



**Universidade de Brasília**

**Universidade de Brasília**

**Instituto de Química**

**Nathália Cristina Moreira de Jesus Lopes**

**Um estudo de caso sobre a implantação da energia geotérmica  
no Brasil**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ JOAQUIN LINARES LEON**

**2º/2021**

**Brasília - DF**



# **Universidade de Brasília**

**Universidade de Brasília**

**Instituto de Química**

**Nathália Cristina Moreira de Jesus Lopes**

**Um estudo de caso sobre a implantação da energia geotérmica  
no Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso em Química apresentando ao Instituto de Química da  
Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. José Joaquín Linares León.

2º/2021

Brasília - DF

## Agradecimentos

Dedico todo resultado que obtive ao longo da graduação às pessoas que Deus colocou no meu caminho ao longo da minha vida. Todo apoio e orientação que não tive de familiares, eu tive de professores, profissionais e amigos. Sem vocês, o caminho seria mais árduo, mais tenebroso e escuro. Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, pois prometi a ele que o agradeceria antes de tudo ao final do curso! Agradecer a Deus por ter crescido diante das adversidades e não sucumbido a elas justamente pela força que me deu. Não me deixou desamparada. Sua ação na minha vida é nítida, consigo enxergar através de uma profissional ímpar e extremamente capacitada que é minha psicóloga, Fernanda, obrigada por esses anos de sessões e de ter me ajudado a mudar e a lidar com minha história.

Eu vejo o quanto foi essencial que desse tudo errado em alguns momentos para que, então, desse tudo certo. Quando, após período turbulento durante a graduação, sou contemplada pela presença da ilustríssima prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine que além de ser uma profissional de grande porte e referência acadêmica, é uma grande mãe. Obrigada por tanto. É notória a luz que a Elaine carrega consigo, pois ela contribuiu e mudou para melhor tanto a minha vida quanto a de outros colegas da universidade. Elaine, não há palavras que quantifiquem a gratidão e o afeto que sinto por você.

Agradeço imensamente ao meu orientador José Linares por ter me acolhido na situação em que estava, por ter sido compreensivo, por puxar a orelha, pelo apoio e pela mão estendida. É um dos maiores pesquisadores da América Latina, além da grande capacidade, carrega consigo uma grande humildade que inspira a gente. JoseJu, quando eu crescer, quero ser igual a você!

Eu estaria sendo tola e ingrata se me esquecesse dos amigos. Amigos são presentes que damos a nós mesmos e a amizade é um amor puro e sem qualquer tipo de interesse, este tipo de amor me sustentou várias vezes. Aos meus amigos: obrigada pelos abraços, pelas palavras, pela escuta, pelo acolhimento, pelo apoio, pelos puxões de orelha e por terem permanecido ao meu lado em períodos intensos. Eu estarei aqui sempre precisarem. Vocês são únicos e cheios de luz.

Agradeço à própria Universidade pela oportunidade de crescer, pelo auxílio, pelos amigos que me deu, por ter sido uma espécie de casa, por me permitir viver tantas experiências e por estar me graduando no tão sonhado curso: Química.

## Sumário

1. Introdução	1
2. Referencial teórico	2
2.1. Panorama energético mundial	2
2.2. Problemáticas dos combustíveis fósseis	3
2.3. Matriz energética e Matriz elétrica	4
2.4. O papel das energias renováveis	5
2.5. Tipos de energias renováveis	6
2.6. Renováveis no Brasil	8
2.7. Energia geotérmica	9
2.8. Aplicação indireta: geração de energia elétrica	11
2.9. Aplicação da energia geotérmica no mundo	12
3. Objetivos	19
4. Resultados e discussão	20
4.1. Uso direto da energia para recreação	20
4.2. Produção de energia elétrica a partir do recurso geotérmico de alta entalpia	21
5. Conclusões	24
6. Referências Bibliográficas	25

## 1. Introdução

No atual cenário energético, altamente dependente dos combustíveis fósseis, há uma forte necessidade por modificar esse panorama para torná-lo mais sustentável e, desta forma, reduzir os impactos dos usos daqueles. Especialmente drásticas se mostram as mudanças climáticas associadas com o incremento nos níveis de CO<sub>2</sub> atmosféricos a valores acima de 400 mg L<sup>-1</sup>, bem como um anômalo aumento da temperatura média terrestre. Isto tem potencializado o crescimento das energias renováveis, caracterizadas por sua alta disponibilidade, suas baixas ou nulas emissões e sua rápida regeneração.

Dentro deste leque de energias renováveis, encontra-se a energia geotérmica, que aproveita o calor acumulado no subsolo para geração de água quente, em sua aplicação mais simples, ou para gerar vapor e alimentar turbinas geradoras de eletricidade. No mundo, destacam-se, por sua capacidade geotérmica instalada para produção de energia, países com elevada atividade vulcão-sismológica, especialmente EUA, Indonésia e Filipinas que ocupam os primeiros lugares (IRENA, 2021). No Brasil, explora-se o uso recreativo e para águas de banho termal, sem que existam potenciais aplicações para usos industriais, mesmo que haja potencial para este fim (VIEIRA; GUIMARÃES; HAMZA, 2015).

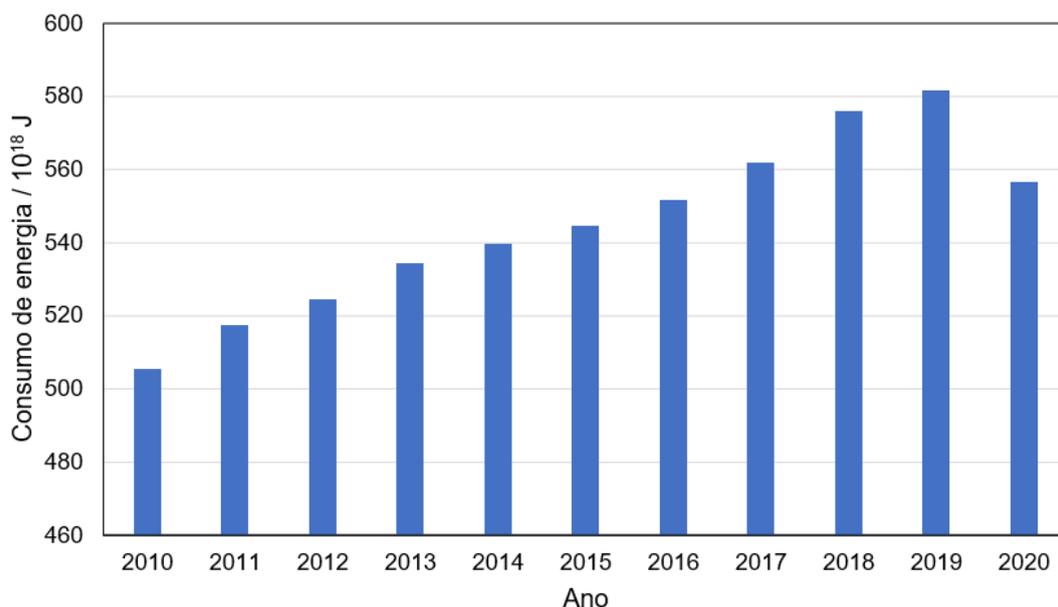
Com este trabalho, visando a conclusão de meu curso de graduação, para obter o grau de Bacharel em química, propus-me a efetuar um levantamento bibliográfico que nos proporcione, embasado por publicações científicas sobre a exploração e aplicação da geotérmica no país, um panorama sobre a ampliação da matriz energética brasileira, através do uso da energia geotérmica.

## 2. Referencial teórico

### 2.1. Panorama energético mundial

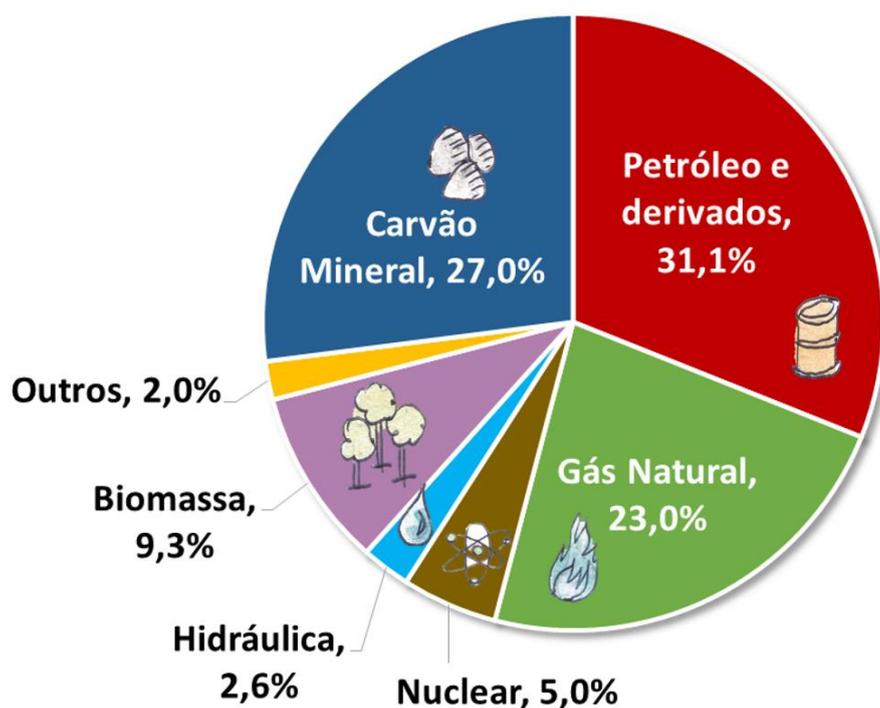
Atualmente, a importância da energia na sociedade é inquestionável. Apesar de “intangível”, trata-se de uma “mercadoria” que toca todos os aspectos da vida moderna, proporcionando-nos benefícios a todos os níveis. Fatos como a Revolução Industrial, a migração populacional do campo para a cidade, assim como as mais recentes tecnologias de celular, informáticas e eletrodomésticos testemunham a importância deste recurso.

Contudo, o constante incremento da população, bem com a melhora na qualidade de vida traz, como consequência, o incremento da demanda de energia, tal como pode ser observado na Figura 1, há um incremento linear da demanda durante a última década, com exceção do ano de 2020, associado à pandemia por Covid-19 padecida a nível mundial.



**Figura 1.** Evolução do consumo de energia mundial (Fonte: anuário estatístico da British Petroleum 2021, Fonte: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>)

O principal problema que surge neste panorama é o desmembramento das energias utilizadas para atender a essa demanda. De acordo com o panorama apresentado no anuário estatístico da BP para o ano de 2020, a participação das fontes fósseis, representadas fundamentalmente pelo petróleo, gás natural e carvão, responde a 80% do mix de energias, o que descreve uma realidade fortemente dependente deste tipo de fontes de energia. A energia proveniente dessas fontes é principal e largamente utilizada de três formas, como combustíveis para as frotas automobilísticas, para aquecimento residencial e para geração de eletricidade. A Figura 2 demonstra a origem das fontes de energia.



**Figura 2.** Origem das fontes de energia a nível mundial (Fonte: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>)

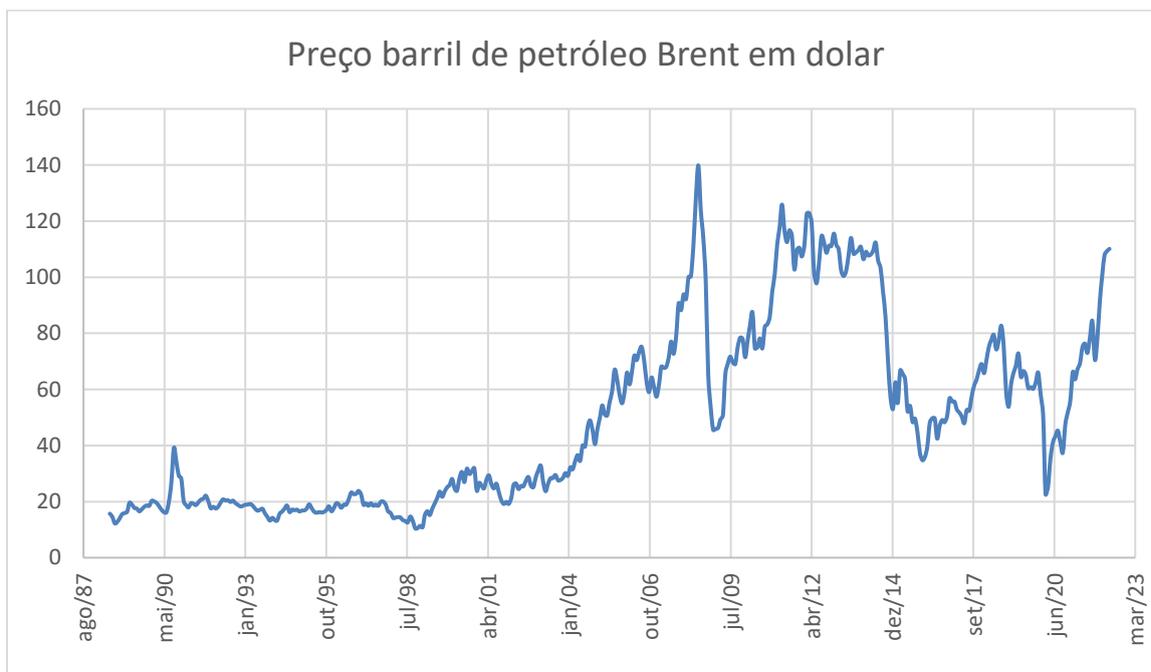
## 2.2. Problemáticas dos combustíveis fósseis

A utilização dos combustíveis fósseis tem associado alguns problemas que são listados e discutidos a seguir:

- Oscilação dos preços do petróleo e/ou gás natural. Os principais produtores de petróleo são os países do Oriente Médio, Venezuela, Bolívia, Equador, países do Norte da África e a Rússia. Estes países se caracterizam por sua instabilidade sociopolítica, com frequentes mudanças de regimes, o que impacta fortemente na evolução dos preços do petróleo. Isto possui um impacto direto na economia mundial. Como exemplo, a subida no preço do petróleo e gás natural ao longo do ano de 2021 tem impactado fortemente nas economias mundiais trazendo como consequência um notável aumento do índice de preços (BUCHHOLZ, 2021) associado ao desajuste entre oferta e demanda causado pela pandemia de Covid-19. Outros períodos também trouxeram fortes oscilações nos preços do petróleo como, por exemplo, guerras no Oriente Médio ou a forte crise econômica de 2008, tal como é apresentado na Figura 3.
- Aumento dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera como consequência da queima dos combustíveis fósseis, chegando a atingir níveis acima de 400 ppm de CO<sub>2</sub> (desnecessário, já está no início da sentença) a partir de meados da década passada. Isto tem trazido um aumento da temperatura média da terra DE de 1,18 °C desde 1880, bem como uma notável redução das calotas polares (NASA, 2022). Além disso, a cada dia são mais evidentes os casos de

fenômenos meteorológicos extremos, associados às mudanças climáticas por conta do aumento dos níveis de CO<sub>2</sub> e o aquecimento global.

- Outros gases derivados da queima dos combustíveis fósseis, como são os SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, trazem fenômenos indesejáveis como a chuva ácida e o smog fotoquímico.



**Figura 3.** Evolução do preço do petróleo Brent no período de 1988 até 2022 (Fonte: <https://br.investing.com/commodities/brent-oil-historical-data>)

### 2.3. Matriz energética e Matriz elétrica

A energia vem de um conjunto de fontes que damos o nome de matriz energética. Essa matriz pode estar disponível em um país, estado, no mundo de forma geral que usamos para suprir a necessidade de energia como preparar alimentos, movimentar os carros e gerar eletricidade, por exemplo. A matriz elétrica é o conjunto de fontes disponíveis apenas para geração de energia elétrica. Logo, a matriz elétrica faz parte da matriz energética. O mundo possui uma matriz energética prioritariamente fóssil que é um tipo de fonte energética não-renovável, lembrando que essa fonte é a principal responsável pelas emissões graves de gases de efeito estufa (GEE). As fontes renováveis como a eólica, solar e geotérmica somadas correspondem a 2% da matriz energética mundial. Sendo hidráulica, eólica e a solar as principais dentre as renováveis. Se adicionarmos a hidráulica e a biomassa, as renováveis totalizam em 14%, ou seja, a participação das renováveis no *mix* de energias no mundo, ainda é baixa, deixando nítida a necessidade de promoção de políticas de estímulo à implantação dessa alternativa.

Em 2040, o uso das energias renováveis deve aumentar consideravelmente em escala mundial, nessa expectativa, espera-se que eles correspondam em mais de 80% do desenvolvimento e consumo energético até esse ano. Fontes como carvão e petróleo sofrerão uma redução considerável, enquanto que as fontes limpas poderão amplamente atender as medidas feitas no Acordo de Paris\* através de sua alta participação. Liderado pela eólica e hidrelétrica, o setor de produção de energia será um importante contribuinte para a desaceleração das emissões globais de monóxido de carbono que são impulsionadas principalmente por países em desenvolvimento, o crescimento do uso da energia limpa promove o abandono das energias fósseis, num longo prazo. As políticas para conter as emissões de gases de efeito estufa aumentarão os custos da eletricidade para os consumidores, numa tentativa de desacelerar o crescimento da demanda, então os produtores de energia procurarão (já procuram) tecnologias geradoras de eletricidade mais eficientes e mais limpas. A necessidade de diversificação de fontes de energia não é justificada apenas pelas questões ambientais, mas também pelo socioeconômico e sociopolítico. De acordo com os estudos da Organização das Nações Unidas, a população mundial, em 2100, será de 11 bilhões, esse cenário intensificará o consumo de energia nos próximos anos e deixa nítido a indispensabilidade por fontes alternativas. A adoção das renováveis torna os países que as adotam, menos vulnerável às crises energéticas que os maiores países produtores de petróleo sofrem pelos conflitos sócio-políticos. Os benefícios das fontes alternativas limpas só reforçam a ideia de que sua utilização valerá a pena agora e no longo prazo, pois os recursos estarão disponíveis para as próximas gerações também.

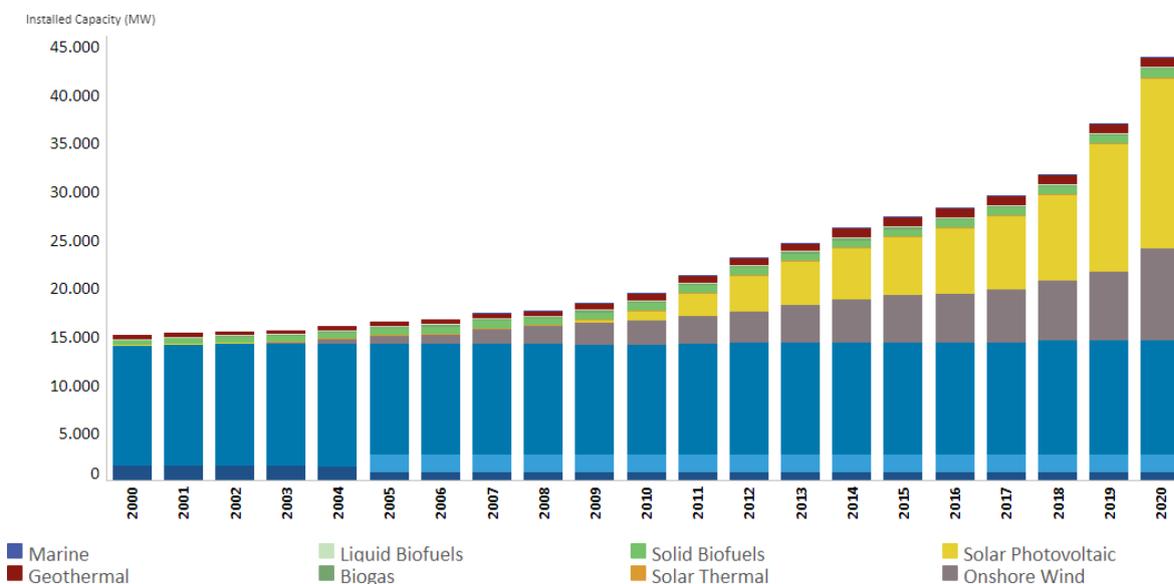
#### **2.4. O papel das energias renováveis**

Para tentar substituir as fontes de energias fósseis por outras mais sustentáveis, desenvolveram-se, especialmente desde a última década do século XX, as energias renováveis. As energias renováveis se caracterizam por serem obtidas a partir de fontes naturais, como a luz do sol, vento, chuva, ondas, marés ou calor geotermal, sendo naturalmente recuperado o recurso em um prazo de tempo muito curto quando comparados às fontes fósseis (intervalo de tempo de poucos anos) (LUND, 2014). As principais fontes renováveis são:

- vento, ondas, marés e recurso hídrico;
- energia solar fotovoltaica, solar térmico e termelétrico, e geotérmica;
- biomassa e biocombustíveis;
- aproveitamento energético de resíduos.

As energias renováveis são consideradas “limpas” por não liberarem substâncias poluentes para o meio ambiente, por isso, estão conseguindo uma boa inserção no mercado brasileiro e mundial. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são mínimas. Além disto, as energias renováveis permitem realizar uma distribuição de energia mais distribuída, podendo ser implantadas em regiões remotas (FARDIN et al., 2018). Outra vantagem das fontes renováveis é o aumento da autonomia

energética dos países, especialmente no que se refere aos impactos nas oscilações do petróleo e gás natural nas economias internas (JUNTUNEN; MARTISKAINEN, 2021). Isto tem estimulado a participação das energias renováveis dentro do mix energético a nível global, junto com as políticas energéticas dos países em função dos impactos ambientais cada vez mais evidentes (IRENA, 2019). A Figura 4 apresenta a evolução das energias renováveis no período.



**Figura 4.** Evolução da capacidade de energias renováveis (Fonte: IRENA, 2021)

Apesar das grandes e valiosas vantagens, ainda existem alguns gargalhos que devem ser resolvidos, especialmente os grandes investimentos iniciais, bem como a irregularidade do recurso, com desajustes entre a oferta e a demanda. Ambos os fatores vêm sendo lentamente vencidos através, no primeiro caso, de economia de escala com o crescimento da produção dos diferentes componentes, bem como pela redução intrínseca destes pelas melhoras técnicas. Já no caso do ajuste entre oferta e demanda, fazem-se necessários o desenvolvimento dos vetores energéticos, na forma de eletricidade (energia elétrica), hidrogênio (energia química), fluidos térmicos (energia térmica) ou transmissão mecânica, que permitem armazenar a energia de forma reversível e ser transportada espaço temporalmente para o momento ou lugar onde for necessário (ORECCHINI, 2006).

## 2.5. Tipos de energias renováveis

No Brasil, tal desafio não poderia ser diferente, já que recentemente a inserção de fontes alternativas de geração de eletricidade na matriz energética brasileira aumentou consideravelmente. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Operador Nacional do Sistema (ONS), em novembro de 2017, a capacidade instalada dessas fontes (considerando Eólica, Solar, Biomassa e Nuclear) já ultrapassava 25GWe. Além disso, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2022), há previsão de que esse valor se torne maior do que o dobro em 10 anos,

demonstrando que permanecerá um forte investimento para a exploração de energias alternativas no país.

A seguir, descreveremos os diferentes tipos de energias renováveis:

- energia hidráulica, baseada nas quedas d'água que movimentam as turbinas conectadas aos geradores. Esse movimento das turbinas, nas usinas hidrelétricas, transformam a energia potencial em energia mecânica, e por fim, em elétrica (esse processo também é chamado de hidroeletricidade). O fluxo das águas é o combustível de geração de eletricidade a partir da fonte hidráulica. Essa fonte é variável devido a dependência da chuva nas cabeceiras dos rios;
- energia eólica, consistente na geração elétrica através da força dos ventos. A energia das massas de ar é convertida em energia mecânica através das turbinas eólicas ou aerogeradores, os quais incluem hélices. O vento movimenta as hélices girando o rotor que por sua vez, transmite essa rotação ao gerador convertendo essa energia mecânica em elétrica. É um tipo de energia limpa que está em crescimento e que liderará como uma das principais dentre as renováveis nos próximos anos;
- energia Solar, através da luz do sol, fonte de energia e calor indispensável à vida no planeta. A captação de luz pode ser transformada em energia elétrica ou com outras aplicações, como para aquecimento da água (energia térmica). Trata-se do recurso mais abundante e disponível na Terra. A produção de energia elétrica através da energia solar pode ser feita de duas maneiras: a heliotérmica e a fotovoltaica. A heliotérmica converte a radiação solar em energia térmica que é aproveitada para a geração de vapor e, em seguida, para a geração de eletricidade em turbinas. Na energia solar fotovoltaica, converte-se a energia solar diretamente em energia elétrica. Dessa forma, a utilização dessa fonte alternativa através da tecnologia pode ser eficiente na geração de eletricidade em qualquer lugar do planeta;
- biocombustíveis, oriundos da biomassa por processos de fermentação de açúcares, como é o caso da obtenção de etanol a partir da fermentação da cana-de-açúcar, ou por transesterificação de triglicerídeos, como é o caso do biodiesel;
- biomassa, cujo aproveitamento se realiza geralmente através da queima de matéria sólida lenhosa para geração de vapor e aproveitamento em turbinas para produção de eletricidade;
- energia oceânica, advinda das ondas do oceano e movimentos da maré, com potencial de gerar energia limpa e ilimitada. É dividida em dois meios: maremotriz e ondomotriz. A maremotriz, se assemelha à hidráulica, a água da maré cheia é armazenada e posteriormente passa por turbinas gerando eletricidade. A energia maremotriz pode ser obtida pela energia cinética das correntes devido às marés ou energia potencial pela diferença de altura entre a maré alta e baixa. O outro meio de obtenção da energia oceânica é a ondomotriz, muito recente, que pode ser captada em qualquer local no oceano. O movimento das ondas faz os geradores elétricos serem acionados em espécies de boias semi-submersas para armazenar energia;

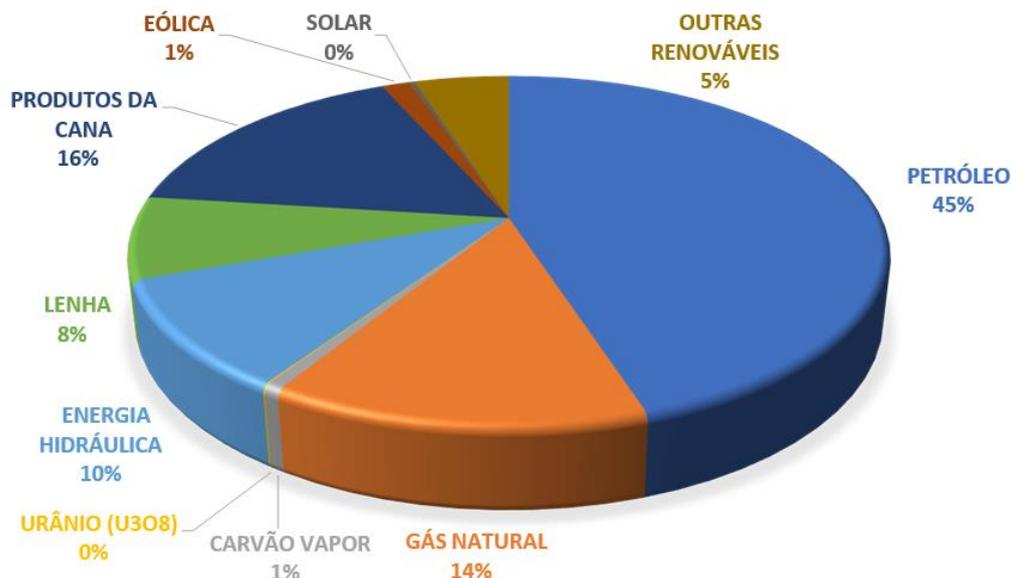
- energia geotérmica, derivada do aproveitamento do calor armazenado no subsolo como consequência da atividade magmática nas camadas internas do planeta Terra.

## 2.6. Renováveis no Brasil

O Brasil é reconhecido mundialmente no campo da energia limpa e renovável. Sua matriz energética é uma das mais renováveis entre todos os países com grandes economias mundiais, já que praticamente 40% da matriz brasileira é renovável (Figura 5). No caso da matriz de produção de energia elétrica, a participação das fontes limpas chega a 83% segundo dados recolhidos no Balanço Energético Nacional de 2021, comparado a um 25% a nível mundial, com uma significativa participação da energia hidráulica (65,2%). Isto configura um panorama energético muito favorável e abre a possibilidade da substituição futura dos combustíveis fósseis por fontes renováveis em um futuro não muito distante, trazendo ainda como vantagem extra a independência energética com o exterior. Neste sentido, por exemplo, destaca-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica recentemente prorrogado pelo governo federal com o intuito de tornar a matriz energética brasileira mais sustentável.

Apesar da alta participação da energia hidráulica, a cada vez existe uma participação mais intensa de outras energias, como a solar e a eólica, que ganharam reconhecimento. A energia solar é a que mais cresce pelo alto potencial solar do Brasil. O nordeste brasileiro apresenta radiação comparável às melhores regiões do mundo. A tendência é que até 2050, aproximadamente 80-130 GW de energia seja gerada por painéis solares. Já do ponto de vista da energia eólica, no Sul e no Nordeste do Brasil, os ventos são constantes, variam pouco de direção. Por este motivo, são considerados um dos melhores ventos do mundo para instalação de usinas eólicas. A capacidade instalada do Brasil já é de 19 GW e a expectativa é dobrar nos próximos dez anos, já sendo o 7º maior produtor de energia eólica no mundo e caminhando para ser o 5º, podendo ser implantada em praticamente toda a costa do Brasil (EPE, 2020).

Além de ser destaque com a ampla participação da energia hidráulica, o Brasil é considerado um dos líderes mundiais em produção de bioetanol, perdendo apenas para os Estados Unidos (MERRITT; BARRAGÁN-OCAÑA, 2021; NUMATA JR., 2021). O Brasil também se destaca na produção de biodiesel a partir da transesterificação dos triglicerídeos, sendo a região centro-oeste a principal produtora deste biocombustível. De fato, a bioenergia representa 27%, sendo 19% produtos originários da cana, realidade não encontrada em outros países e, de fato, usado como modelo (LÓPEZ-ORTEGA et al., 2021). Em termos de geração de energia elétrica, quase 10% são produzidos pelo bagaço da cana. Este cenário de biocombustíveis no país não é recente, a política brasileira incentiva com afincos o desenvolvimento dessas tecnologias sustentáveis, cumprindo acordos ambientais ao diminuir a quantidade de dióxido de carbono emitido, minimizando os impactos ambientais e reduzindo a dependência dos fósseis.



**Figura 5.** Matriz energética brasileira em 2020 (Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas)

Por outro lado, o Brasil, apesar dos excelentes índices, ainda tem um caminho a trilhar. A matriz energética brasileira ainda utiliza grandes quantidades de combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral. O governo ainda mantém fixos os valores de importância e revenda da gasolina, diesel, querosene e gás natural. As reservas de petróleo como o pré-sal são consideradas uma das maiores do mundo e movimentam muito a atividade de exportação do recurso no país, além de atrair inúmeros investidores para a área. Ainda no início de 2020, na reunião do G20, o Brasil se inclinou a integrar o esforço de coordenação internacional na busca de mecanismos para estabilizar o mercado internacional de petróleo. Em 2021, a G20 e a COP voltaram a discutir essas questões, pois o acordo de Paris se mostrou insuficiente para questões climáticas, o Brasil, entretanto, rejeitou o acordo nas duas sobre a taxa adicional ou concessão a importações de bens de acordo com as emissões de gás carbônico resultantes de sua fabricação, alegando que a tributação não resolvia a questão ambiental, dentre outros motivos. Além disso, o governo tem como plano energético aumentar a produção de petróleo e gás para atrair investidores e se tornar um dos cinco maiores produtores mundiais até 2050. Observa-se que as energias renováveis no Brasil tiveram maior investimento e implementação nos governos de 2002 a 2014. Já na atualidade, enfrenta-se uma situação de crise econômica, o que reforça ainda mais a necessidade de investimento em energias alternativas sustentáveis.

## 2.7. Energia geotérmica

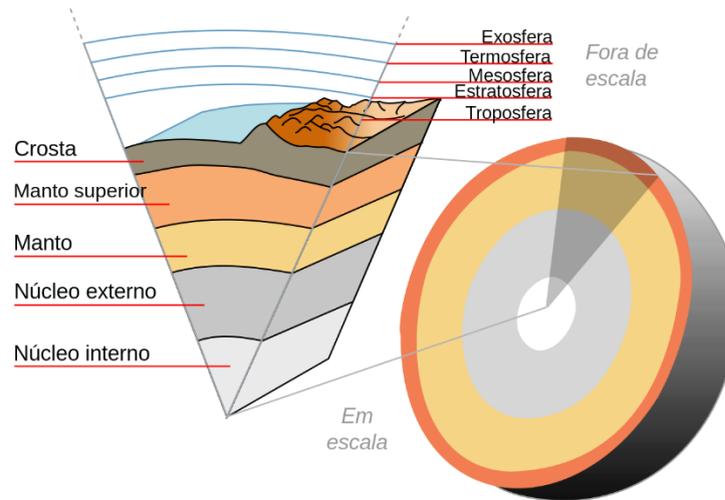
A energia geotérmica é energia extraída do calor proveniente do interior da Terra, mais especificamente do magma do núcleo do planeta. Esse tipo de energia surge como “nova”

alternativa de energia totalmente limpa por não ter emissão de poluentes. É renovável pela vantagem de reutilizar o fluxo extraído, injetando-o novamente na crosta terrestre. A energia geotérmica preenche as lacunas da sustentabilidade pela contribuição na redução de custos com a exploração e utilização de outras fontes, como o petróleo. Diferente de outras energias como a eólica e solar, a geotérmica independe de fatores externos como o movimento das massas de ar ou a luz do sol, permitindo desta forma uma produção estável (THE U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2021).

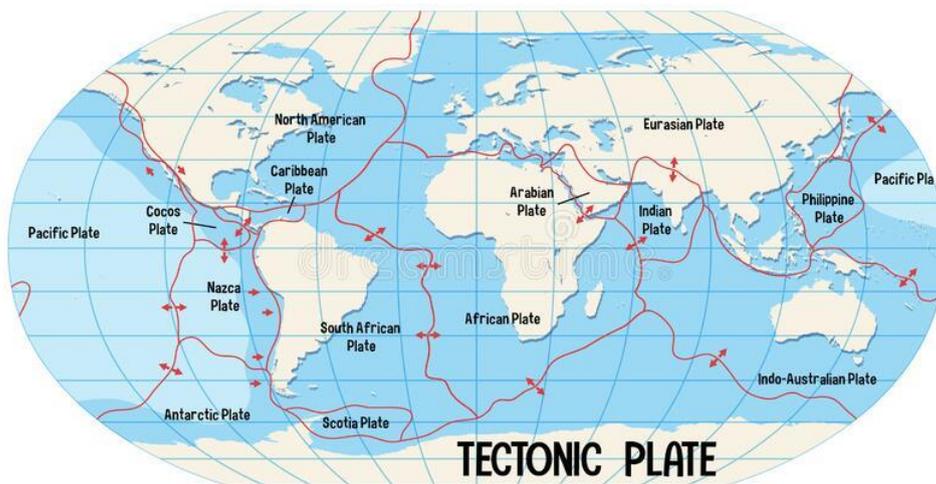
A energia geotérmica não é recente. Desde os tempos pré-históricos, os homens já exploravam áreas geotérmicas ativas, utilizando o calor para cozer seus alimentos, se aquecer e usufruindo de águas termais. Vulcões, fumarolas, gêiseres e chuveiros bacíferos são manifestações naturais da geotermia. Em si, a geotermia é uma área da geofísica que estuda a distribuição de calor no interior da Terra e seus fenômenos. O conhecimento do funcionamento térmico do interior do planeta é de grande importância, não só na geotermia, esse estudo se amplia e é aplicado nas explorações de petróleo e gás. Conhecer a temperatura interna da Terra é vital para definir as técnicas e equipamentos de extração e perfuração. O interior da Terra é constituído pela crosta terrestre, pelo manto e pelo núcleo em grande parte. A crosta é formada por grandes blocos rochosos. O manto é denso e se divide em manto superior e manto inferior, é nele que se encontra o magma. O núcleo também é dividido em externo e interno, a parte externa é de consistência líquida e a parte interna é mais sólida e densa. Então a Terra é basicamente formada por rochas e metais. A Figura 6 apresenta um esquema da estrutura da crosta terrestre (MCDONALD, 2010).

À medida que se perfura e aumenta-se em profundidade, as temperaturas das rochas subterrâneas aumentam. As rochas estão derretidas e o aumento termal é em função do gradiente térmico. Sendo um planeta quente, o calor interno da Terra flui para a superfície. Na camada externa da Terra, a crosta, este fluxo ocorre por condução, porém com intensidade variável, dependendo das condições geológicas e tectônicas do local. Ao medir essas grandezas pode-se inferir o estado térmico do interior da crosta.

Neste sentido, as áreas vulcânicas possuem um rol fundamental. Estas são zonas de intrusões com elevado potencial para uso da energia térmica, pois a temperatura é muito maior, o que é viável para uma usina geotérmica. A consonância da alta temperatura com pouca profundidade é considerada o ideal para exploração do território e implantação de usinas geotérmicas. As áreas geotérmicas são classificadas em função da temperatura, como baixa (<150 °C), média (150-200 °C) e alta (>200 °C) (ISMAIL, 2019). As áreas vulcânicas são consideradas de alta temperatura, principalmente situadas nos limites das placas tectônicas (Figura 7), enquanto a energia geotérmica de baixa temperatura é mais abundante.



**Figura 6.** Esquema da estrutura interna terrestre (Fonte: adaptação de uma imagem original do site <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-earth-layer-layer>)



**Figura 7.** Limites das placas tectônicas

**Figura 7.** Limite das placas tectônicas na crosta terrestre (Fonte: <https://pt.dreamstime.com/mapa-mundial-mostrando-os-limites-das-placas-tect%C3%B4nicas-ilustr%C3%A7%C3%A3o-dos-image221882726> )

## 2.8. Aplicação indireta: geração de energia elétrica

A própria classificação da energia geotérmica permite definir o seu fim. Em geral, a energia geotérmica de alta temperatura é utilizada para produção de vapor a alta pressão e, posteriormente, na produção de energia elétrica em turbinas de vapor. Uma usina geotérmica é uma forma indireta de aproveitamento do calor proveniente da Terra, uma vez que a energia térmica é convertida em energia elétrica. A classificação da qualidade do recurso geotermal é extremamente importante e o fator de maior peso para a construção das centrais geotérmicas, uma vez que esses recursos devem

apresentar temperaturas superiores a 200°C, o que define uma energia de alta entalpia. Deve ser considerado também a existência de aquíferos ou águas nas bacias subterrâneas, pois a existência desta é fundamental no funcionamento das usinas, de forma geral. O calor é extraído através das águas subterrâneas que absorvem o calor proveniente das camadas inferiores da crosta terrestre, ou seja, o uso do recurso é facilitado pela existência da água. Em caso de não haver água subterrânea suficiente, pode-se injetar água nos poços perfurados para acesso e extração de calor da Terra pela estimulação de rochas superaquecidas, em um processo denominado de metabolização térmica.

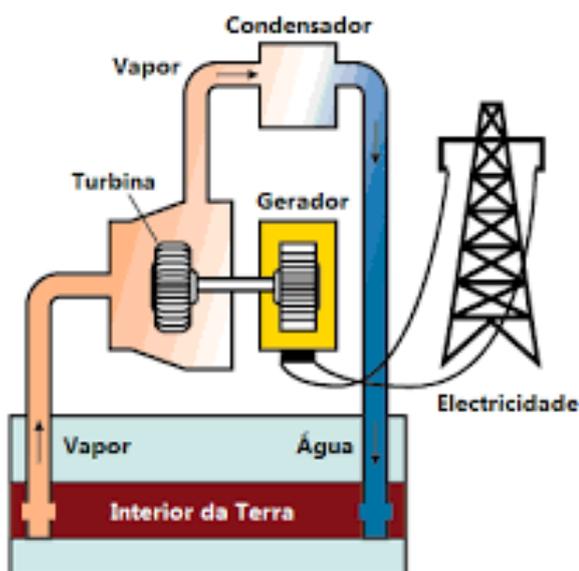
Inicialmente, os parâmetros que são avaliados para a construção e funcionamento de uma usina geotérmica incluem as principais condições do ambiente, a qualidade do recurso geotermal, o custo de operação e manutenção de equipamentos e tecnologias, profundidade e parâmetros financeiros. De forma geral, pode-se simular a construção de usinas através de um programa que ajuda a desenvolver a performance técnica e estimativa de custo de projetos visando construção de usinas. O Laboratório Nacional de Energias Renováveis (em inglês, *National Renewable Energy Laboratory*) do governo dos EUA é o criador do programa “*System Advisor Model – SAM*”, um sistema modelo para orientação e consultas que visa facilitar a tomada de decisões dos profissionais que atuam na indústria de energias renováveis. Este programa proporciona um mapeamento e uma análise da região candidata a possuir capacidade para uma usina fornecidos por estudos dos cientistas da área geotérmica.

Geralmente são construídas em áreas onde há grandes quantidades de vapor e água quente para alimentação dos geradores de turbinas, na ausência destes, o procedimento a ser adotado poderá ser uma metabolização térmica. Perfura-se o subsolo até o reservatório que contém vapor d’água. Esse vapor percorre tubos que o conduz até a central geotérmica, onde será direcionado, em alta velocidade e pressão para turbinas que transformam a energia mecânica em energia elétrica através de um gerador. Por fim, a eletricidade passa por um transformador que aumenta sua tensão elétrica e distribui essa eletricidade em linhas de alta tensão. O vapor quando passa pelas turbinas é conduzido para uma torre, onde é resfriado e se encontra na forma de água líquida. Essa água resfriada retorna ao reservatório subterrâneo, onde é injetada novamente nas rochas quentes, através das tubulações e reinicia o ciclo (ver esquema simplificado na Figura 8).

## **2.9. Aplicação da energia geotérmica no mundo**

A aplicação da energia geotérmica no mundo é bastante desigual como consequência da irregularidade do recurso. Apesar disto, o potencial da energia geotérmica é enorme, tal como relatado pelo Instituto de Tecnologia de Massachussetts em 2006, chegando a fornecer energia verde ao planeta por até 4000 anos (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006). A primeira usina geotérmica foi construída na Itália, no início do século XX, em Lardarello (Itália), onde está localizado o Museu Geotérmico (Figura 9). A cidade foi líder global na produção de energia geotérmica nos

anos 60. Com a chegada e desenvolvimento de novas tecnologias essa liderança foi assumida por outros países como Islândia e Estados Unidos, que possuem em seus territórios atividade vulcânica aflorada. Estes países se caracterizam por uma crosta mais fina e irregular nessas regiões, um requisito de peso pela facilidade para implementação e exploração do recurso geotermal para fins de produção de energia. Como valor de referência, um 95% da Islândia tem suas residências aquecidas diretamente pelo vapor subterrâneo, sendo hoje o maior país autossustentável no cenário das renováveis. Com isto, a Islândia consegue reduzir até 4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano com a utilização direta (aquecimento) e indireta oriundas da energia geotérmica.



**Figura 8.** Esquema básico de uma usina geotérmica (Fonte:

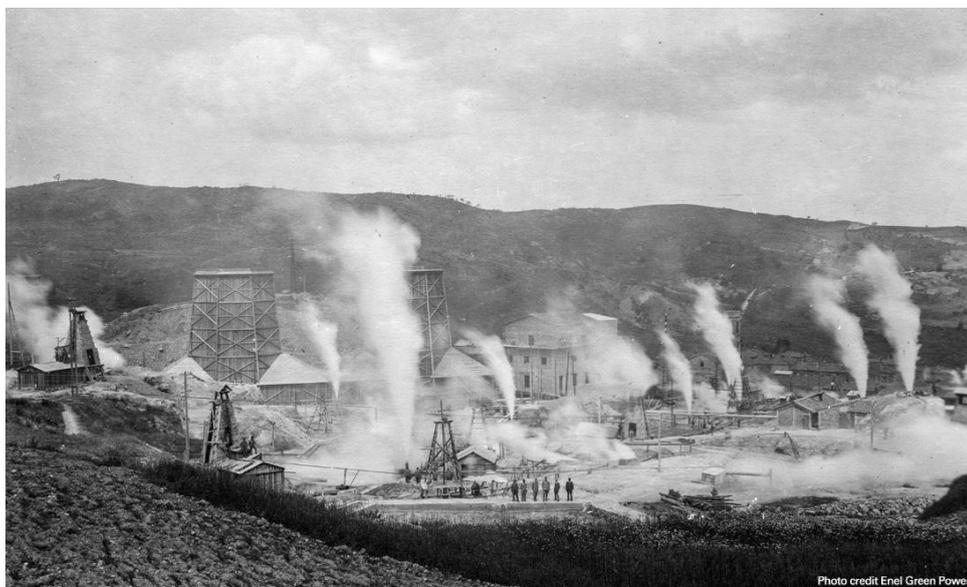
<https://rd9centralelectrica.webnode.pt/desenvolvimento/centrais-geotermicas/como-funciona-uma-central-geotermica-/>)

Os maiores produtores de energia elétrica de forma indireta através da geotermia são os Estados Unidos, Filipinas e a Indonésia, somados a um conjunto de 24 países que fazem uso da energia geotérmica, incluindo o Brasil (BERTANI, 2016). Na América do Sul, o cenário da energia geotérmica é conhecido por possuir valores de entalpia entre 100-120 mW m<sup>-2</sup>. Como exemplos de trabalhos, em países como Argentina, Chile, Colômbia, Equador e Peru apresentam, aproximadamente, 100 projetos de energia geotérmica espalhados por esses países.

### **2.9.1. Energia Geotérmica no Brasil.**

A geotermia no Brasil não é um recurso muito explorado. Os primeiros estudos mais sistemáticos deste recurso se iniciaram na década de 1970 com o uso em Taubaté (SP) até a década seguinte no processamento madeireiro. Em 1980, na cidade de Cornélio Procópio (PR), é utilizado um poço de 850 m de profundidade para o aquecimento de água para refervedores em uma planta de produção de café. Finalmente, Hamza *et al.* (HAMZA; GOMES; FERREIRA, 2005) demonstraram a viabilidade econômica de água termal de baixa temperatura para processamento de peles, além de indústrias

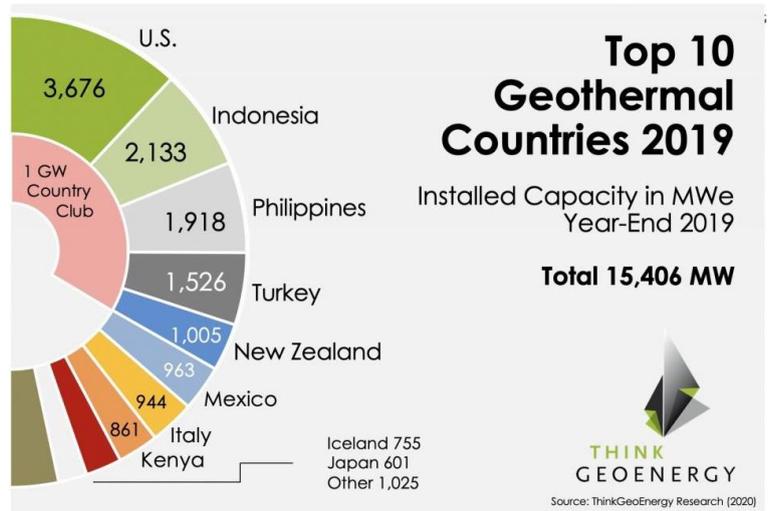
agro-industriais na região de Presidente Prudente (SP). Subsequentemente, Hamza realizou um estudo de preços relacionado com o recurso geotermal de baixa temperatura para geração de calor aplicada à indústria no Brasil, através de um levantamento dos dados geotermais disponíveis. O autor evidenciou que o sistema somente seria rentável para grandes demandas energéticas (acima de 200 °C para capacidade acima de 100 m<sup>3</sup>) (HAMZA; GOMES; FERREIRA, 2005). Em outros casos, o uso de energia elétrica ou hidrocarbonetos seria mais interessante. O primeiro estudo sistemático sobre a capacidade geotermal do Brasil foi apresentado por Hamza *et al.* (HAMZA; ESTON; ARAUJO, 1978), onde foi analisado o potencial de 44 diferentes regiões do país. O interesse da geotermia surge como parte dos projetos de pesquisa geofísica e exploração de recursos minerais feitos por empresas estatais como Petrobrás e a atual Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Serviço Geológico do Brasil. A Figura 11 apresenta o potencial geotérmico do Brasil e seu potencial aproveitamento (VIEIRA; HAMZA, 2014).



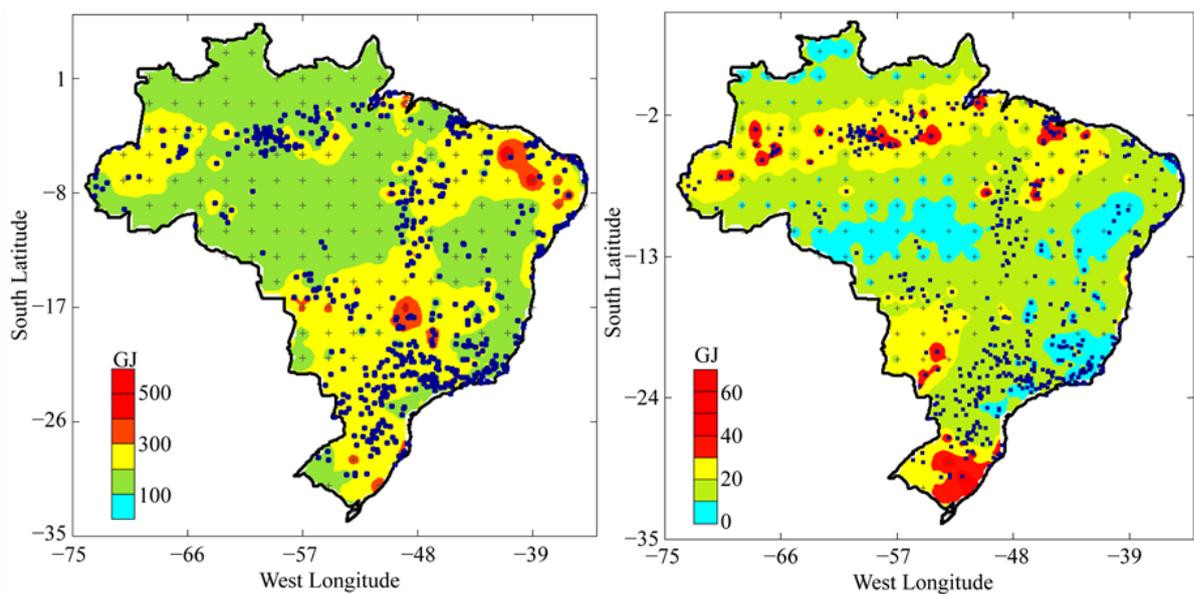
**Figura 9.** Imagens do aproveitamento da energia geotérmica em Lardarello (Itália) (Fonte: <https://www.enelgreenpower.com/pt/midias/photo/2020/03/lardarello-toscana-historia>)

O Brasil se encontra no meio da placa tectônica sul-americana, em uma região, portanto, estável. Os valores de entalpia no país são considerados próximos à média do continente da América do Sul. O Brasil é isento de atividades magmáticas recentes. Os recursos geotermais identificados em profundidades de até 1 km são de baixa entalpia, portanto, considerados de pouco conteúdo calórico (VIEIRA; HAMZA, 2014). De fato, a utilização direta do recurso em fontes termiais é muito restrita e, apenas, para fins turísticos e recreativos, como nas regiões de Poços de Caldas (MG), Caldas Novas (GO), Araxá (MG), Rio Quente (GO), Barras das Garças (MT) e Piratuba (SC). Os usos mais habituais são para bombas térmicas usadas em aquecimento ambiental, processos agroindustriais

ou em balneários. Apesar do potencial geotérmico no Brasil ser majoritariamente de baixa temperatura, existe uma região insular, as ilhas de Fernando de Noronha e Trindade com potencial geotérmico de alta temperatura. Já no aquífero Guaraní, segundo Cardozo, Hamza e Alfaro (2010), possuem indícios que apontam o evento de recursos geotérmicos de média entalpia em profundidades de 3 a 5 km. As regiões sul e sudeste (algumas partes do território) apontam temperaturas de 150 e 180 °C, que são recursos classificados como de alta entalpia. A Bacia do São Francisco e Triângulo Mineiro também estão inclusas nessas áreas.



**Figura 10.** Capacidade de energia geotérmica instalada em 2019 (Fonte: <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-geothermal-countries-2019-based-on-installed-generation-capacity-mwe/>)



**Figura 11.** Potencial geotérmico total do Brasil (esquerda), e potencial geotérmico recuperável (direita). Imagem extraída do manuscrito de Vieira e Hamza (2014) sobre licença CC-BY.

### 2.9.2. Aplicações diretas

A aplicação direta da geotermia consiste no aproveitamento direto do calor contido nos reservatório para aquecimento, sendo, inclusive, o uso mais geral e majoritário. Os recursos bases de uso direto são classificados como de baixa e média temperatura e tem seu uso para lazer, aquecimento de residências, fins agrícolas, secagem, criação de peixes, aquecimento de piscinas termais e outros. Mais de 80 países a utilizam dessa forma, que vem aumentando todo ano. Entre 2010 e 2015, houve um aumento de 45% no uso direto (LUND; BOYD, 2016). A Tabela 1 lista as principais aplicações e suas respectivas capacidade instalada no planeta.

**Tabela 1.** Aplicações diretas da energia geotérmica e suas respectivas capacidades instaladas no mundo (Fonte: Lund and Boyd (2016))

Aplicação	Capacidade instalada em 2015 (MWt)
Bombas de calor	49898
Aquecimento de residência	7556
Aquecimento de estufa	1830
Aquecimento de lagos de agricultura	695
Secagem agrícola	161
Uso industrial	610
Piscina termal (lazer)	9140
Refrigeração/Derretimento de neve	360
Outros	79
Total	70329

No Brasil, o uso da energia geotérmica é mais restrito. Os últimos dados de utilização encontrados datam de 2010, apresentados por Hamza e recolhidos em um artigo jornalístico por Amanda Corrêa (2019), onde pode ser observado que a maior parte do uso é recreativo, de balneoterapia e spa, enquanto um uso muito menor é para indústria de café e finalmente para piscicultura e aquicultura. A Tabela 2 recolhe os correspondentes valores.

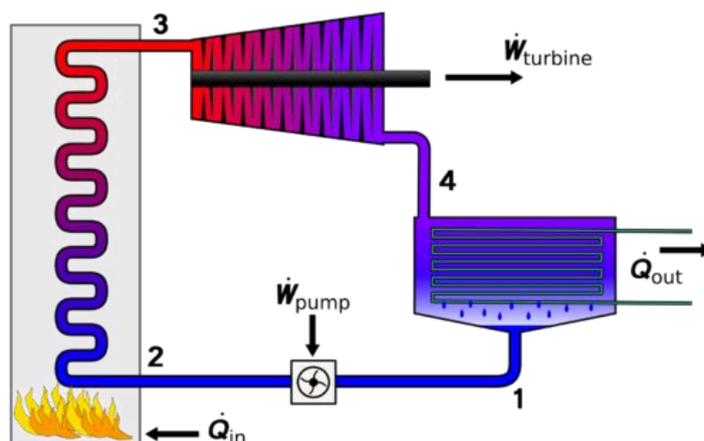
**Tabela 2.** Principais usos e potências da energia geotérmica no Brasil (Fonte; A. Correa (2019))

Uso direto	MWt	TJ/ano	%
Recreação aquática, balneoterapia e spa	355	6.530	98,6
Indústria de lã e café	4,2	77	1,2
Piscicultura e aquicultura	0,9	15,5	0,2

Total	360,1	6.622,4	100
-------	-------	---------	-----

### 2.9.3. Tecnologias

Observa-se que o principal e maior uso da energia geotérmica no país é destinado para aquecimento, baseado nisso, abordaremos algumas tecnologias que auxiliam no uso da energia geotérmica. Neste trabalho foi citado o vapor d'água como meio para transferência de calor da Terra para atender as necessidades de energia da população. Esse ciclo de potência do vapor d'água possui características que se somam no rol de vantagens na implementação dessa energia alternativa, pois possui baixo custo, disponibilidade, alta entalpia de vaporização e pode ser reutilizado. O ciclo termodinâmico que representa esse processo de geração de energia a partir do vapor é o ciclo Rankine. Sabe-se que o fluido de trabalho mais comum utilizado nesses ciclos é o vapor d'água. Esse ciclo é baseado em quatro processos termodinâmicos: compressão em uma bomba, fornecimento de calor a pressão constante, expansão em uma turbina, rejeição de calor a pressão constante em um condensador. A Figura 12 apresenta um esquema dele.



**Figura 12.** Ciclo termodinâmico de Rankine (turbina de vapor) (Imagem livre de direitos autorais)

### 2.9.4. Funcionamento de uma turbina

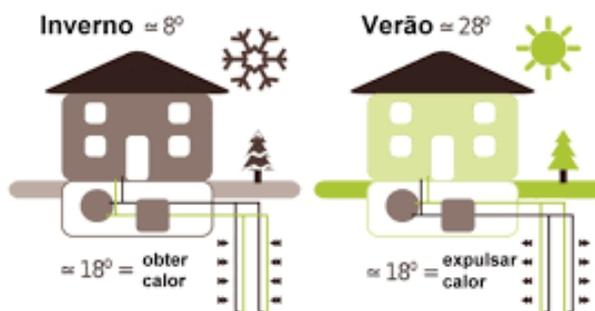
O funcionamento de uma turbina a vapor se baseia no ciclo de Rankine. Ele parte do uso de uma fonte de calor, podendo ser a queima de um combustível ou, por exemplo, o uso do calor armazenado na crosta terrestre (representado por  $Q_{in}$ ), o que permitirá a mudança de fase da água para a fase vapor de alta pressão. Este vapor seguidamente é enviado a uma turbina para transformar a energia contida no vapor em energia mecânica e posteriormente energia elétrica ( $W_{turbine}$ ). O vapor já em pressão reduzida é enviado a um condensador, cedendo o calor latente de condensação ( $Q_{out}$ ), para gerar novamente água líquida que será vaporizada, encerrando-se assim o ciclo da turbina de vapor de Rankine (DE LUCAS MARTINEZ; VILLASEÑOR; LOBATO, 2007).

### 2.9.5. Funcionamento de Bombas Térmicas

As bombas de calor ou bombas térmicas é um tipo de tecnologia utilizada para aplicação da energia

geotérmica em uso direto, ou seja, a bomba térmica é um tipo de destinação direta para o calor extraído. No geral, quando o recurso geotermal varia a sua temperatura até 150°C, utiliza-se esse recurso para aquecimento de ambientes, aplicações na agricultura, pisciculturas, balneoterapia e principalmente aquecimento de piscinas. A extração do calor nessa faixa de temperatura pode ser feita com auxílio da bomba térmica que utiliza o recurso geotérmico como fonte térmica. Por meio da bomba, o calor extraído é destinado para o local desejado. A expectativa é que o uso de bombas térmicas se torne comum em condomínios brasileiros. Uma bomba térmica é um dispositivo que extrai calor de um local e o torna disponível para o dissipador térmico. Um exemplo seria aquecer uma área através da liberação de calor para esse dispositivo.

A bomba térmica de fonte subterrânea (em inglês, *Ground-Source Heat Pump*, GSHP) são equipamentos que aproveitam e transferem calor, estão armazenados subterraneamente (a poucos metros abaixo da superfície terrestre), o que possibilita sua utilização para aquecimento de água e de edificações. É composto de três componentes principais (1) a própria bomba (2) uma conexão com a terra (3) um sistema interior de aquecimento (ou resfriamento). Sua vantagem está no fato de que ao bombear o calor, uma quantidade menor de energia elétrica é utilizada se comparada à necessária para converter energia elétrica em calor utilizando outros meios como, por exemplo, aquecedores elétricos. Levando-se em consideração a preservação da saúde do planeta, este dispositivo é de grande interesse e vantagem, pois reduz consideravelmente a emissão de CO<sub>2</sub> oriundas das queimas de combustíveis fósseis. A Figura 13 ilustra um sistema GHSP e seus componentes.



**Figura 13.** Esquema básico de uma bomba de calor a depender da estação do ano considerada  
(Fonte: <https://www.portal-energia.com/energia-geotermica-calor-da-terra/>)

Como pode ser observado, a temperatura do interior da crosta terrestre permanece constante, possibilitando que no inverno atue como fonte de calor para aquecimento das casas, com as temperaturas externas em valores inferiores. Contrariamente, durante o verão, em que as temperaturas exteriores são mais elevadas, a crosta é usada como reservatório de calor prévia captura do calor sensível cedido pelo ar. Este princípio básico simples rege o funcionamento deste tipo de sistemas.

### **3. Objetivos**

Com base no descrito no referencial teórico, e levando em consideração o potencial geotérmico do Brasil, este trabalho pretende realizar um levantamento singelo da possibilidade de uso tanto direto, quanto indireto, do calor disponível na crosta terrestre do país para alimentar uma área recreativa ou para produzir energia elétrica em uma usina geotérmica simulada.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Uso direto da energia para recreação

Baseado no uso da energia geotérmica, faremos uma proposta para uso da água aquecida procedente do subsolo para ser usada em banheiros como água de ducha. Consideraremos uma situação hipotética em que a água já vem na condição adequada, com uma temperatura aproximada entre 35 e 37 °C, que é considerada dentro da faixa de temperatura recomendada para tomar banho (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2017). Vamos considerar um resort que abriga um total de 300 quartos, sendo que cada quarto possui um chuveiro elétrico de configuração básica, com uma tensão de rede de 220 V, e uma potência de 5.500 W (<https://www.lorenzetti.com.br/produto/maxi-ducha>). Como tempo padrão de banho, consideraremos os dados apresentados por um estudo realizado pelo Centro Internacional de Referência em Reuso de Água (CIRRA) vinculado à Escola Politécnica da USP (CIRRA, 2009) que considera um tempo médio de banho de 10 minutos. Consideraremos que em médio a população brasileira toma dois banho diários (NUNES, 2021). Segundo dados do Observatório Nacional da Família (MMFDH, 2020), a média de pessoas por família é de 3,07 pessoas, número que será usado para realizar os cálculos.

Sem firmes dados para estimar a ocupação média dos hotéis na região considerada de estudo de Caldas Novas (GO), consideraremos um cenário pessimista com uma ocupação média de 30%, uma ocupação média de 50% e um cenário otimista com ocupação média de 70%. Apresentaremos a seguir os resultados correspondentes ao cenário considerado como médio.

Para uma ocupação média de 50%, 150 quartos estarão ocupados pelas famílias, cujo tamanho médio é de 3,07 pessoas, de forma que um total de 460,5 pessoas ocuparão o resort. Considerando um total de 2 banhos por pessoas, e uma duração total de 10 minutos, uma conta singela permite estimar que o total de tempo diário gasto por todos os ocupantes do hotel será de 153,5 h. A partir da potência do chuveiro, estimada em 5.500 W, é possível estimar o consumo diário de energia em 844,25 kWh. A partir dos valores da energia residencial do ENEL-GO (<https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/taxas,-tarifas-e-impostos/cartaz-tarifas-2021.pdf>), fixado em 0,6369 R\$/kWh, é possível estimar um custo diário de energia de 533,7 \$/dia. Em termos anuais, o custo do resort para energia seria de aproximadamente 196.000 R\$. Este custo, caso for usado a energia geotérmica aproveitando o calor do subsolo de Caldas Novas (GO), seria poupado da receita procedente do consumo de energia da companhia elétrica.

Com idêntico procedimento matemático é possível estimar as economias de energia para os outros cenários, recolhidos, neste caso, na Tabela 3. Como pode ser observado, independentemente do cenário considerado, sempre existe uma notável economia derivada do uso da energia geotérmica, o que capacita a esta alternativa como uma forma interessante de tornar mais sustentáveis os resorts recreativos estabelecidos em regiões com águas termais. Finalmente, outro cálculo de

interesse para ter uma melhor noção do benefício derivado do uso da energia geotérmica é a estimativa na quantidade de CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitido à atmosfera. De acordo com as estimativas do site Idesam (<https://idesam.org/calculadora/>), é possível estimar uma economia de emissão de CO<sub>2</sub> à atmosfera de 9,3 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais para o cenário pessimista, 15,5 toneladas de CO<sub>2</sub> para o cenário médio e 21,701 toneladas de CO<sub>2</sub> para o cenário mais otimista. Estes cálculos dão também uma ideia do benefício não só econômico, senão também ambiental que pode surgir como fruto do uso das águas termais subterrâneas em seu uso recreativo. Além disso, este CO<sub>2</sub> não emitido pode ser utilizado futuramente para créditos de dióxido de carbono que podem ser utilizados como incentivos na troca de créditos de carbono de cada país pelas quantidades de CO<sub>2</sub> emitidas (<https://www.sustainablecarbon.com/como-sao-gerados/>), benefício de grande valor para os diferentes países.

**Tabela 3.** Economia de energia caso seja usada o calor procedente do subsolo

<b>Tipo de cenário</b>	<b>Economia de gasto de energia elétrica (milhares de R\$)</b>
Pessimista	118
Médio	196
Otimista	274

#### **4.2. Produção de energia elétrica a partir do recurso geotérmico de alta entalpia**

Para poder realizar este estudo, serão consideradas as condições da única região do Brasil conhecida por possuir energia geotérmica de alta entalpia, situada na região sul e sudeste do estado de Minas Gerais (ALEXANDRINO; MAGALHÃES COUY; LOPES RODRIGUES, 2012). De acordo com o estudo destes autores, em algumas destas regiões é possível alcançar temperaturas na faixa de 150 a 180 °C, as quais permitiriam a produção de energia elétrica. Segundo os autores, essa temperatura pode ser alcançada a profundidades de aproximadamente 5 km. Com base nestes dados, apresentaremos uma memória de cálculo simplificada com ajuda das informações apresentadas por Montagner Escobar (2014). Consideraremos também a efeitos de projeto de uma usina geotérmica simplificada que se operará com um ciclo de Rankine simplificado em que injetaremos água líquida a uma temperatura de 25 °C e a temperatura que a água pode alcançar será de 180 °C. A esta temperatura, de acordo com as tabelas do vapor, a pressão de saturação é de aproximadamente 10 bar (DE LUCAS MARTINEZ; VILLASEÑOR; LOBATO, 2007). Comprovaremos agora a carga associada à coluna de líquido com ajuda da equação da carga hidrostática (Eq.1), onde  $\Delta P$  é a carga de cota,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h$  é a cota a considerar. A densidade da água a 180 °C é de 875 kg/m<sup>3</sup>, enquanto a 25 °C o valor é de 998,2 kg/m<sup>3</sup>. Para estimar a carga de cota, consideraremos um valor médio de 937 kg/m<sup>3</sup>. Com estes números, aplicando a Eq. 1, é possível estimar uma carga de cota de 459,4 bar, bem acima da pressão de saturação do vapor. Desconsideraremos as perdas de calor do tubo usado

para o transporte da água líquida até o reservatório térmico no fundo da perfuração e, da mesma forma, no trajeto de retorno a superfície. No trajeto de saída da água aquecida vindoura das profundidades do poço, produzirá-se a vaporização da água superaquecida quando a pressão de cota se iguale a pressão de vapor. Com ajuda da Eq. 1, a cota em que se produzirá a vaporização súbita será nos 98,2 m de profundidade.

$$\Delta P = \rho gh \quad (1)$$

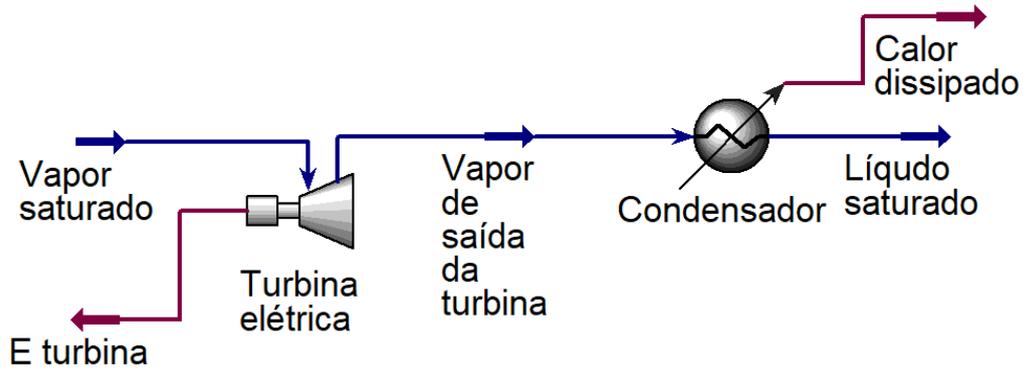
A partir deste momento a água vaporizará e chegará à turbina em condição de vapor saturado, com uma pressão de 10 bar, uma entalpia de -3141 kcal/kg, e uma entropia de 6,59 kcal/(kg °C). Para obter uma maior quantidade de energia, realizaremos uma despressurização até 0,1 bar, considerando que estes sistemas podem operar com vácuo parcial (MONTAGNER ESCOBAR, 2014). Com este cálculo, com ajuda das tabelas do vapor, é possível conhecer as propriedades de saída da turbina, elencadas na Tabela 4 (dados realizados com ajuda de uma simulação com o programa ASPEN HYSYS disponível no Instituto de Química da UnB).

**Tabela 4.** Propriedades da corrente de saída da turbina à pressão de 0,1 bar

Propriedade	Valor
Pressão (bar)	0,1
Temperatura (°C)	45,8
Entalpia da corrente (kcal/kg)	-3265
Entropia da corrente (kcal/(kg °C))	7,13
Fração de líquido na corrente	0,137
Entalpia do líquido saturado (Kcal/kg)	-3759
Entropia do líquido saturado ((kcal/(kg °C))	0,649
Entalpia do vapor saturado (Kcal/kg)	-3186
Entropia do vapor saturado ((kcal/(kg °C))	8,16

Com ajuda destes dados, é possível estimar a potência que a turbina de vapor com ajuda do simulador. Para uma eficiência isoentrópica da turbina de 75% (DE LUCAS MARTINEZ; VILLASEÑOR; LOBATO, 2007), valor típico deste tipo de dispositivos, é possível obter uma energia de 144 W por cada kg de água alimentado nas condições de projeto fixadas. Com este número, em função de uma determinada demanda de energia, é possível dimensionar o tamanho da turbina, assim como a quantidade de água que deve ser injetada no poço. A Figura 14 apresenta o diagrama de simulação usado para reproduzir o comportamento da turbina. Uma estimativa da eficiência da turbina pode ser realizada mediante a Eq. 2.

$$\eta = \frac{E_{turbina}}{E_{turbina} + calor\ dissipado} \quad (2)$$



**Figura 14.** Esquema de simulação da turbina e condensador do ciclo de Rankine (mesma nomenclatura à usada na Eq. 2)

Como produto da simulação, a quantidade de energia gerada na turbina é de 144 W por kg de água, sendo necessário 598,7 W por kg de água no condensador, rendendo, portanto, uma eficiência do ciclo de 19,4% (considerando as temperaturas de 180 °C como foco quente e 45,8 °C como foco frio, a eficiência do ciclo de Carnot correspondente seria de 37,6%).

Pensando com um pouco mais de perspectiva futura, cabe propor em, para aumentar a eficiência da turbina através de um fornecimento extra de energia, acoplar a energia geotérmica a energia solar térmica (aquecimento com ajuda da radiação solar). Com isto, seria possível aumentar mais a temperatura e pressão do vapor saturado acessando a turbina, o que iria aumentar a eficiência desta.

## **5. Conclusões**

Este trabalho tem mostrado o enorme potencial que a energia geotérmica possui para sua implementação tanto em uso direto para uso termal, por exemplo, em locais recreativos como resorts, com notáveis economias nos consumos de energia ou, em um formato mais avançado, mediante sua utilização em uma turbina de vapor para geração de energia elétrica. A opção do uso termal da energia da Terra já vem sendo utilizado em pequena escala no Brasil, porém, este trabalho mostra o enorme potencial para ainda ampliar mais este uso e, no caso do aproveitamento elétrico, os resultados demonstram o enorme potencial desta energia em locais com uma entalpia maior, como por exemplo, o sul do estado de Minas Gerais.

## 6. Referências Bibliográficas

ALEXANDRINO, C. H.; MAGALHÃES COUY, S. E.; LOPES RODRIGUES, F. Avaliação dos recursos geotérmicos de Minas Gerais. **Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas**, v. 1, n. 1, p. 1–17, 2012.

BERTANI, R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. **Geothermics**, v. 60, p. 31–43, mar. 2016.

BUCHHOLZ, K. **This is how inflation rates are increasing around the world**. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/inflation-plague-developed-nations-harmonised-consumer-price-index/>>.

CIRRA. **Estudo da USP mostra chuveiro elétrico como opção mais econômica para o banho**. São Paulo, Brazil: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.banhoeconomico.com.br/down/ci160409.pdf>>.

CORRÊA, A. **Energia geotermal – o que é, usos e presença no Brasil**. Disponível em: <<https://igeologico.com.br/energia-geotermal-o-que-e-usos-e-presenca-no-brasil/>>.

DE LUCAS MARTINEZ, A.; VILLASEÑOR, J.; LOBATO, J. **Termotecnia básica para ingenieros químicos. Procesos termodinámicos y máquinas**. 1st. ed. Ciudad Real, Spain: Universidad de Castilla-La Mancha, 2007.

EPE. **Boletim trimestral da energia eólica**. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-233/topico-520/Boletim\\_2020\\_Q1.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-233/topico-520/Boletim_2020_Q1.pdf)>.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.].

FARDIN, J. F. et al. Distributed Generation Energy in Relation to Renewable Energy: Principle, Techniques, and Case Studies. In: YAHYAOU, I. (Ed.). **Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Volume 2: Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 345–375.

HAMZA, V. M.; ESTON, S. M.; ARAUJO, R. L. C. Geothermal energy prospects in Brazil: A preliminary analysis. **Pure and Applied Geophysics PAGEOPH**, v. 117, n. 1–2, p. 180–195, 1978.

HAMZA, V. M.; GOMES, A. J. L.; FERREIRA, L. E. T. **Status Report on Geothermal Energy Developments in Brazil**. Proceedings World Geothermal Congress. **Anais...**Antalya, Turkey: 2005.

IRENA. **Global energy transformation: A roadmap to 2050**. Abu Dhabi, United Arab Emirates: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>>.

IRENA. **Renewable capacity statistics 2021**. Abu Dhabi, United Arab Emirates: [s.n.].

ISMAIL, B. I. Power Generation Using Geothermal Low-Enthalpy Resources and ORC Technology. In: ISMAIL, B. I. (Ed.). . **Renewable Geothermal Energy Explorations**. 1st. ed. London, UK: IntechOpen, 2019. p. 92.

JUNTUNEN, J. K.; MARTISKAINEN, M. Improving understanding of energy autonomy: A systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110797, maio 2021.

LÓPEZ-ORTEGA, M. G. et al. Sustainability analysis of bioethanol production in Mexico by a retrofitted sugarcane industry based on the Brazilian expertise. **Energy**, v. 232, p. 121056, out. 2021.

LUND, H. **Renewable Energy Systems**. 2nd. ed. [s.l.] Elsevier, 2014.

LUND, J. W.; BOYD, T. L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. **Geothermics**, v. 60, p. 66–93, mar. 2016.

MCDONALD, L. **The structure of earth**. Pelham, NY, USA: Benchmark Education Company, 2010.

MERRITT, H.; BARRAGÁN-OCAÑA, A. The impact of market factors on the development of eco-friendly energy technologies: the case of bioethanol. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 30 out. 2021.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Qual é a temperatura ideal para o banho?** Disponível em: <<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hc-ufg/comunicacao/noticias/qual-e-a-temperatura-ideal-para-o-banho>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

MMFDH. **Famílias e filhos no Brasil. Fatos e Números**. [s.l: s.n.].

MONTAGNER ESCOBAR, R. **Estudo de uma usina geotérmica a vapor, eficiência e custos no Brasil**. [s.l.] Instituto Federal do Espírito Santo, 2014.

NASA. **Climate Change: How Do We Know?** Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/evidence/>>.

NUMATA JR., F. An energy analysis of first to third-generation bioethanol production in Brazil: the potential for CO2 emissions. **International Journal of Energy Technology and Policy**, v. 17, n. 1, p. 38–60, 2021.

NUNES, B. Comprovado! Brasileiros tomam mais banho do que cidadãos de outros países. **Metrópoles**, p. 1, 31 ago. 2021.

ORECCHINI, F. The era of energy vectors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 14, p. 1951–1954, nov. 2006.

THE U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **What is geothermal energy?** Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/>>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced**

**Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century.** Idaho Falls, Idaho, USA:  
[s.n.].

VIEIRA, F. P.; GUIMARÃES, S. N. P.; HAMZA, V. M. **Updated Assessment of Geothermal Resources in Brazil.** 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society .  
**Anais...**Rio de Janeiro, Brazil: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2015.

VIEIRA, F. P.; HAMZA, V. M. Advances in Assessment of Geothermal Resources of South America. **Natural Resources**, v. 05, n. 14, p. 897–913, 2014.