEAVE, A. Heat pumps and their applications. *In: SNOW, D. **Plants engineer's reference book***. 2nd ed. Leicester: Butterworth-Heinemann, 2002. chap. 41, p. 41.1 – 41.9.

NELSON, E. B.; EILERS, L. H.; SPANGLE, L. B. Evaluation and development of cement systems for geothermal wells. *In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION*, 1981, San Antonio. **Proceedings** [...]. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 1981. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/6465542>. Acesso em: 15 nov. 2022.

NGUGI, P. K. Geothermal well drilling. *In: SHORT COURSE ON EXPLORATION OF GEOTHERMAL RESOURCES*, 3., 2008, Lake Naivasha. **Proceedings**[...]. Lake Naivasha: Kengen, 2008. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/350684520/well-drilling-pdf>. Acesso em: 05 out. 2022.

THE ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Glossary of statistical terms**. Paris: OECD, 2022. Disponível em: <http://stats.oecd.org/glossary/>. Acesso em: 21 set. 2022.

PÁLSSON, B. *et al.* Drilling of the well IDDP-1. **Geothermics**, United States, v. 49, n. 2014, p. 23-30, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375650513000722>. Acesso em: 22 set. 2022.

PEIXOTO, R. H. **Estudo da tecnologia e processos de extração em poços de petróleo**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/120470>. Acesso em: 05 out. 2022.

PEREIRA, L. L. S. **Análise de motobombas submersas com diferentes acionamentos elétricos a partir da roda de falhas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/23550>. Acesso em: 15 nov. 2022.

PETROLEUM GEOSCIENCE TECHNOLOGY. **Geologia do petróleo**. Rio de Janeiro: PGT, 2010. Disponível em: https://albertowj.files.wordpress.com/2010/03/geologia_do_petroleo.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

PIERCE, M. *et al.* Innovative integration of pumping and power production in the binary cycle. **GRC transactions**, Frisco, v. 37, n. 3, p. 767-770, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1030657>. Acesso em: 22 set. 2022.

PLÁCIDO, J. C. R.; PINHO, R. **Brocas de perfuração de poços de petróleo**. Rio de Janeiro: Falando de Química, 2009. Disponível em: https://falandodquimica.weebly.com/uploads/2/4/5/2/2452165/apostila_de_brocas.pdf. Acesso em: 30 set. 2022.

PROMINAS BRASIL EQUIPAMENTOS LTDA. **Apostila de perfuração de poços pelo sistema rotativo**. São Paulo: Tapas Comunicação, 2015.

REIS, P. **Energia geotérmica e o calor da terra**. São Paulo: Portal Energia, 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-geotermica-calor-da-terra/>. Acesso em: 27 set. 2022.

RN TECNOLOGIA. **Conheça os 4 principais métodos de elevação de petróleo**. Natal: RN Tecnologia, 2021. Disponível em: <https://rntecnologia.com.br/en/metodos-de-elevacao-de-petroleo/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

ROCHA, M. F. F.; ALENCAR, L. V. T. D.; BARROS, B. C. Revestimento e cimentação: tipos, funções e importância das escolhas adequadas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 9., 2017, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: ABPG, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/27048>. Acesso em: 21 set. 2022.

SANTOS, J. L.; MONTEIRO, E. S.; GUIMARÃES, Y. Revestimento e cimentação de poços de petróleo. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/27047>. Acesso em: 23 set. 2022.

SAPINSKA-SLIWA, A. *et al.* Rotary-percussion drilling method: historical review and current possibilities of application. **AGH drilling, oil, gas**, Kraków, v. 32, n. 2, p. 313-323, Jan. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283427119_Rotary_percussion_drilling_method_-_historical_review_and_current_possibilities_of_application. Acesso em: 05 out. 2022.

SELLEY, R. C.; SONNENBERG, S. A. **Geologia do petróleo**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. *E-book*.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **SIAGAS**: sistema de informações de águas subterrâneas. Brasília: CPRM, 2012. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 27 set. 2022.

SILVA, C. L. O. **Processos de exploração e produção de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Náuticas) – Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.repositorio.mar.mil.br/handle/ripcmb/30230/browse?type=publisher&sort_by=1&order=ASC&rpp=20&etal=-1&value=Centro+de+Instru%C3%A7%C3%A3o+Almirante+Gra%C3%A7a+Aranha+%28CIAGA%29&starts_with=C%C3%81SSIO+LUCAS. Acesso em: 19 out. 2022.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks**. New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2010. *E-book*.

SOULSBY, D. **Technical review**: borehole drilling and rehabilitation under field conditions. Genebra: International Committee of the Red Cross, 2010. Disponível em: https://www.icrc.org/en/doc/assets/files/other/icrc_002_0998.pdf. Acesso em: 07 set. 2022.

SOUZA, H. M.; VELOSO, A. V. Utilidade do revestimento e da cimentação na indústria petrolífera. **Ciências exatas e tecnológicas**, Aracajú, SE, v. 4, n. 2, p. 11-24, out. 2017. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/download/4093/2460>. Acesso em: 19 set. 2022.

SOUZA FILHO, M. N. **Avaliação do potencial geotérmico da bacia sedimentar de Taubaté**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/867840>. Acesso em: 19 set. 2022.

SUN, L. *et al.* Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China. **Petroleum exploration and development**, Beijing, v. 40, n. 6, p. 687-695, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380413600932>. Acesso em: 10 out. 2022.

SUN, L. *et al.* Innovation and prospect of geophysical technology in the exploration of deep oil and gas. **Petroleum exploration and development**, Beijing, v. 42, n. 4, p. 454-465, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380415300380>. Acesso em: 13 out. 2022.

TEIXEIRA, J. P. B. **Gás natural**: o energético mais competitivo. Rio de Janeiro: PoD Editora, 2015. *E-book*.

TEODORIU, C.; CHEUFFA, C. A comprehensive review of past and present drilling methods with application to deep geothermal environment. *In*: WORKSHOP ON

GEOHERMAL RESERVOIR ENGINEERING, 36., 2011, Stanford. **Proceedings** [...]. Stanford: Stanford University, 2011. Disponível em: <https://es.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2011/teodoriu.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da engenharia do petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2001. *E-book*.

TIMM, L. P. **Caracterização e modelagem de reservatórios do membro Mucuri, bacia do Espírito Santo, Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172329/001059169.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 out. 2022.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. São Paulo: ABES, 2006. *E-book*.

TURGEON, A.; MORSE, E. **Geothermal energy**. Washington: National Geographic, 2012. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/geothermal-energy/>. Acesso em: 27 set. 2022.

ZOET, A. *et al.* **Geothermal 101: the basics and applications of geothermal energy**. Minneapolis: Dovetail Partners Inc, 2011. Disponível em: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2013/09/DovetailGeothermal0911.pdf>. Acesso em: 11 out. 2022.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AZAR, M. *et al.* A new approach to fixed cutter bits. **Oilfield review**, London, v. 2, n. 27, p. 30-35. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283646828_A_new_approach_to_fixed_cutter_bits. Acesso em: 10 out. 2022.

BRUHN, D. Geophysical exploration methods at european sites. *In*: EAGE CONFERENCE AND EXHIBITION – WORKSHOPS AND FIELDTRIPS, 70., 2008, Roma. **Proceedings** [...]. Potsdam: European Association of Geoscientists & Engineers, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301384054_Geophysical_exploration_methods_at_European_sites. Acesso em: 13 out. 2022.

BURTON, G. *et al.* PDC bit technology for the 21st century. **Oilfield review**, London, 2015, v. 2, n. 27, p. 48-57. Jan. 2015. Disponível em: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/4-pdc-bit-2-english>. Acesso em: 29 set. 2022.

DRISCOLL, F. G. **Groundwater and wells**. St. Paul: Johnson Screens, 1986. *E-book*.

FREITAS, K. P. M.; SOUZA, P. S. A. **A arte da elevação de fluidos de petróleo**. Nova Xavantina: Pantanal Editora, 2021. *E-book*.

GEORGSSON, L. S. Geophysical methods used in geothermal exploration. *In*: SHORT COURSE ON EXPLORATION FOR GEOTHERMAL RESOURCES, 8., 2013, Lake Naivasha. **Proceedings** [...]. Lake Naivasha: UNU-GTP; GDC; KenGen, 2013. Disponível em: <https://raflhadan.is/bitstream/handle/10802/5292/UNU-GTP-SC-17-0401.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 out. 2022.

MITCHELL, R. F.; MISKA, S. Z. **Fundamentals of drilling engineering**. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011. *E-book*.

PROMINAS BRASIL EQUIPAMENTOS LTDA. **Manual de sistemas de perfuração com ar comprimido**. São Paulo: Tapas Comunicação, 2015.

RODRIGUES, B. S. O. **Interpretação básica de perfis geofísicos de poços utilizando linguagem FORTRAN 95 e softwares livres**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Betina-Rodrigues.pdf>. Acesso em: 13 set. 2022.

SANTANA, J. S.; CAMPOS, H. T.; CARDOSO, E. S. *Kick e blowout* na exploração de poços de petróleo: uma revisão. **Revista de engenharia e tecnologia**, São Paulo, SP, v. 13, n. 2, p. 182-194, jun. 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17710>. Acesso em: 11 out. 2022.

SHOR, R. J. *et al.* Evaluation of hammer drill bit performance in rotary percussive drilling. *In*: WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING, 47., 2022, Stanford. **Proceedings** [...]. Stanford: Stanford University, 2022. Disponível em:

<https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2022/Shor.pdf>. Acesso em: 02 out. 2022.

SMITH, K. D. **Cementing**. Dallas: Millet the Printer Inc, 1976. *E-book*.

STEVANATO, A. C. R. S. **Análise petrofísica de reservatórios**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia do Petróleo) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=516121>. Acesso em: 10 ago. 2022.

VISSER, C. F. *et al.* **Geothermal drilling and completions: petroleum practices technology transfer**. Denver: NREL, 2018. *E-book*.

VOLLMAR, D.; WITTIG, V.; BRACKE, R. Geothermal drilling best practices: the geothermal translation of conventional drilling recommendations – main potential challenges. **IGA academy report**, Bochum, v.1, n. 104, p. 1-12, June 2013. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Geothermal-Drilling-Best-Practices%3A-The-Geothermal-Wittig-Vollmar/c27442faab31bc83f4de81ab55278eb1b02b2990>. Acesso em: 20 set. 2022.

APÊNDICE A – Bases de dados de poços de petróleo e gás consultadas

Nome	País	Profundidade total (pés)	Profundidade total (m)	Ano	Fonte
Cypress 28 Federal #H001	EUA	10275	3132	2009	HIFLD (2019)
7-SE-58-RN	Brasil	10295	3138	2007	ANP (2020)
Cypress 33 Federal #H002	EUA	11400	3475	2009	HIFLD (2019)
Frye 11	EUA	4135	1260	2007	HIFLD (2019)
Federal 9-12-9-18	EUA	15433	4704	2009	HIFLD (2019)
Myox 16 State COM #007	EUA	8836	2693	2009	HIFLD (2019)
Wyat Draw 29 State COM #001	EUA	9850	3002	2009	HIFLD (2019)
Boomerang BTR State #002	EUA	9500	2895	2009	HIFLD (2019)
Banjo BNO Federal #001	EUA	8700	2652	2009	HIFLD (2019)
Wild Cap State #005H	EUA	9223	2811	2009	HIFLD (2019)
Cholla 1 Federal #014	EUA	8950	2728	2009	HIFLD (2019)
Caprock 35 State #001H	EUA	8859	2700	2009	HIFLD (2019)
Mobil Federal #010	EUA	8024	2446	2009	HIFLD (2019)
7-CAM-1278-RN	Brasil	3708	1130	2009	ANP (2020)
Judd Estate State	EUA	19140	5009	2007	HIFLD (2019)
Benedict	EUA	19488	5100	2008	HIFLD (2019)

APÊNDICE B – Bases de dados de poços geotérmicos consultadas

Nome	País	Profundidade total (pés)	Profundidade total (m)	Ano	Fonte
AWI 7-8	Insonésia	9250	2819	2008	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
AWI 20-1	Indonésia	8872	2704	2008	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-1	EUA	10825	3299	2009	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-2	EUA	8425	2568	2009	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-3	EUA	7622	2323	2009	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
IDDP-1	Islândia	6877	2096	2009	Pálsson <i>et al.</i> (2013)
US-10	EUA	11753	3582	2010	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-11	EUA	12340	3761	2010	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-12	EUA	11687	3562	2010	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
US-13	EUA	9976	3041	2010	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
New Zeland 1	Nova Zelândia	7566	2306	2008	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
New Zeland 2	Nova Zelândia	6847	2087	2008	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
New Zeland 3	Simulação	20001	6096	2008	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
LC-US-3	EUA	4050	1234	2009	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
LC-US-2	EUA	4010	1222	2009	Lukawski <i>et al.</i> (2014)
Impact Tech 1	Simulação	21001.681	6401	2012	Lukawski <i>et al.</i> (2014)