

Revisão sistemática e patentária sobre geotermia aplicada a sistemas de resfriamento de edificações em clima tropical

Systematic and patent review on geothermic applied to building cooling systems in tropical climate

¹ Antônio Cardoso Ferreira, ² Luciane Cleonice Durante, ³ Ivan Julio Apolonio Callejas, ⁴ Emeli Lalesca Aparecida da Guarda

¹ Engenheiro mecânico, Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação, Universidade Federal do Mato Grosso (cardosomet@hotmail.com)

² Professora Doutora no Departamento de Arquitetura e membro PROFNIT – Universidade Federal de Mato Grosso (luciane.durante@ufmt.br)

³ Professor Doutor no Departamento de Arquitetura e membro PROFNIT – Universidade Federal de Mato Grosso (ivan.callejas@ufmt.br)

⁴ Mestre em Engenharia de Edificações, Doutoranda em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, Pesquisadora Associada da Universidade Federal do Mato Grosso (emeliguarda@gmail.com)

RESUMO: Constata-se que, atualmente, há um aumento da demanda para resfriamento de ambientes, visando a obtenção de condições adequadas de conforto térmico, em consequência do fenômeno de aquecimento global. Nesse sentido, também ocorre aumento da demanda de energia para abastecê-los e se destacam estudos sobre sistemas de condicionamento térmico passivos ou complementares aos sistemas ativos, tal como a geotermia. Assim, tem-se por objetivo investigar a aplicação da geotermia como estratégia de resfriamento em clima tropical, identificando suas potencialidades e viabilidade. Utiliza-se de revisão bibliográfica e patentária, tendo sido selecionadas 25 publicações científicas e 226 patentes em bases de dados. Os resultados evidenciam a Coreia do Sul e Estados Unidos como líderes de mercado; as tecnologias se relacionam às máquinas e equipamentos do setor de climatização. As pesquisas reconhecem os benefícios econômicos e ambientais da geotermia em comparação com soluções tradicionais, muito embora, somente um único estudo tenha sido localizado para climas tropicais.

Palavras-chave: Construções sustentáveis, Conforto térmico, Adequação ambiental.

ABSTRACT: It is noted that currently, there is an increase in the demand for cooling indoor spaces, aiming to achieve comfortable thermal conditions, due to the global warming phenomenon. Along with this, there is also a rise in the energy demand to supply these cooling needs, and studies on passive or complementary thermal conditioning systems, such as geothermal energy, are standing out. Therefore, the objective is to investigate the use of geothermal energy as a cooling strategy in tropical climates, identifying its potential and feasibility. The investigation involves reviewing scientific literature and patents, with 25 research papers and 226 patents selected from databases. The results show that South Korea and the United States are leading the market in this field, with the technologies being related to HVAC equipment. The research acknowledges the economic and environmental benefits of geothermal energy compared to traditional solutions, although only one study has been found specifically for tropical climates.

Keywords: Sustainable buildings, Thermal comfort, Environmental suitability.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é reportado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) como uma das principais ameaças à continuidade do desenvolvimento humano e tem causado impactos generalizados no ecossistema terrestre, como elevação da temperatura média do solo e oceanos, bem como extremos quentes e precipitação intensa em várias regiões. Apesar dos atuais modelos terem reduzido as incertezas das projeções de magnitude do impacto das mudanças climáticas e, ainda existam opositores ao fenômeno do aquecimento global, neste estudo se reconhece que as mudanças climáticas são um desafio-chave global para o século XXI.

As evidências são apresentadas pelo IPCC (2022) em seu Sexto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas (AR6), que indica cenários de aumento médio das temperaturas

globais de 1,0°C a 5,7°C até o ano de 2100, caso as emissões de gás de efeito estufa não sejam mitigadas e, que são necessárias transformações iminentes em todos os setores para atingir a o limite de aquecimento de 1,5°C até 2050, conforme estabelecido no Acordo de Paris. Para tanto, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) precisam parar de crescer até 2025 e, depois, cair 43% até 2030, em relação aos níveis de 2019.

Diversas pesquisas relacionadas ao ambiente construído – cidades e edificações – evidenciam o fenômeno de aquecimento global. Duursma (2002) verificou tendência de aumento da temperatura de +0,12°C em Quito (Equador) e de +0,60°C em São Paulo (Brasil), nos últimos 100 anos. Também Casagrande e Alvarez (2013) afirmam que, a partir da década de 1920, há uma tendência de aumento das temperaturas, com registro de +0,8°C no ano 2000, em relação às médias de 1961 a 1990. Guarda, Durante e Callejas (2018) apresentam que as temperaturas médias anuais irão aumentar e a umidade relativa do ar diminuir, em todas as zonas bioclimáticas do estado de Mato Grosso, até o fim do século. Guarda et al. (2020), em estudo preditivo das condições termohigrométricas na cidade de Cuiabá, constataram que a média anual da temperatura externa variará de 26,73°C, no ano de 2021, para 32,48°C, no ano de 2080 (+5,75°C%) e a umidade relativa do ar externo passará de 69,08%, em 2021, para 53,67% (-22%), em 2080.

Diante dessas previsões, se torna importante abordar o impacto do aquecimento global nos processos produtivos que se desenvolvem no interior dos edifícios, bem como na habitabilidade, uma vez que, cada vez mais, verifica-se que estes operam por meio de sistemas de controle térmico artificiais. Sob esta perspectiva, os eventos extremos, cujas previsões indicam que serão mais recorrentes e, especialmente aqueles relacionados com ondas de calor, podem afetar sobremaneira esses processos produtivos. Um estudo conduzido no Brasil, considerando registros meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), aponta elevação na frequência das ondas de calor no país nas últimas cinco décadas, com maioria das ocorrências concentradas após o ano 2000. Constatou-se, também, que elas estão mais duradouras e intensas, o que sugere que as mudanças climáticas globais têm influenciado o campo de temperatura no Brasil (BITENCOURT et al., 2016). Diante desse cenário, estratégias de adaptação focadas na redução dos efeitos do aquecimento global são de fundamental importância visando o enfrentamento das mudanças climáticas.

Para manter a ambiência ideal e garantir adequado conforto térmico no interior das edificações, em algumas regiões do Brasil, como em clima de savana, somente o uso de estratégias passivas de adequação do projeto ao clima que se relacionem à envoltória da edificação (aberturas, sombreamento e materiais que definem o aquecimento nas paredes e coberturas) tem-se mostrado insuficiente para tal fim. Assim sendo, se faz necessária uma grande demanda no consumo de eletricidade para sustentar os sistemas ativos.

Nos cenários de aquecimento global, a aplicação de soluções renováveis e sustentáveis que possibilitem melhorar as condições térmicas de edifícios, mesmo que sejam complementares aos sistemas convencionais, reduzem dependência e os custos com energia elétrica. Diante disso, diversas estratégias podem ser propostas para reduzir o consumo de energia devido à utilização de equipamentos ventilação, de aquecimento, e ar-condicionado (HVAC, do inglês Heat, Ventilation and Air Conditioning) nas edificações, dentre elas, o atendimento aos regulamentos energéticos de edifícios (programas de etiquetagem e níveis mínimos de eficiência), eficientizar os sistemas elétricos (ventiladores, exaustores e condicionadores de ar), trabalhar com aspectos que interferem nos sistemas de condicionamento térmico, tais como diminuir a temperatura do ar externo admitido (pré-resfriamento), bem como fazer uso de sistemas complementares, como a geotermia, objeto deste estudo.

A geotermia se propõe a utilizar o solo como forma de se trocar calor com o ar. Em consequência da sua alta capacidade térmica, o solo pode trabalhar como um reservatório

térmico, aquecendo ou resfriando o ar do ambiente interno das edificações, dependendo das condições climáticas, o que se denomina sistema geotérmico (HOLLMULLER, 2006). Já aplicado em outros países da Europa e nos Estados Unidos há pelo menos 20 anos, o sistema geotérmico é uma das alternativas de energia renovável que mais cresce no planeta.

O solo, dependendo de suas propriedades – composição e umidade – possui alta resistividade e capacidade térmica, o que estabiliza a sua temperatura. Os sistemas geotérmicos envolvem o uso de tubos enterrados no solo, nos quais o ar circula antes de ser trazido para dentro da edificação (trocares de calor terra-ar) (HAZER, 1995).

Diversos autores têm estudado o tema, dentre eles Cunha e Bourne-Webb (2022) que afirmam ser a energia geotérmica uma fonte renovável de energia digna de investimento e desenvolvimento, principalmente em relação à energia térmica da subsuperfície rasa do solo, geralmente explorada usando bombas de calor geotérmicas para trocar e armazenar o calor do solo. Esses sistemas de energia podem fornecer aquecimento e/ou resfriamento aos edifícios, ajudando na redução das emissões de gases nocivos.

O potencial de geotermia já foi estudado para locais do território brasileiro por Alves (2014), que concluiu que o uso da geotermia se mostrou mais útil em Curitiba, Santa Maria, Belo Horizonte, Brasília, Vitória da Conquista, Campo Grande e Belém, dentre os demais locais analisados. Para a cidade de Cuiabá, localizada no Estado de Mato Grosso, Porto et al. (2018) estimou o potencial da geotermia e realizou medição da temperatura do solo em diversas profundidades., concluindo que, no solo exposto à radiação solar, a temperatura média a 80 centímetros de profundidade foi de 29,6°C. Já a temperatura média, na mesma profundidade, foi de 26,9°C em uma localidade com sombreamento da superfície do solo. Logo, em um projeto de climatização por tubo enterrado, a cobertura da superfície do solo deve ser avaliada.

Sabe-se que a geotermia possui custo de implementação inicial maior se comparado a sistemas elétricos convencionais, porém, apresenta baixa manutenção e vida útil mais longa. Diante disso, o objetivo desse estudo é investigar a aplicação da geotermia como estratégia de resfriamento em clima tropical, identificando as variáveis de dimensionamento, suas potencialidades e viabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODO

A pesquisa é de natureza aplicada, pois busca a aquisição de novos conhecimentos voltados para um escopo prático. Com relação à abordagem, é quantitativa. Quanto ao objetivo, enquadra-se como uma pesquisa exploratória, buscando expor de forma geral uma determinada necessidade, relacionando-a com outros valores e propondo uma solução eficiente (CASARIN e CASARIN, 2012).

O percurso metodológico desenvolve-se em duas etapas: a de revisão sistemática, baseada em Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015) e a de revisão patentométrica, baseada em Castro e Figueiredo (2005) e Bazzo (2010).

O tema de interesse da revisão sistemática trata-se da geotermia aplicada a sistemas de resfriamentos em clima tropical. O enfoque se volta para a utilização de uma energia renovável, limpa, que não gera resíduos. Pretende-se com isso responder as seguintes questões: Quais os parâmetros para o dimensionamento? Quais os aspectos positivos e negativos do sistema? Quais as profundidades dos tubos enterrados? Quais as variações dos resultantes do sistema de resfriamento? Qual a temperatura do solo? Qual o tipo de solo?

Para a revisão sistemática foi utilizada a base de dados Web of Science, em duas buscas. Na primeira, selecionaram-se na base de dados somente as publicações de países de clima tropical, foco da pesquisa, para que fossem evitadas aplicações para fins de aquecimento em climas temperados ou frios. Utilizaram-se as palavras-chave “geothermal”, “climatization”, com operadores booleanos “and” e “or” e janela temporal dos últimos dez anos, isso em função

do desenvolvimento da tecnologia. Foi observado que a seleção de países de clima tropical não restringiu as publicações sobre climas frios e para fins de aquecimento. Assim, partiu-se para a segunda busca, utilizando as palavras-chave “geothermal” e “tropical climate”, com operadores booleanos “and” e “or”, sem restrição de data.

Adotou-se o método Design Science Research (DSR), proposto por Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015), no qual se buscou o critério de avaliação da qualidade dos estudos primários, avaliando a qualidade da execução do estudo, adequação à questão da revisão e adequação ao foco da revisão, em alta, média e baixa, conforme o Quadro 1. Avaliadas as três dimensões, os resultados foram consolidados conforme a relevância, atribuindo-se o critério de alta, média e baixa relevância. Foram selecionados apenas os estudos que apresentaram pelos menos dois critérios de alta relevância.

Quadro 1 – Critérios para avaliação das dimensões dos estudos primários

	Qualidade da execução do estudo	Adequação à questão de revisão	Adequação ao foco da revisão
Alta	O método proposto atende aos padrões exigidos para o tema em estudo, o estudo seguiu rigorosamente o método proposto e os resultados apoiam-se em fatos e dados.	O estudo aborda exatamente o assunto alvo da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto idêntico ao definido para a revisão.
Média	O método proposto possui lacunas em relação aos padrões exigidos para o tema em estudo ou o estudo não demonstra ter seguido o método proposto na sua totalidade ou os resultados não se apoiam integralmente em fatos e dados.	O estudo aborda parcialmente o assunto alvo da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto semelhante ao definido para a revisão.
Baixa	O método proposto não está de acordo com padrões exigidos para o tema em estudo ou o estudo não demonstra ter seguido o método proposto ou os resultados não se apoiam em fatos e dados.	O estudo apenas tangencia o assunto alvo da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto diverso do definido para a revisão.

Fonte: Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015)

Já a prospecção de patentes foi realizada utilizando-se os seguintes termos: “cooling” e “geothermal”, com operador booleano “and”, na plataforma Questel Orbit® (QUESTEL ORBIT, 2023), sem nenhum tipo de filtro. Os resultados foram expressos em termos de países que dominam a tecnologia, ou seja, principais mercados, visão geral da tecnologia, local de maior aplicação da tecnologia e as tendências de investimentos nos últimos 20 anos.

3. RESULTADOS

3.1. Revisão sistemática

A primeira e segunda busca resultaram em 405 e 28 publicações, sendo que, após a leitura dos títulos e resumos foram selecionados 16 e 14 artigos, respectivamente. Destes, houve repetição de dois artigos (Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil e Energy pile and ground temperature response to heating test: a case study in Brazil), restando 25 artigos para análise (Quadro 2).

Quadro 2 – Critério de realização das buscas

Critérios	1ª Busca	2ª Busca
Palavras-chave	geothermal; climatization	geothermal; tropical climate
Total de artigos	405 artigos	28 artigos
Selecionados após leitura dos títulos e resumos	16 artigos	14 artigos
Artigos de acesso livre	14 artigos	13 artigos
Número de artigos de repetidos nas buscas	2 artigos	

Os artigos foram lidos e avaliados em relação às dimensões de qualidade de execução, adequação às questões e ao foco da revisão, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Aplicação dos critérios de avaliação das dimensões das publicações

Buscas	Autores	Avaliação das dimensões			Avaliação do estudo
		Qualidade da execução do estudo	Adequação à questão de revisão	Adequação ao foco da revisão	
1ª Busca	Cunha e Bourne-Webb (2022)	Alta	Média	Média	Média
	Santos Sá et al. (2022)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Aprianti et al. (2021)	Alta	Média	Média	Média
	Sofyan et al. (2020)	Alta	Média	Média	Média
	Morais et al. (2020)	Alta	Média	Alta	Alta
	Kappler et al. (2019)	Alta	Baixa	Alta	Baixa
	Baser, Mccartney e Ozdogan-Dolcek (2019)	Alta	Média	Média	Média
	Ozcan et al. (2019)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Yilmaz (2017)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Kilic (2016)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	De Nardin et al. (2016)	Alta	Média	Média	Média
	Morais et al (2016)	Alta	Média	Média	Média
	Imal, Yilmaz e Pinarbaşı (2015)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Camdali e Tuncel (2013)	Alta	Média	Média	Média
2ª Busca	Morais, Sousa e Tsuha (2019)	Alta	Média	Média	Média
	Mongkon et al (2014)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Roy et al (2020)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Lyu et al. (2019)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Singhal, Yadav e Prakash (2023)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Riaz et al. (2017)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Fong, Lee e Zhao (2017)	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
	Düber, Fuentes e Narsilio (2023)	Alta	Média	Média	Média
	D'agostino et al. (2020a)	Alta	Alta	Alta	Alta
	D'agostino et al. (2020b)	Alta	Alta	Alta	Alta
	Ratchawang. et al. (2022)	Alta	Média	Média	Média

Santos Sá et al. (2022) apresentam informações sobre a variação da temperatura do solo durante 20 anos de operação de um sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP), em São Paulo. A temperatura média inicial do solo era de cerca de 23,8°C e o estudo indica um aumento de aproximadamente 11°C na temperatura do solo após 20 anos. Os principais parâmetros que afetam o desempenho do sistema geotérmico são as cargas de aquecimento e resfriamento a profundidade dos tubos enterrados, o tipo de material dos tubos e os diâmetros internos e externos dos tubos utilizados no sistema. Citam como parâmetro importante a ser definido em um sistema geotérmico, o coeficiente de desempenho da bomba de calor, que considera a eficiência da bomba e fornece a quantidade real de calor que deve ser rejeitada ou extraída do solo.

Morais et al. (2020) discutem a importância da resposta térmica do sistema geotérmico em solos tropicais brasileiros não saturados e como as variações sazonais afetam essa resposta térmica. Os autores realizaram monitoramento da temperatura de um solo tropical brasileiro, composto por uma camada residual de arenito (areia média a fina com presença variável de argila) coberta por uma camada superficial de areia argilosa laterítica (solo coluvial), sendo que uma espessa camada de seixos separa a camada superficial do solo. As medições indicam que, na profundidade de 3,5m, a temperatura ambiente influencia levemente a temperatura do solo, podendo ser considerada constante ao longo do ano, porém é influenciada pela flutuação sazonal do lençol freático.

Mongkon et al. (2014) estudaram o sistema geotérmico de tubo de terra horizontal (HETS) para aplicação em estufas na condição tropical da Tailândia. Os parâmetros estudados demonstraram que o aumento de comprimentos, profundidades, diâmetros e velocidades do ar poderia aumentar o desempenho do sistema, especialmente o diâmetro e a velocidade do ar, o que aumentaria o coeficiente de performance (COP). O valor adequado do comprimento do tubo foi de 40 m, a uma profundidade de 1,5 m, cuja capacidade de resfriamento por dia foi de 17,30 kW/dia (quase constante), com taxa de resfriamento por comprimento de 0,43 kW/m e o COP médio de 2,53. Os efeitos do tubo foram estudados variando-se os seus diâmetros e materiais (aço ou plástico). O aumento do diâmetro reduz a velocidade do ar através do HETS e a taxa de transferência de calor, bem como aumenta a capacidade de resfriamento por dia e o Coeficiente de Performance (COP) médio do sistema, muito embora a temperatura do ar de saída aumente.

Com relação aos aspectos negativos, a alta umidade causada pelo uso do HETS pode aumentar a taxa de respiração e decomposição das plantas, o que pode afetar negativamente a sua produção em ambientes destinados a esse fim, tal como a estufa estudada. Além disso, o desempenho do sistema de tubo de terra horizontal (HETS) pode ser afetado por variações no microclima dentro da estufa e pela intensidade solar ao longo do período de cultivo. Para obter o máximo desempenho, pode ser necessário combinar o sistema de tubo de terra horizontal (HETS) com outros métodos de resfriamento, como ventilação natural e resfriamento evaporativo.

Os autores também mencionam que o sistema geotérmico de tubo de terra horizontal (HETS) foi capaz de resfriar a estufa com eficiência, resultando em uma redução significativa da temperatura do ar em seu interior. Durante o período de teste, a temperatura do ar dentro da estufa com sistema de tubo de terra horizontal (HETS) foi mantida em torno de 28-30°C, enquanto a temperatura do ar na estufa convencional sem HETS atingiu 35°C. O uso do sistema de tubo de terra horizontal (HETS) também ajudou a manter a umidade relativa dentro da estufa em torno de 70%, o que é considerado adequado para o crescimento das plantas. No entanto, é importante notar que o desempenho do sistema de tubo de terra horizontal (HETS) pode ser afetado por variações no microclima dentro da estufa e pela intensidade solar ao longo do período de cultivo.

Roy et al. (2020) estudaram os parâmetros para o dimensionamento de um sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) em profundidades entre 83 e 141 m. Segundo os autores, os parâmetros de dimensionamento de um GSHP devem incluir dados da edificação, como a espessura das paredes externas da edificação, tipo e espessura dos vidros das janelas, largura do sombreamento das superfícies, pico de carga de aquecimento e resfriamento, hora de aquecimento e resfriamento anual, bem como do equipamento, tais como valores mínimo e máximo de temperatura do fluido de entrada (EFT) para aquecimento e resfriamento, tipo de bomba e as propriedades térmicas do solo.

Os fatores críticos que influenciam o desempenho e a viabilidade do sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) incluem a condutividade térmica do solo, sistema de taxa de energia de aquecimento/taxa de energia de resfriamento (HER/HRR), tipo de condição climática (ou seja, se é dominado por resfriamento ou aquecimento), carga anual de aquecimento e resfriamento, condições geológicas do solo, condições das águas subterrâneas, possível interferência de sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP) adjacentes durante operações de longo prazo, padrão de uso e especificações da bomba de calor. O dimensionamento e a profundidade dos tubos dependem de vários fatores, como a condutividade térmica do solo, o clima local, a carga térmica do edifício e o tipo de sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) utilizado.

A taxa de energia de aquecimento/taxa de energia de resfriamento (HER/HRR) se refere à taxa de energia necessária para aquecer ou resfriar um edifício. Já o sistema de carga de pico

de saída da capacidade instalada se refere à carga máxima de saída da capacidade instalada de um sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP). Em outras palavras, o sistema de carga de pico de saída da capacidade instalada é a capacidade máxima do sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) em fornecer energia térmica para aquecimento ou resfriamento em um determinado momento. Ambos os sistemas são importantes para o dimensionamento e desempenho do sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP).

Para Lyu et al. (2019), em estudo desenvolvido em Shenyang, Pequim e Xangai sobre um sistema fechado e vertical, os parâmetros de projeto para o sistema de pré-tratamento de ar fresco são definidos com base no volume mínimo de ar fresco (2000 m³/h) e na diferença de temperatura do ar projetada (10°C). Além disso, é mencionado que a taxa média de transferência de calor do permutador de calor do solo (GHX) é definida como 30-50 W/m linear de tubo enterrado e que são necessários, aproximadamente dois furos, de 100 m de profundidade com um único tubo em “U” para tratar os 2000m³/h de ar fresco. Os aspectos positivos são potenciais de economia de energia tais como a redução da carga de pico e a utilização de energia geotérmica, que é uma fonte renovável e sustentável. Com relação aos aspectos negativos, pode-se inferir que a implementação do sistema proposto pode exigir investimentos iniciais significativos em infraestrutura e equipamentos.

Singhal, Yadav e Prakash (2023) relatam que, para determinar a configuração ideal de um sistema geotérmico fechado e horizontal, na Índia, foi realizada uma análise paramétrica usando o código de análise de desempenho do túnel de terra-ar (PEAT), para selecionar o tamanho ideal do sistema de resfriamento acoplado a uma estufa. A análise foi realizada para três tamanhos diferentes de tubos do sistema geotérmico, disponíveis comercialmente (12, 18 e 24 polegadas de diâmetro). Para cada sistema geotérmico, o desempenho foi acessado para três conjuntos de velocidades (2, 4 e 6 m/s), para determinar o comprimento necessário para manter a temperatura de saída constante em 30°C (temperatura ótima para o crescimento das plantas). Os aspectos positivos incluem a utilização de energia renovável e geotérmica para melhorar o desempenho térmico de estufas em condições tropicais, bem como a modelagem numérica para simular diferentes cenários e encontrar a configuração ideal do sistema geotérmico acoplado à estufa. No modo de resfriamento, a temperatura do ar diminuiu em 13,6°C. A temperatura do solo a 4 m de profundidade variou entre 24°C e 29°C apenas, com solo aluvial.

D’agostino et al. (2020a) realizou uma investigação por meio de um modelo numérico bidimensional de um trocador de calor terra-ar constituído por um número variável de tubos circulares horizontais enterrados (para escoamento de ar) instalados a 2,5 m de profundidade, com comprimento de tubo que variaram de 20 a 140 m e velocidade do fluxo de ar 2,5m/s, no Rio de Janeiro, Dubai, Nápoles e Ottawa. O sistema inovador traz benefícios econômicos e ambientais consideráveis, incluindo períodos de retorno estático e dinâmico curtos e uma redução nas emissões de gases de efeito estufa.

Os autores mencionam que essa profundidade foi escolhida porque, para profundidades superiores a 2m abaixo da superfície, as temperaturas do solo são aproximadamente constantes e próximas dos valores médios anuais do ar externo. A temperatura não perturbada do solo é aproximadamente constante e próxima dos valores médios anuais do ar externo. A troca de calor entre o solo e o ar que passa pelo tubo enterrado é regida em grande parte pela diferença de temperatura entre o solo e o ar. De acordo com o artigo, o sistema inovador de trocador de calor terra-ar traz benefícios econômicos e ambientais consideráveis em comparação com a solução tradicional. Especificamente, os períodos de retorno estático e dinâmico ao usar o sistema com o trocador de calor terra (GAHX) foram cerca de 2,1 e 2,4 anos. Além disso, houve uma redução de 17% nas emissões de gases de efeito estufa. Esses resultados sugerem que o uso do trocador de calor terra-ar pode ser uma opção vantajosa para sistemas HVAC em certas situações ou condições climáticas, com sistemas abertos e disposição horizontal da tubulação.

Em um segundo artigo sobre a temática, agora sob o aspecto qualitativo, D'agostino et al. (2020b) relatam que o sistema inovador de trocador de calor terra-ar traz benefícios econômicos e os parâmetros para o dimensionamento de trocadores de calor terra-ar incluem a velocidade do ar, a profundidade, o diâmetro, o comprimento e o material do duto. O estudo menciona que o comprimento do tubo é o fator mais influente e que não há combinações unívocas de parâmetros de projeto para otimizar todo o desempenho energético ao mesmo tempo, ou seja, diferentes combinações de parâmetros podem ser necessárias para otimizar diferentes aspectos do desempenho energético. No entanto, traz os seguintes recomendações para o dimensionamento: comprimentos do tubo (30, 60 e 100m), profundidades (3 a 6m, sendo que a considerada ideal para o sistema é de 4 m de profundidade, por proporcionar uma temperatura constante), velocidade do ar (1,5m/s), espessura do tubo (0,003m), diâmetro do tubo (0,062m). As principais vantagens do uso de trocadores de calor terra-ar (EAHX) como unidade de pré-tratamento de sistemas de ar condicionado incluem: i) o fluido de trabalho é o ar, que é ilimitado e livremente disponível; ii) os consumos energéticos dos sistemas de trocadores de calor terra-ar (EAHX) autônomos ou trocadores de calor terra-ar/aquecimento, ventilador e ar condicionado (EAHX/HVAC) acoplados são inferiores aos dos sistemas HVAC tradicionais, assim como, também, são superiores seus coeficientes de desempenho; iii) o sistema de trocadores de calor terra-ar (EAHX) é simples, portanto requer poucos custos de manutenção e operação; iv) o impacto ambiental decorrente da operação dos sistemas trocadores de calor terra-ar (EAHX) é reduzido em relação aos tradicionais, pois o primeiro é abastecido por fonte de energia renovável.

Os resultados do sistema de resfriamento variam de acordo com o comprimento do duto e as condições climáticas da região. Os parâmetros calculados incluem a variação da temperatura do ar e a eficiência térmica do trocador de calor terra-ar (EAHX), bem como a diminuição da capacidade de resfriamento e aquecimento das serpentinas na unidade de tratamento de ar (AHU). Os melhores resultados foram obtidos para um comprimento de duto de 100 metros em Ottawa (clima continental úmido de verão quente, redução de 65% da capacidade), enquanto os piores resultados foram encontrados no Rio de Janeiro (clima tropical úmido e seco, redução máxima de 24%). Portanto, as variações dos resultantes do sistema de resfriamento dependem das condições climáticas locais e das características específicas do sistema utilizado (D'AGOSTINO et al., 2020b).

3.2 Revisão patentária

Das 226 patentes mapeadas, 52% estão ativas com status de “concedido”, 10% constam como “pendente”, 2% como “expirado”, 12% como “reivindicadas”, 12% como “revogado” e 24% perderam a validade antes do término do prazo normal de proteção, com status “caducado”.

A partir deste universo, identificaram-se os principais grupos de classificação das patentes com base na Classificação Cooperativa de Patentes (CPC), considerando a existência de registros pertinentes a mais de um grupo de classificação (Tabela 1).

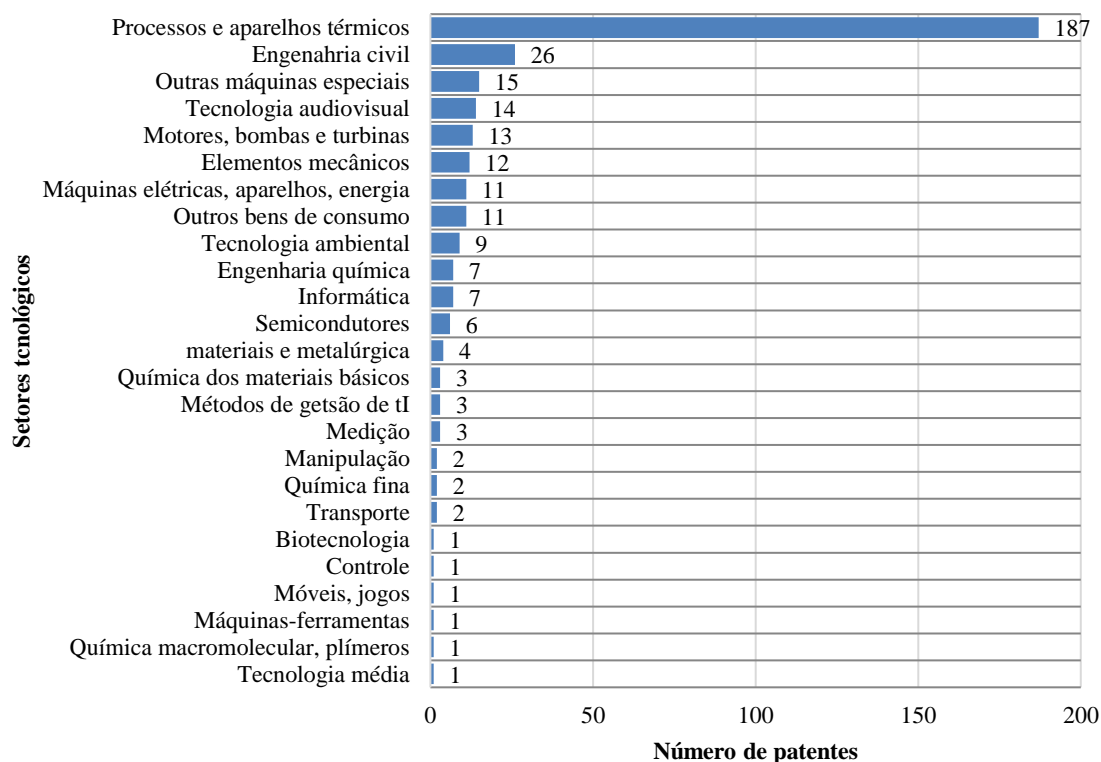
Observa-se a ocorrência de aplicações da geotermia aos coletores geotérmicos (18%), à geração de energia através de fontes renováveis (6%), à integração de fontes de energia renováveis em edifícios (6%), aos sistemas ou aparelhos de ar-condicionado, aquecimento, ventilação ou ar-condicionado com eficiência (6%), às bombas de calor geotérmicas (2%) e aos sistemas geotérmicos (2%).

Com relação à visão geral da tecnologia relacionada às patentes, percebe-se a um panorama abrangente das inovações técnicas e avanços tecnológicos no setor de processos e aparelhos térmicos, em função da aplicação, que se sobressai das outras áreas (Figura 1).

Tabela 1 – Classificação Cooperativa de Patentes (CPC)

Principais grupos	Patentes
(F24T-010) Coletores geotérmicos	18%
(Y02E-010) Geração de energia através de fontes de energia renováveis	6%
(Y02B-010) Integração de fontes de energia renováveis em edifícios	6%
(F24J-003) Sem classificação (Descontinuada)	6%
(F24F-005) Sistemas ou aparelhos de ar-condicionado não abrangidos por F24F1/00 ou F24F3/00	6%
(F24F-2005) Sistemas ou aparelhos de ar-condicionado não abrangidos por F24F1/00 ou F24F3/00	6%
(F25B-049) Arranjo ou montagem de dispositivos de controle ou segurança	4%
(F25B-041) Arranjos de circulação de fluidos	4%
(H05K-007) Detalhes construtivos comuns a diferentes tipos de aparelhos elétricos	4%
(F24D-2200) Fontes de calor ou fontes de energia	4%
(F25B-027) Máquinas, instalações ou sistemas, que utilizam determinadas fontes de energia	4%
(Y02B-030) Aquecimento, ventilação ou ar-condicionado com eficiência energética [HVAC]	2%
(F25B-030) Bombas de calor geotérmicas	2%
(H02S-040) Componentes ou acessórios em combinação com módulos fotovoltaicos, não incluídos nos grupos H02S10/00 - H02S30/00	2%
(E01C-011) Detalhes de pavimentação	2%
(F25B-2313) Máquinas, instalações ou sistemas de compressão com ciclo reversível não incluídos em outro local	2%
(F24T-2010) Máquinas, instalações ou sistemas, que utilizam determinadas fontes de energia	2%
(F25B-013) Máquinas, instalações ou sistemas de compressão, com ciclo reversível	2%
(E02D-003) Melhoria ou preservação do solo ou rocha	2%
(F24D-015) Outros sistemas de aquecimento doméstico ou ambiente	2%
(Y02E-070) Outros sistemas de conversão ou gestão de energia que reduzem as emissões de GEE	2%
(F28D-020) Plantas ou aparelhos de armazenamento de calor em geral; Aparelhos regenerativos de troca de calor não incluídos nos grupos F28D17/00 ou F28D19/00	2%
(F25B-2700) Sensoriamento ou detecção de parâmetros; Sensores para os mesmos	2%
(F24F-003) Sistemas de ar-condicionado em que o ar condicionado primário é fornecido a partir de uma ou mais centrais para unidades distribuidoras nas salas ou espaços	2%
(F24T-050) Sistemas geotérmicos	2%
(Y02A-040) Tecnologias de adaptação na agricultura, silvicultura, pecuária ou produção agroalimentar	2%
(Y02E-060) Tecnologias facilitadoras; Tecnologias com uma contribuição potencial ou indireta para a mitigação de emissões de GEE	2%

Figura 1 – Visão geral da tecnologia

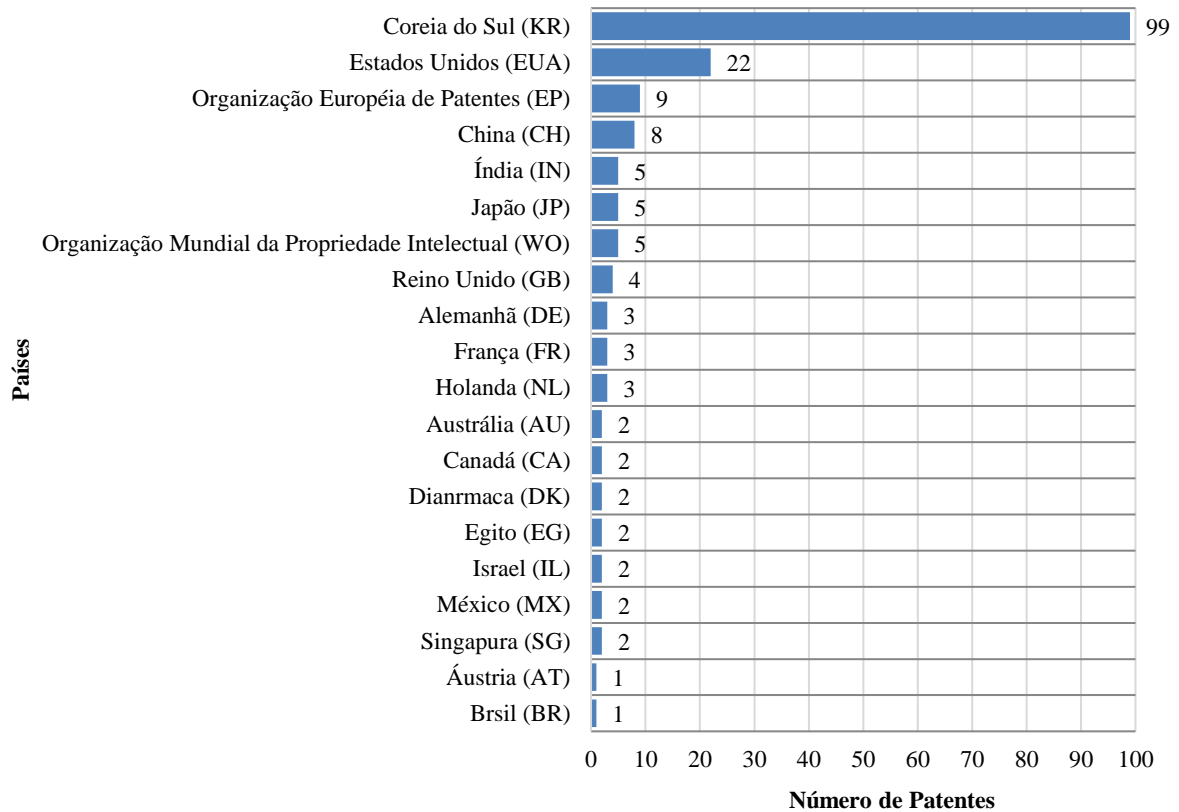


Fonte: Elaborado com base em Questel Orbit (2023)

No que se refere aos principais mercados, nota-se que a Coreia do Sul se sobressai, seguida pelos Estados Unidos, isso devido aos recursos geotérmicos, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, políticas de energia renovável, experiência em engenharia geotérmica e parcerias internacionais (Figura 2). No Brasil foi encontrada apenas uma patente, com número BR112014022065 A0_, na qual invenção refere-se um aparelho de bomba de calor geotérmica. O proposto nesta invenção é usado para resfriar a superfície do solo, dissipar calor lentamente para o ambiente e liberar o excesso de calor gerado em um sistema de geração de energia solar de forma eficiente e econômica, com depósito em 2013-03-05 e com status de pendente em 2014-12-02, em função de reivindicações.

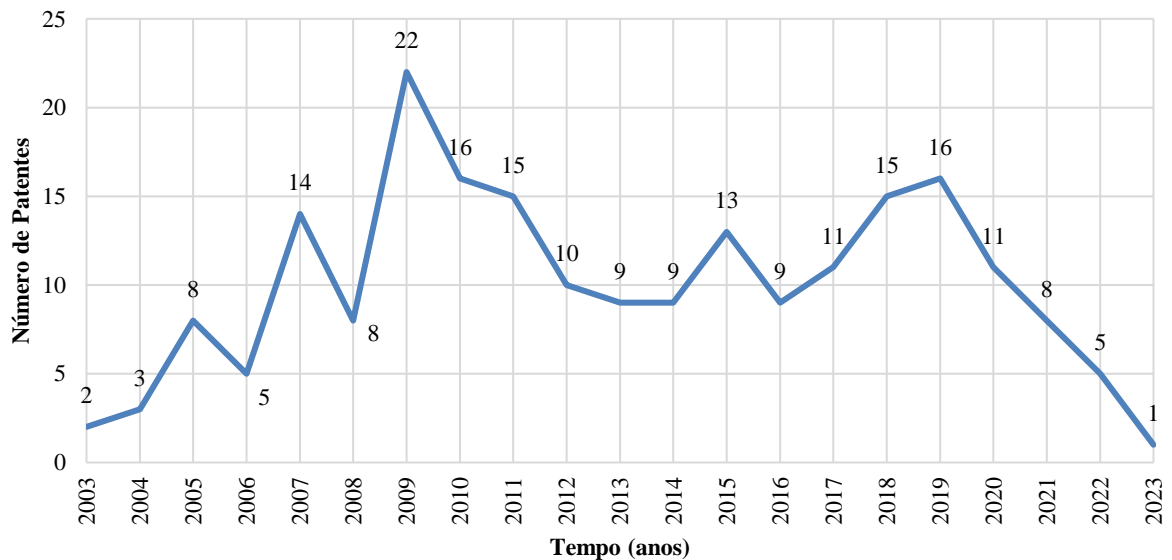
Sobre a tendência de investimentos em tecnologia nos últimos 20 anos, nos anos 2000 houve um interesse crescente na energia geotérmica como fonte de energia renovável. Em 2009, ocorreu um aumento de investimentos nessa área e, em 2019, verificou-se avanços tecnológicos e melhorias na eficiência dos sistemas geotérmicos (Figura 3). Acerca do aumento de investimentos em 2009, essa informação foi validada por Yang et al. (2009) e por Kim e Rhe (2009).

Figura 2 – Principais Mercados



Fonte: Elaborado com base em Questel Orbit (2023).

Figura 3 – Tendência de investimento em tecnologia nos últimos 20 anos



Fonte: Elaborado com base em Questel Orbit (2023).

4. CONCLUSÃO

As buscas sobre sistemas geotérmicos no Brasil resultaram em único estudo, realizado para a cidade de São Paulo, para o qual foi evidenciada a aplicabilidade desta tecnologia nesta cidade para atender de forma equilibrada as necessidades de aquecimento e resfriamento.

No projeto de sistemas geotérmicos, além de uma análise geotécnica convencional para escavações geotérmicas de baixa profundidade, devem ser incluídos dados climáticos relevantes, especialmente quando se lida com perfis de solo não saturados que são influenciados pela variabilidade sazonal. Informações básicas como precipitação, flutuação do nível da água subterrânea, conteúdo de água no solo e sua capacidade de retenção são essenciais para o projeto.

A aplicação de técnicas de modelagem matemática permite estimar o coeficiente de performance (COP) e analisar diferentes parâmetros do sistema. Estudos demonstram que o aumento do diâmetro do tubo e da velocidade do ar resulta em um aumento mais significativo do coeficiente de performance (COP) em comparação com outros parâmetros, em sistemas de tubo de terra horizontal (HETS), que se mostram com potencial viável para resfriar ambientes durante o dia.

A partir das análises dos trabalhos selecionados, conclui-se que os sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP) podem não ser uma escolha economicamente favorável para áreas urbanas localizadas em regiões de clima tropical, em função de vários fatores como custo inicial de instalação e eficiência reduzida em condições de temperaturas muito elevadas. Porém, em cidades com climas subtropicais, os sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP) se mostram tanto economicamente viáveis quanto eficientes em termos de operação.

O uso de geotermia para pré-tratamento de ar fresco, varia de acordo com as diferentes regiões climáticas. Tanto em zonas temperadas quanto em zonas subtropicais, observa-se uma economia de energia em torno de 30%. Isso indica que o sistema de pré-tratamento de ar é viável na maioria das áreas climáticas.

Acerca das patentes, conclui-se que a Coreia do Sul se apresenta como um líder de mercado, seguido pelos Estados Unidos. As tecnologias se relacionam ao setor de climatização e às máquinas e equipamentos a ele relacionados. Foi possível reconhecer um pico de registro de patentes em 2009 e 2019, sendo que após essa última data, ocorreu queda significativa, que pode ter sido ocasionada pela pandemia de Covid-19 ou pelo tempo de análise requerido após o depósito de patentes.

Do ponto de vista quantitativo da evolução temporal do registro de patentes envolvendo geotermia e considerando-se a queda após 2019, não é possível afirmar que a tecnologia atingiu nível de maturidade máximo e passou a ter tendência decrescente, em termos globais. Isso porque a pandemia pode ter afetado o desenvolvimento do setor. No entanto, considerando-se que a abordagem desta pesquisa se volta para a aplicação da geotermia em climas tropicais, vislumbra-se elevado potencial de viabilidade, visto que apenas um registro foi encontrado no Brasil, sob depósito de número BR112014022065 A0, que se refere a um aparelho de bomba de calor geotérmica.

5. REFERÊNCIAS

ALVES, A. B. M. Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo. **DSPACE**, Curitiba, 2014 Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/35873>>. Acesso em: 10 maio 2023.

APRIANTI, T. et al. Uma comparação do desempenho da bomba de calor terrestre e aérea para aplicações domésticas: um estudo de caso em Perth, Austrália. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 15, pg. 20686-20699, 2021.

BASER, T.; MCCARTNEY, J. S.; OZDOGAN-DOLCEK, A. Thermal Energy Storage in Borehole Arrays Installed in Unsaturated Soils. In: **From Research to Applied Geotechnics**. IOS Press, 2019. p. 374-390.

BAZZO, K. C. **Redes de cooperação das multinacionais brasileiras: um mapeamento a partir das patentes**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto, 2010.

BITENCOURT, D. P. *et al*. Frequência, Duração, Abrangência Espacial e Intensidade das Ondas de Calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 4, p. 506-517, 2016.

CAMDALI, U.; TUNCEL, E. **An economic analysis of horizontal ground source heat pumps (GSHPs) for use in heating and cooling in Bolu, Turkey**. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, v. 8, n. 3, p. 290-303, 2013.

CASAGRANDE, B; ALVAREZ, C. **Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações**. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.4, p. 173-187, 2013.

CASARIN, H. D. C. S.; CASARIN, S. J. **Pesquisa Científica: Da Teoria à Prática**. 1a ed. Curitiba: Intersaberes, 2012.

CASTRO, E. C. & FIGUEIREDO, P. N. (2005). Aprendizagem tecnológica compensa? Implicações da acumulação de competências para o aprimoramento de performance técnica em uma aciaria no Brasil (1997-2001). **Revista de Administração Contemporânea**, v. 9 (1ª edição especial), p. 109-133.

CUNHA, RP; BOURNE-WEBB, PJ Uma revisão crítica sobre o conhecimento atual de pilhas de energia geotérmica para climatizar edifícios de forma sustentável. **Revisões sobre Energia Renovável e Sustentável**, v. 158, p. 112072, 2022.

CUNHA, R.P., BOURNE-WEBB, P.J. A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, 2022.

DE NARDIN, C. R.; FERNANDES, F. F.; LIMA, L. P.; LONGO, A. J.; SIMÕES, M. G. Surface geothermal energy applied to low cost and low power consumption residential air conditioning. In: **IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2016. p. 4247-4251.

D'AGOSTINO, D.; ESPOSITO, F.; GRECO, A.; MASSELLI, C.; MINICHIELLO, F. The employment of an earth-to-air heat exchanger as pre-treating unit of an air conditioning system for energy saving: A comparison among different worldwide climatic zones. **Energy and Buildings**, v. 229, p. 110517, 2020.

D'AGOSTINO, D.; GRECO, A.; MASSELLI, C.; MINICHIELLO, F. The energy performances of a ground-to-air heat exchanger: A comparison among Köppen climatic areas. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2895, 2020.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DÜBER, S.; FUENTES, Raul; NARSILIO, Guillermo. Effect of horizontal connection pipes on operation of borehole heat exchangers under different climatic conditions. *Geothermics*, v. 110, p. 102679, 2023.

FONG, K. F.; LEE, C. K.; ZHAO, T. F. Effective design and operation strategy of renewable cooling and heating system for building application in hot-humid climate. *Solar Energy*, v. 143, p. 1-9, 2017.

GUARDA, E. L. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Effects of Global Warming on Passive Design Strategies Through Bioclimatic Charts. *E&S Engineering and Science*, 7:54-69. 2018.

HAZER, H. The use of Earth Covered Buildings. In.: Proceedings of Conference on Alternatives in Energy Conservation: The use of Earth-Covered Buildings. 1975, Texas. **Anais Texas: US GPO**. p. 21-36, 1975.

HOLLMULLER, P.; CARLO, J.; ORDENES, J. WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R. Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates. **AIVC**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/sites/f>. Santa Catarina>, 2006. Acesso em: 11 mai 2023.

IPCC. Climate Change 2007: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland, 2007.

IMAL, M.; YILMAZ, K.; PINARBAŞI, A. Energy efficiency evaluation and economic feasibility analysis of a geothermal heating and cooling system with a vapor-compression chiller system. *Sustainability*, v. 7, n. 9, p. 12926-12946, 2015.

KAPPLER, G. *et al*. Study of an earth-to-water heat exchange system which relies on underground water tanks. *Renewable Energy*, v. 133, p. 1236-1246, 2019.

KILIC, F. C. Geothermal energy in Turkey. *Energy & Environment*, v. 27, n. 3-4, p. 360-376, 2016.

KIM, M. N.; RHE, D. K. Trends and determinants of South Korean outward foreign direct investment. *The Copenhagen Journal of Asian Studies, Copenhagen*, v. 27, n. 1, 2009.

LYU, W. *et al*. Energy saving potential of fresh air pre-handling system using shallow geothermal energy. *Energy and Buildings*, v. 185, p. 39-48, 2019.

MONGKON, S. *et al*. Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse. *Energy Conversion and Management*, v. 78, p. 225-236, 2014.

MORAIS, T. S. O. *et al*. Energy pile and ground temperature response to heating test: a case study in Brazil. *Bulgarian Chemical Communications*, v. 48, p. 115-119, 2016.

MORAIS, T. S. O.; SOUSA, J. D.; TSUHA, C. H. C. Measurement of thermal conductivity of unsaturated tropical soils by a needle probe method. In: **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges**. IOS Press, 2019. p. 2379-2387.

MORAIS, T. S. O.; TSUHA, C. H. C.; NETO, A. B.; SINGH; R. M. Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. **Energy and Buildings**, v. 216, p. 109971, 2020.

OZCAN, B. *et al*. Thermodynamic analysis and assessment of a geothermal cooling system for a house. **International Journal of Exergy**, v. 29, n. 2-4, p. 350-369, 2019.

PORTO, A. H. H.; DURANTE, L.C.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; CALLEJAS, I. J. A.; BUTTNER, S. B. **Geotermia aplicada às edificações e relações com a cobertura do solo e consumo de energia**. In: **Habitação de Interesse Social em Mato Grosso – Contribuições Científicas**. Gisele Carignani, João Carlos Machado Sanches e Luciane Cleonice Durante (Organizadores). Barra do Bugres: UNEMAT, 2018.

Questel Orbit. Disponível em <https://www.orbit.com/#PatentRegularAdvancedSearchPage>. Acesso em julho de 2023.

RATCHAWANG, S. *et al*. A Review of Ground Source Heat Pump Application for Space Cooling in Southeast Asia. **Energies**, v. 15, n. 14, p. 4992, 2022.

ROY, D. *et al*. Feasibility and performance of ground source heat pump systems for commercial applications in tropical and subtropical climates. **Renewable Energy**, v. 152, p. 467-483, 2020.

RIAZ, F. *et al*. Analysis of low-grade waste heat driven systems for cooling and power for tropical climate. **Energy Procedia**, v. 143, p. 389-395, 2017.

SANTOS SÁ, L. M.; NETO, A. H, TSUHA, C. H. C.; PESSIN, J.; FREITAS, M. C.; MORAIS, Thaise da Silva Oliveira. Thermal design of energy piles for a hotel building in subtropical climate: a case study in São Paulo, Brazil. **Soils and Rocks**, v. 45, 2022.

SINGHAL, S.; YADAV, A. K.; PRAKASH, R. Numerical modelling of an earth-air-tunnel assisted single span saw-tooth greenhouse for tropical climate. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 187, p. 108138, 2023.

SOFYAN, S. E. *et al*. Mathematical modelling and operational analysis of combined vertical–horizontal heat exchanger for shallow geothermal energy application in cooling mode. **Energies**, v. 13, n. 24, p. 6598, 2020. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v13y2020i24p6598-d461978.html>>. Acesso em: 15 mai 2023.

YANG, X. *et al*. Internationalization of Chinese and Korean firms. **Thunderbird International Business Review**, v. 51, n. 1, p. 37-51, 2009.

YILMAZ, C. Thermodynamic and economic investigation of geothermal powered absorption cooling system for buildings. **Geothermics**, v. 70, p. 239-248, 2017.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.