

ANÁLISE COMPARATIVA DE RECURSOS NATURAIS: ÁGUA, GEOTERMIA E PETRÓLEO

Thales Maluf, t.maluf@unesp.br¹

Nazem Nascimento, nazem.nascimento@unesp.br²

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá-SP.

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá-SP.

Resumo. Atualmente, os recursos oferecidos pela natureza vêm sendo explorados de forma intensiva por conta de sua importância para diversas áreas da sociedade. Assim sendo, torna-se essencial um estudo desses recursos para que a exploração não seja excessivamente degradante e se torne mais eficiente, de modo a preservá-los da melhor maneira possível. Tendo isso em vista, o estudo realizado tem o principal objetivo de desenvolver uma comparação técnica entre água subterrânea, petróleo e geotermia, que são três recursos amplamente utilizados para geração de energia e outras atividades. Utilizando como principal base de análise o estudo de referências bibliográficas pertinentes, a comparação entre esses recursos naturais evidenciará divergências em termos de formação no subsolo, em termos de composição, em termos de utilização e relevância no mundo atual e em termos exploratórios.

Palavras-chave: água, petróleo, geotermia, comparação

Abstract. The resources offered by the nature nowadays are being intensively explored due to their importance in many areas of the society. Therefore, a study of these resources becomes essential not just so the exploration can be less degradant and more efficient, but also for the preservation of the resources. That being said, this study has the main goal of developing a technical comparison between underground water, oil and geothermal sources, which are widely used in the energy generation field and other activities. Using bibliographical references as the main source of analysis, the comparison between the resources previously mentioned will point differences in terms of formation underground, chemical composition, use and relevance in the world and exploration.

Keywords: water, oil, geothermal sources, comparison

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade atual está diretamente ligado com a exploração de recursos provenientes da natureza, pois são esses recursos que se constituem como as principais fontes de energia disponíveis além de fazerem parte de diversas atividades exercidas pela população mundial. Nesse cenário, três recursos que devem ser destacados ou pela sua vital importância em termos de geração de energia e utilização no dia a dia, ou pelo seu potencial de crescimento para emprego em diversas áreas são: a água, o petróleo e a geotermia.

Por definição, os recursos naturais podem ser caracterizados como recursos formados por processos naturais, sem interferência antrópica, podendo se dividir em dois grandes grupos com base em sua capacidade de esgotamento: o grupo dos recursos naturais renováveis e dos recursos naturais não renováveis. Os recursos naturais renováveis são os recursos que, após serem explorados, podem voltar aos seus níveis de estoque anteriores após um processo natural de crescimento ou reabastecimento, enquanto os recursos naturais não renováveis constituem-se nos recursos que não podem ser recolocados pelo homem ou renovados pelo próprio ambiente após a exploração (OECD, 1997). Essa definição é uma característica importante para análise comparativa dos recursos que são objetivo de estudo dessa análise.

1.1. Água subterrânea

A água, que é um recurso natural renovável, apresenta uma grande importância tanto em termos energéticos, quanto em termos biológicos e até sociais (Deplácido, 2008). Embora apresente um ciclo próprio, conhecido como ciclo hidrológico, ela não deve ser tratada como um recurso infindável, pois a difusão dessa ideia pode afetar diretamente a sua preservação. Dando um enfoque maior à água subterrânea, que é objeto de estudo da análise desenvolvida, é possível afirmar que compõe grande parte do volume de água doce disponível para consumo, permanecendo armazenada em

aquíferos de onde são extraídas para os mais diversos usos, como por exemplo para abastecimento público, produção de alimentos, irrigação, dentre outras áreas (Hirata *et al.*, 2010).

2.2 Geotermia

A geotermia, ou energia geotérmica, é um recurso natural renovável que não é consolidado como um dos principais recursos naturais a serem explorados, mas que vem ganhando espaço ao longo dos últimos anos principalmente na área de controle térmico de ambientes (Fitts, 2015). Consiste basicamente no calor proveniente do interior da terra, e pode ser extraído através da perfuração de poços associada com a utilização de fluidos, especialmente a água, para que se torne viável a sua utilização (Blodgett e Slack, 2009). Estudos recentes visam a ampliação de sua exploração para geração de energia elétrica em larga escala, principalmente por constituir-se como uma fonte considerada como confiável (Arboit et al, 2013).

2.3 Petróleo

O petróleo é um recurso natural não renovável amplamente conhecido por apresentar um conteúdo energético muito elevado. Apresenta não só importância em termos de geração de energia, mas também apresenta elevada importância econômica, justamente por conta dessa sua característica. O petróleo é mais um recurso extraído do subsolo, sendo que essa extração é feita através de processos de elevada complexidade e de elevados custos (Fanchi e Christiansen, 2016). Sua aplicação, além da geração energética, na forma de combustível principalmente, é extremamente variada por conta de seus derivados, os quais são empregados em áreas envolvendo desde a produção de plásticos até a lubrificação de componentes (Farah, 2013).

2. METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido traçará um comparativo entre água subterrânea, petróleo e energia geotérmica, levando-se em consideração aspectos como formação no subsolo, composição química básica, áreas de utilização e meios de exploração, buscando as principais semelhanças e diferenças entre esses recursos.

A coleta de informações para traçar tal comparação baseia-se em uma revisão bibliográfica de fontes que tratam desses recursos não apenas em termos de relevância e utilização no mundo atual, mas que também tratam de aspectos técnicos relacionados às suas características particulares, o que permitirá a realização de um estudo comparativo mais completo e com embasamento qualificado.

3. RESULTADOS

Após feita a análise detalhada de cada um dos recursos, foi possível realizar a coleta de informações de cada um destes individualmente. Esse estudo individual dos recursos, que será descrito a seguir, serve como ponto de partida para a análise comparativa, que é o principal objetivo do trabalho.

3.1 Água subterrânea

3.1.1 Formação no subsolo e composição química básica

A água subterrânea, por definição, consiste na água que circula em espaços vazios de rochas e sedimentos localizados abaixo da superfície, ficando armazenadas em formações litológicas conhecidas por aquíferos. Ela representa uma reserva hídrica amplamente explorada para diversas atividades humanas e representa uma fonte de alimentação dos cursos d'água em recessão (Faracini, 2014). Nesse sentido, as águas subterrâneas podem ser consideradas como uma parcela da hidrosfera que ocorre abaixo da superfície da terra, em profundidades de dezenas a centenas de metros, a qual acaba entrando em contato com elementos abaixo do solo e acaba apresentando uma composição química divergente da composição das águas superficiais, o que será tratado mais adiante (Bovolato, 2007).

De acordo com Fetter (1998), a água subterrânea apresenta três origens principais: meteórica, conata e juvenil. A origem meteórica é a mais conhecida e diz respeito ao armazenamento da água no solo a partir da precipitação, seja na forma de chuva, neve ou neblina, processo que consiste em uma importante etapa do ciclo hidrológico. A origem conata diz respeito ao armazenamento de água em sedimentos que se deu desde a formação dos depósitos, sendo também abordadas como água de formação. Por fim, a origem juvenil diz respeito às águas derivadas de processos magmáticos, que são extremamente raras de serem encontradas, e apenas em locais onde há alguma atividade magmática, mas que integram o mecanismo de circulação das águas.

Em termos de composição química, a água subterrânea, diferentemente da superficial, não é composta apenas por moléculas de H₂O com alguns íons inorgânicos naturalmente dissolvidos em sua estrutura, como cálcio e sulfato. Por conta de circularem em regiões do subsolo, e apresentarem uma natureza polar, o que as fazem excelentes solventes para

moléculas iônicas e polares, naturalmente aderem moléculas que se manterão dissolvidas em sua estrutura. Esses solutos dissolvidos são divididos em naturais, aqueles presentes na água subterrânea sem qualquer interferência humana, e os não naturais que são os provenientes de atividades antropológicas. Portanto, a composição da água subterrânea vai depender muito da composição química do local por onde circula e das atividades antropológicas que se desenvolvem na região, podendo apresentar uma série de variações. Alguns exemplos de moléculas que se dissolvem na água são os íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{+}), bicarbonato (HCO_3^{-}), cloreto (Cl^{-}), dentre outros (Fitts, 2015).

3.1.2 Área de utilização e importância

São diversos os usos da água subterrânea na atualidade, muito por conta de sua elevada disponibilidade e por constituir-se como uma das principais e mais acessíveis fontes de água doce no mundo (Faracini, 2014). Alguns dos principais usos que podem ser mencionados incluem-se: uso na irrigação, uso na pecuária, uso na área industrial, abastecimento doméstico, no abastecimento público urbano, dentre outros. Segundo dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2018), o uso das águas subterrâneas no Brasil era diversificado, e a proporção de uso em cada área está ilustrado na Figura 1.

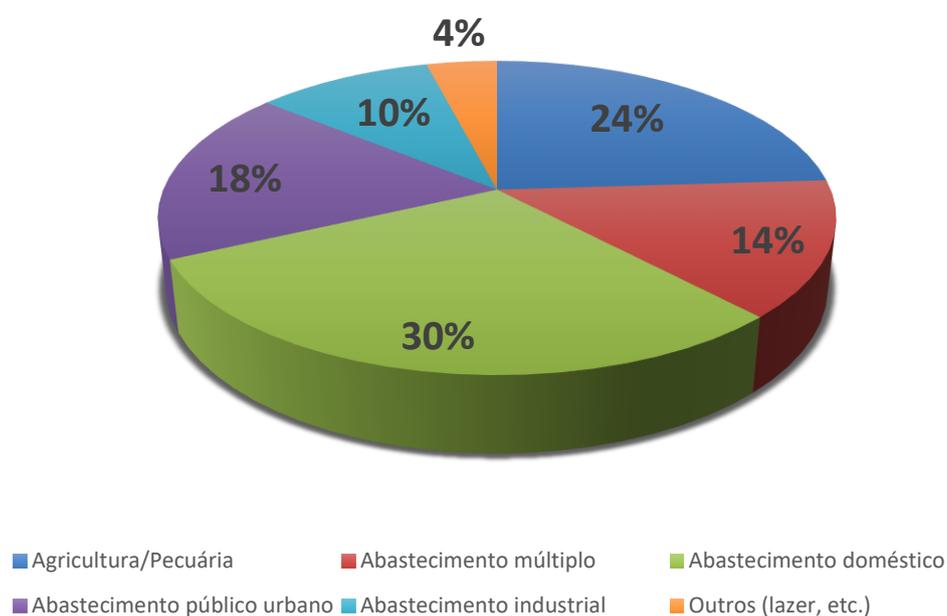


Figura 1. Distribuição do uso da água no subterrânea Brasil no ano de 2018 (CPRM, 2018)

Além de ser utilizada em diversas áreas da sociedade como pode ser observado na Figura 1, as águas subterrâneas apresentam uma importância elevada para a sociedade em geral pois os reservatórios subterrâneos são considerados como uma das fontes de água potável mais seguras na terra, muito por conta da cobertura rochosa que os envolve. Assim sendo, eles se tornam uma das fontes de água doce mais exploradas no mundo, chegando em volumes superiores a 80% de toda água potável utilizada em alguns países europeus, e até valores superiores em regiões da África e do Oriente Médio (Faracini, 2014). No Brasil, por exemplo, existem municípios que são 100% abastecidos por águas provenientes de reservatórios subterrâneos, como é o caso de Ribeirão Preto, no interior do estado de São Paulo e o município de Estrela, localizado no estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2018).

3.1.3 Meios de exploração

A exploração das águas subterrâneas depende diretamente da perfuração de poços, os quais podem apresentar os mais diversos diâmetros, as mais diversas profundidades e os mais diversos métodos de perfuração. A construção dos poços depende diretamente da região onde se pretende realizar a perfuração, e dos recursos disponíveis a serem investidos na construção destes, uma vez que essa operação pode envolver custos inacessíveis em muitas ocasiões.

De modo geral, o procedimento básico para a perfuração envolve algumas etapas características: a coleta de dados sobre a hidrogeologia da região, juntamente com estudos a respeito da estrutura litológica do local, os quais são realizados por diferentes métodos (perfuração de poços pioneiros, utilização de sondas, perfilagem geofísica, dentre outros); a perfuração da formação aquífera, que pode ser executada por diferentes métodos, inclusive manuais, e utilizando-se

diferentes equipamentos a depender das dimensões desejadas para o poço e das características do solo perfurado; a completação, que consiste basicamente em revestir o poço e colocá-lo em condições de utilização, instalando-se elementos como o próprio revestimento, o filtro e o pré-filtro, sendo um processo mais empregado em rochas sedimentares de porosidade intragranular, onde a contaminação se dá de forma mais intensa; a cimentação, que consiste no despejo de cimento na região anelar entre a parede dos poços e a formação, com o intuito de garantir sustentação, proteção e unir o poço à formação; o desenvolvimento, que consiste na retirada de material fino das proximidades da formação aquífero para aumentar a permeabilidade do aquífero; e o bombeamento, que seria a etapa de extração da água de um poço por meio de uma bomba, exigindo uma série de testes para que possa ser efetuada de modo produtivo (Costa Filho *et al.*, 1998).

3.2 Geotermia

3.2.1 Formação no subsolo

Segundo Zoet (2011), o termo geotermia vem das palavras gregas “geo”, que se refere a terra, e “termia” que se refere ao calor. Portanto a geotermia pode ser classificada como o calor proveniente das camadas mais internas da terra, mais precisamente do núcleo, que é irradiado e conduzido para as camadas mais superficiais da terra. Nesse sentido, a água que circula pelo subsolo tem um papel fundamental no transporte dessa forma de energia, também conhecida como energia geotérmica, em direção à superfície, onde ela pode ser aproveitada de diferentes maneiras (Blodgett e Slack, 2009).

A formação da energia geotérmica no subsolo ocorre a partir do fluxo de calor proveniente do centro do planeta em direção a regiões mais próximas das superfícies. Nessas regiões, o calor atinge águas armazenadas em formações rochosas, de modo ou a ocorrer a formação de vapor, ou a manutenção de água quente presas em rochas porosas, que podem ser cercadas por rochas impermeáveis, dando origem aos reservatórios geotérmicos. Assim, são três os principais elementos do sistema de formação da energia geotérmica: o calor, a permeabilidade do solo e a água (Blodgett e Slack, 2009).

Evidentemente, a disponibilidade desse recurso não se dá de maneira semelhante nas diversas regiões do mundo. O potencial geotérmico dos diferentes locais depende diretamente da sua localização. Os locais que apresentam maior conteúdo energético disponível são as regiões localizadas próximas de pontos de transição de placas tectônicas e as regiões mais próximas de atividades vulcânicas pois são as regiões que apresentam um maior fluxo natural de calor em detrimento da existência de atividades magmáticas mais intensas (Confessor *et al.*, 2020).

3.2.2 Área de utilização e importância

São três os principais tipos de utilização da energia geotérmica atualmente: geração de energia elétrica, utilização direta para fornecimento de calor e controle térmico de residências (Zoet, 2011).

O uso de geotermia para geração de energia elétrica envolve a extração de vapor do subsolo, o qual é formado a partir do aquecimento das águas armazenadas em reservatórios subterrâneos ou injetadas no subsolo, e utilização desse vapor para a movimentação de turbinas a vapor acopladas a geradores elétricos. Apesar de ser a forma de utilização mais importante da geotermia, para que a energia geotérmica seja utilizada para geração de eletricidade, é necessário que a fonte de onde se extrai o recurso apresente elevada entalpia (onde o recurso está disponível em temperaturas acima dos 200 °C), sendo que essas fontes, como já foi mencionado, se concentram em locais próximos de regiões vulcânicas ou em regiões limítrofes entre placas tectônicas (Reis, 2017).

A utilização direta da energia geotérmica para fornecimento de calor, é a forma de utilização mais difundida desse recurso principalmente por não requerir uma fonte de elevada entalpia para se tornar viável. Alguns exemplos de atividades que envolvem uso direto são aquecimento de residências, aquecimento de estufas, aquecimento de lagos de aquicultura, uso industrial, piscina termal, derretimento de neve, dentre outras aplicações (Anjos, 2018).

O emprego da geotermia para o controle térmico de residências se dá através das chamadas bombas de calor, que são equipamentos que viabilizam a troca de calor entre o subsolo e o ambiente externo. Nas bombas de calor ocorre a circulação de água por entre tubos enterrados em diferentes regiões do subsolo. Para gerar calor, a bomba extrai o calor da terra e direciona-o para os tubos de condução convencionais, e para resfriar o ambiente ela retira calor do ambiente e joga para a terra (Blodgett e Slack, 2009).

3.2.3 Meios de exploração

Apesar de existirem regiões que apresentam um elevado potencial geotérmico associado a uma elevada permeabilidade do solo, o que faz com que haja fenômenos de erupção de vapor facilitando o aproveitamento do recurso, a exploração dos recursos geotérmicos apoia-se fortemente na perfuração de poços para acesso ao subsolo. Como as fontes geotérmicas de maior conteúdo energético se apresentam nas regiões mais próximas do núcleo da terra, quanto maior a profundidade dos poços perfurados, maior a quantidade de energia que estará disponível para ser aproveitada a

partir desse recurso. Assim sendo, a profundidade de poços geotérmicos pode alcançar profundidades de 5 a 10 km para encontrar fontes de calor que tornem possível a geração de vapor (Fitts, 2015).

De forma geral, os procedimentos associados à exploração de energia geotérmica devem ser precedidos de estudos de caracterização do reservatório, e a perfuração propriamente dita envolve a utilização de maquinários que também são empregados na perfuração de poços de petróleo. Para que a exploração seja concluída, é necessário que seja feita a perfuração de dois poços: um poço de produção, através do qual será extraído o vapor produzido, e um poço de injeção de água, o qual injeta água no subsolo para que ela entre em contato com a fonte de calor e gere o vapor necessário, o que evidencia a necessidade de haver permeabilidade no solo com coberturas pouco permeáveis para manter o vapor confinado. Quando o vapor é gerado, ele é bombeado para a superfície pelo poço de produção, sendo posteriormente direcionado para a aplicação desejada, seja para movimentação das turbinas, seja para utilização direta ou seja para qualquer outra aplicação (IRENA, 2017).

A instalação de poços de energia geotérmica também envolve estudo da geologia do local, que se dá principalmente através de métodos geofísicos e perfuração de poços pioneiros, perfuração propriamente dita, que envolve um procedimento muito semelhante à perfuração de poços de petróleo, fazendo uso da perfuração rotativa ou roto pneumática, revestimento, que envolve a inclusão de uma tubulação de revestimento no poço, a cimentação, para garantir a sustentação e a proteção, e o bombeamento, realizado através de bombas de elevada capacidade de transporte de fluido por conta da elevada profundidade dos poços e composição dos fluidos de perfuração (Finger e Blankenship, 2010).

3.3 Petróleo

3.3.1 Formação no subsolo e composição química básica

O petróleo é um dos recursos energéticos mais valorizados e conhecidos atualmente. De acordo com a American Society for Testing and Materials (ASTM), o petróleo é definido como uma mistura de ocorrência natural composta predominantemente por hidrocarbonetos associados a derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e outros elementos. Sua formação é estudada por muitos cientistas e a teoria mais aceita afirma que o petróleo se formou a partir da degradação de matéria orgânica, depositada junto a sedimentos de baixa permeabilidade, pela ação degradante de microbactérias ocorrida durante anos (Farah, 2013). Assim sendo, o petróleo possui uma rocha geradora, que seria onde ele foi realmente originado, e uma rocha reservatório onde ele fica armazenado.

Em termos de composição, o petróleo é, por definição, composto predominantemente por cadeias de hidrocarbonetos, ou seja, moléculas de carbono e hidrogênio interligadas. Esses hidrocarbonetos podem ser de diferentes tipos, sendo que a fração de cada tipo de hidrocarboneto depende da matéria prima original e das variáveis termodinâmicas envolvidas no processo de formação do petróleo em questão (Garcia Baustista, 2008). Além dos hidrocarbonetos, o petróleo apresenta em sua estrutura traços de outros componentes como enxofre, nitrogênio, níquel, oxigênio, dentre outros (Selley e Sonnenberg, 2016).

3.3.2 Área de utilização e importância

A área de utilização do petróleo é extremamente ampla por conta de seus derivados, e apresenta uma importância extremamente elevada em diversos setores. Desde que foi descoberto até os dias atuais, tem sido essencial para a geração de energia para a movimentação de automóveis, trens, aviões e navios através do processo de combustão de seus derivados. No entanto, sua utilização não se limita apenas a esse setor. O petróleo também é amplamente empregado na indústria petroquímica para a produção de plástico, fibras, borracha e outros materiais, além de ser empregado em outras áreas como na lubrificação de máquinas, pavimentação de estradas, dentre outros setores (Farah, 2013).

Por conta de ser uma fonte de elevado conteúdo energético e apresentar uma grande versatilidade de aplicações, o petróleo ganhou uma importância de elevadas proporções, tornando-se o recurso mais consumido mundialmente e, conseqüentemente, o maior estimulador da economia mundial. De acordo com Gauto et al. (2016), no ano de 2015, cerca de 55% da matriz energética mundial era dependente de hidrocarbonetos e estudos indicam que esses hidrocarbonetos continuarão compondo a maior parte da matriz energética pelos próximos 50 ou 60 anos. Portanto, levando-se em consideração que o funcionamento da sociedade como um todo depende desse recurso e que o desenvolvimento dessa sociedade, o qual é baseado na área científica que se apropria de recursos gerados por derivados do petróleo, também, é possível afirmar que a essencialidade desse recurso é indiscutível.

3.3.3 Meios de exploração

Como a formação do petróleo ocorre majoritariamente em bacias sedimentares, sendo que ele fica armazenado em rochas que precisam de algum estímulo para liberá-lo, a extração deve ser feita a partir da perfuração de poços específicos para essa aplicação. A profundidade dos poços de petróleo é extremamente variável, então as dimensões do poço irão variar de acordo com a formação que está sendo explorada. De forma geral, o petróleo não é encontrado muito próximo

da superfície, portanto estima-se profundidades de centenas a milhares de metros. De acordo com Selley e Sonnenberg (2016), as profundidades mais usuais para poços de extração de petróleo variam de 600 a 3000 metros de profundidade.

A exploração do petróleo também é um processo desenvolvido por etapas. A primeira dessas etapas consiste na exploração, que é composta por uma série de sub etapas com o intuito de verificar quais os locais da bacia sedimentar são mais propensos a acumular petróleo e saber em que áreas estão localizadas as possíveis jazidas. Dentre as sub etapas da exploração podem ser mencionadas a prospecção, o estudo de métodos geológicos e da geologia da superfície, aerofotogrametria e fotogeologia, estudo da geologia da subsuperfície, aplicação da gravimetria, da magnetometria e de métodos sísmicos (Cavalcanti Neto, 2016).

Após a coleta de informações, a exploração passa para a etapa de perfuração, a qual é feita utilizando-se as chamadas sondas de perfuração, que são estruturas de grande porte compostas por elementos como motores, mastros, brocas, bombas, tanques, fluidos e outros componentes que são comandadas por um sistema informatizado (Gauto et al., 2016). Por envolverem perfurações de elevadas profundidades, os métodos rotativos e pneumáticos são os empregados na perfuração associados a utilização de brocas e elementos que aumentam o peso da coluna visando um aumento na eficiência.

As duas últimas etapas são o revestimento do poço e o bombeamento. O revestimento do poço é um procedimento que envolve a instalação de tubulações, conhecidas como colunas de revestimento, de diâmetro menor que o do poço, com função de garantir sustentação e proteger contra contaminação. Além do revestimento é feita a cimentação do espaço anelar existe entre o revestimento e a parede do poço, também para garantir a sustentação e posteriormente é realizado o bombeamento que é o processo de extração propriamente dito. Esse processo é realizado, em grande parte das aplicações, por um equipamento conhecido como cavalo mecânico, o qual converte um movimento alternativo do motor em movimento alternativo requerido pela haste para a realização da extração (Cavalcanti Neto, 2016).

3.4 Comparações

Tendo em vista todas as características individuais de cada um dos recursos analisados, foi confeccionada a Tabela 1, a qual contém características específicas de cada um dos recursos para efeito de comparação.

Tabela 1. Estudo comparativo entre água subterrânea, geotermia e petróleo (Autoria própria)

	Água Subterrânea	Geotermia	Petróleo
Composição	Moléculas de H ₂ O com solutos orgânicos ou inorgânicos dissolvidos	Energia na forma de calor	Cadeias de hidrocarbonetos com outras moléculas associadas
Formação	Meteórica, conata ou juvenil, armazenando-se em camadas rochosas do subsolo	Fluxo de calor proveniente do núcleo, e armazenamento no subsolo através de rochas e água subterrânea	Degradação de matéria orgânica e armazenamento em bacias sedimentares
Utilização e importância	Agricultura, pecuária, abastecimento múltiplo, doméstico, industrial e público urbano, dentre outros	Geração de energia elétrica, uso direto para fornecimento de calor e controle térmico de residências	Geração de energia para movimentação de automóveis, trens, aviões e navios, produção de plásticos e fibras, lubrificação de máquinas, pavimentação de estradas, dentre outros.
Meios de exploração	Perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes	Perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes	Perfuração do subsolo através de máquinas perfuratrizes

Considerando a composição química dos recursos, é possível afirmar que são completamente diferentes entre si, apesar de terem origem natural. Enquanto a água subterrânea é formada majoritariamente por moléculas de H₂O com algumas outras moléculas dissolvidas por conta do armazenamento e fluxo no subsolo, o petróleo é formado por cadeias de hidrocarbonetos que também apresentam algumas moléculas associadas em virtude dos processos de formação pelos quais passa e pelos locais onde são armazenados. A geotermia, por ser uma energia na forma de calor proveniente de uma fonte específica, não pode ser comparada estruturalmente com os dois outros recursos por estes estarem na categoria de substâncias químicas.

Apesar de serem utilizados em diferentes áreas na sociedade, os recursos apresentam grande relevância na área de geração energética, algo que é muito valorizado em diversos países do mundo. Como mencionado anteriormente, o petróleo é considerado como a fonte de energia mais explorada do planeta, justamente por apresentar elevada capacidade de geração de energia através de seus derivados. No Brasil, por exemplo, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, cerca de 44% de toda a energia primária do país em 2019 foi produzida a partir do petróleo, o que corresponde a 144×10^3 tep. Além disso, segundo o mesmo Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, o consumo de dos derivados do petróleo representou 34,4% do total de energia consumida no ano de 2019, o que corresponde a cerca de $101,1 \times 10^6$ tep. A geotermia, embora em menor escala, também é utilizada para a geração de energia, porém exclusivamente elétrica. Não apresenta uma relevância tão grande quanto a do petróleo por exemplo, por não ser uma fonte tão consolidada no meio da geração de energia, porém se apresenta como uma importante fonte alternativa de geração de energia elétrica apresentando como principal vantagem a confiabilidade por estar disponível para uso em todas as estações do ano. A água subterrânea propriamente dita, apesar de ser muito pouco utilizada para geração de energia diretamente, participa ativamente da geração de energia vinda de outras fontes, como é o caso da energia geotérmica.

O processo de formação desses recursos apresenta naturezas diferentes, porém semelhanças quanto ao armazenamento. A água subterrânea é resultado, principalmente, da etapa de precipitação do ciclo hidrológico, apesar de apresentar outros processos de formação menos evidentes; a geotermia é gerada a partir do fluxo de calor proveniente do núcleo da terra, dependendo da própria água subterrânea para que seja possível; e o petróleo é formado a partir da degradação da matéria orgânica. A partir desses processos de formação, todos esses recursos se acumulam em rochas que apresentam certa permeabilidade para permitirem esse armazenamento, associadas a coberturas rochosas pouco permeáveis que são as responsáveis por manter o confinamento dos recursos em localizações específicas. No caso da água subterrânea, as principais regiões de armazenamento são denominadas aquíferos, que nada mais são do que formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água, existindo também formações conhecidas como aquíferos e aquícludes, os quais são não capazes de transmitir água pela sua impermeabilidade (Iritani e Ezaki, 2008). No caso da energia geotérmica, o vapor gerado naturalmente fica armazenado em reservatórios geotérmicos, os quais, quando não apresentam coberturas rochosas suficientemente impermeáveis, permitem que o vapor ou água quente sejam jorrados para a superfície dando origem aos gêiseres (Blodgett e Slack, 2009). Já o petróleo fica aprisionado nos poros de rochas reservatório, que mantém esse recurso pressurizado juntamente com os gases resultantes do processo de formação do composto, dando origem às jazidas de petróleo em bacias sedimentares (Gauto et al., 2016).

Desse modo, por conta do fato de todas os recursos se manterem armazenados no subsolo, a exploração ou extração desses para que estejam disponíveis para as mais diversas aplicações, implica uma perfuração do subsolo. Analisando superficialmente as principais características dos processos de perfuração separadamente, é possível averiguar que, como os recursos são formados por processos diferentes e por estarem em localizações diferentes no subsolo, sendo a água mais presente em regiões superficiais, o petróleo em regiões mais profundas, e a geotermia em regiões mais profundas ainda, as exigências para exploração acabam divergindo. Isso faz com que os equipamentos utilizados apresentem algumas diferenças, visto que uma maior profundidade de perfuração exige uma maior complexidade dos equipamentos, faz com que as profundidades de perfuração apresentem diferenças, e faz com que os processos de bombeamento apresentem diferenças, pois são recursos de natureza diferente, e, portanto, apresentam uma maneira mais adequada de serem bombeados para a superfície. Além disso, os processos de adequação dos poços naturalmente apresentam diferenças, fazendo com que os custos de extração não sejam os mesmos para cada um dos processos.

4. CONCLUSÕES

Através das comparações traçadas, é possível concluir alguns pontos acerca dos recursos naturais abordados. Primeiramente, foi possível observar que a água subterrânea, o petróleo e a geotermia são recursos naturais aplicados nas mais diversas atividades desenvolvidas na sociedade, portanto necessitam de atenção para a manutenção dos processos que os utilizam e para que o desenvolvimento desses e de outros processos seja viável. Dentre essas aplicações, uma que se destacou por ser comum aos três recursos estudados, foi a geração de energia, sendo que o petróleo apresenta uma relevância maior em comparação com os outros dois. Porém, por serem recursos naturais renováveis e de baixo impacto ambiental, diferentemente do petróleo, a água subterrânea, muito pouco utilizada para a geração direta de energia, e as fontes geotérmicas apresentam-se como alternativas mais sustentáveis embora menos eficientes.

Um ponto importante a ser destacado na análise comparativa desenvolvida é que apesar dos três recursos apresentarem origens, processos de formação e composição química diferentes uns dos outros, todos ficam armazenados no subsolo em algum momento. Com isso, todos apresentaram processos exploratórios com algumas semelhanças, visto que todos envolviam estudo do ambiente, processos de perfuração do solo e processos de extração para que se tornem disponíveis na superfície.

Nesse sentido, como cada processo apresenta certas peculiaridades que podem ser estudadas mais profundamente, a próxima etapa do estudo que vem sendo desenvolvido é uma análise comparativa de técnicas e custos de perfuração de poços para a extração de água, energia geotérmica e petróleo, visando o desenvolvimento dos processos de perfuração e avaliação dos métodos de maior custo-benefício.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Arboit, N.K.S. et al., 2013. *Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil: uma revisão da literatura*. Departamento de geografia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Anjos, H.V.P., 2018. *Estimativa do potencial mundial e brasileiro do aproveitamento da energia geotérmica para geração de eletricidade e uso direto*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASTM, 2011. *Annual Book of ASTM Standards: section 05 – Petroleum products, lubricants, and fossil fuels*. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Blodgett, L. e Slack, K., 2009. *Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use*. Geothermal Energy Association, Washington.
- Bovolato, L.E., 2007. *Uso e gestão de águas subterrâneas em Araguaína/TO*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- Cavalcanti Neto, M.T.O., 2016. *Petróleo e Gás: noções básicas para alunos do ensino médio*. Ifm, Natal, 1ª edição.
- Confessor, S.L.M., et al., 2020. “Avaliação do potencial de produção de recursos minerais”. In *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Fortaleza, Brazil.
- Costa Filho, W.D., Galvão, M. J.T.G., Lima, J.B. e Leal, O., 1998. *Noções básicas sobre poços tubulares: cartilha informativa*. Cprm, Recife.
- CPRM, 2018. “*SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas*”. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 5 Jun. 2021 <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>
- Deplácido, N.F., 2008. *Água, preservação, uso e conservação: subsídios teórico-práticos para o ensino fundamental*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- EPE, 2020. “Balanço Energético Nacional: Relatório Final”. Empresa de Pesquisa Energética. 10 Fev, 2022 <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>
- Fanchi, J.R. e Christiansen, R.L., 2016. *Introduction to Petroleum Engineering*. Wiley, Hoboken, 1ª edição.
- Faracini, J.C.B., 2014. *Classificação Hidroquímica das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral na Porção Centro Norte do Estado de São Paulo*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Farah, M.A., 2013. *Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade*. LTC, Rio de Janeiro, 1ª edição
- Fetter, C. W., 1988. *Applied hydrogeology*. Merril Publishing, Colombus, 2ª edição.
- Finger, J., Blankenship, D., 2010. *Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling*. Sandia National Laboratories, Oak Ridge.
- Fitts, C. R., 2015. *Águas subterrâneas*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2ª edição.
- Garcia Bautista, D.F., 2008. *Estudo dos sistemas petrolíferos no setor central da bacia dos “Llanos Orientales”, Colômbia: Um modelo para explicar as mudanças na qualidade do petróleo*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gauto, M., 2016. *Petróleo e Gás: princípios de exploração, produção e refino*. Bookman, São Paulo , 1ª edição.
- Hirata, R. et al., 2010. “Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial”. *Águas no Brasil: Análises estratégicas*, Vol. 1, p 149-161.
- IRENA, 2017. *Geothermal Power: Technology Brief*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Iritani, M.A. e Ezaki, S., 2008. *As águas subterrâneas do estado de São Paulo*. Instituto Geológico, São Paulo.
- OECD, 1997, *Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods*. United Nations, New York.
- Reis, L. B., 2017. *Geração de Energia Elétrica*. Manole Ltda, Barueri, 3ª edição.
- Selley, R.C. e Sonnenberg, S.A., 2016. *A Geologia do Petróleo*. Elsevier, Rio de Janeiro, 3ª edição.
- Zoet, A., et al., 2011. *Geothermal 101: the basics and applications of geothermal energy*. Dovetail Partners, Minneapolis.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.