Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego

Essentia EDITORA IFFLUMINENSE

Artigo de Revisão
e-ISSN 2177-4560
DOI: 10.19180/2177-4560.v20n22026p142-168
Submetido em: 09 set. 2026
Aceito em: 10 nov. 2026

Sistemas de trocador de calor solo-ar: avaliação da eficiência energética e do conforto térmico em um edifício residencial com ventilação geotérmica passiva

Earth-to-air heat exchanger systems: assessment of energy efficiency and thermal comfort in a residential building with passive geothermal ventilation

Sistemas de intercambiador de calor tierra-aire: evaluación de la eficiencia energética y el confort térmico en un edificio residencial con ventilación geotérmica pasiva

Max Esteves Rezende
Instituto Federal Fluminense.
Doutorando em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos pelo Instituto Federal Fluminense.
E-mail: max.3mm@gmail.com

Jader Lugon Junior https://orcid.org/0000-0001-8030-0713
Instituto Federal Fluminense.
Doutorado em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Professor no Instituto Federal Fluminense.
E-mail: jljunior@iff.edu.br

Bruno Barzellay Ferreira da Costa https://orcid.org/0000-0003-0242-4205
Universidade Federal do Rio de Janeiro.
Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense. Professor Adjunto IV da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
E-mail: bruno.barzellay@macae.ufrj.br

Resumo: Este estudo apresenta uma revisão sistemática e análise bibliométrica dos trocadores de calor solo-ar para avaliar seu desempenho energético e conforto térmico residencial. Com o protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses aplicado na base de dados Scopus, mapeou-se a produção científica de 1980 a 2025. Os resultados comprovam a eficácia térmica da ventilação geotérmica passiva em múltiplos climas, com elevados coeficientes de desempenho e significativa economia frente à climatização convencional. Analisam-se os parâmetros de projeto, o histórico evolutivo e as tendências de hibridização e automação. Conclui-se que a tecnologia é uma alternativa viável e sustentável para o planejamento urbano de baixo carbono.

Palavras-chave: Trocador de calor solo-ar. Poço canadense. Tubo terra-ar.

Abstract: This study presents a systematic review and bibliometric analysis of earth-to-air heat exchangers to evaluate their energy performance and residential thermal comfort. Using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

protocol on the Scopus database, the scientific literature from 1980 to 2025 was mapped. Results confirm the thermal effectiveness of passive geothermal ventilation across multiple climates, demonstrating high coefficients of performance and significant energy savings compared to conventional systems. Project parameters, historical evolution, and future trends such as hybridization and smart control are analyzed. It is concluded that this technology is a viable and sustainable low-carbon cooling alternative.

Keywords: Earth-to-air heat. Canadian well. Earth-to-air tube.

Resumen: Este estudio presenta una revisión sistemática y análisis bibliométrico de los intercambiadores de calor tierra-aire para evaluar su rendimiento energético y confort térmico residencial. Mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses en la base de datos Scopus, se mapeó la literatura científica de 1980 a 2025. Los resultados confirman la efectividad térmica de la ventilación geotérmica pasiva en múltiples climas, demostrando altos coeficientes de rendimiento y un ahorro energético significativo en comparación con los sistemas convencionales. Se analizan los parámetros de diseño, la evolución histórica y tendencias futuras como hibridación y control inteligente. Se concluye que la tecnología es una alternativa viable de enfriamiento de bajo carbono.

Palabras clave: Calor tierra-aire. Pozo canadiense. Tubo tierra-aire.

1 Introdução

A climatização sustentável de edificações é prioridade global para mitigar o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, os trocadores de calor solo-ar, operando por ventilação geotérmica passiva, surgem como tecnologia nacional promissora e de baixo impacto. Este trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura para avaliar o desempenho termoenergético e o conforto térmico residencial de sistemas trocadores de calor solo-ar, propondo diretrizes construtivas para Macaé, RJ, face ao seu clima tropical e solo saturado de umidade. Combinando simulação computacional e dados experimentais de um protótipo local, este estudo oferece um modelo replicável para regiões de clima análogo, promovendo a adoção de tecnologias que equilibram viabilidade econômica, conforto habitacional e conservação ambiental.

Além disso, o estudo busca contribuir para a disseminação de práticas construtivas mais sustentáveis, alinhadas com as diretrizes globais de redução de emissões e eficiência energética, a exemplo do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (Energia Limpa e Acessível), do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

2 Metodologia da Revisão Sistemática

A Revisão Sistemática da Literatura adota uma metodologia estruturada e replicável para identificar, avaliar e sintetizar trabalhos acadêmicos relevantes, garantindo uma análise abrangente e imparcial das pesquisas existentes, ao mesmo tempo que aborda lacunas e contradições na literatura. Esta seção apresentará a metodologia da revisão sistemática e contextualizará a análise bibliométrica, bem como as ferramentas e protocolos considerados neste estudo.

2.1 Objetivo

Recentemente, tem-se dedicado significativa atenção acadêmica ao estudo do impacto de fatores humanos nas mudanças climáticas. Em resposta a esse crescente corpo de pesquisa, este estudo apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura que emprega uma abordagem analítica dupla, combinando métodos bibliométricos e bibliográficos. O trabalho visa mapear e avaliar de forma abrangente o estado atual do conhecimento sobre o tema nos últimos 45 anos (1980-2025), fornecendo dados quantitativos e qualitativos sobre as principais tendências e desenvolvimentos da pesquisa. Para garantir a verificação das melhores investigações e identificar lacunas no conhecimento, a revisão sistemática da literatura é reconhecida como a metodologia mais adequada (BACHINILLA *et al*., 2022; PETTICREW; ROBERTS, 2008).

A análise bibliométrica emprega métodos estatísticos para examinar aspectos quantitativos da pesquisa acadêmica, avaliando descobertas recentes em artigos publicados e analisando a produção e disseminação do conhecimento científico por meio de métricas de citação e técnicas de agrupamento de palavras-chave. Por outro lado, a análise bibliográfica adota uma abordagem qualitativa, revisando sistematicamente o conteúdo dos artigos para identificar, sintetizar e avaliar criticamente os avanços mais recentes na literatura internacional, estabelecendo assim uma base teórica robusta para o tema. A integração dessas metodologias complementares é essencial para alcançar um estado abrangente do conhecimento sobre o assunto da pesquisa.

Para direcionar o escopo da revisão, a pesquisa investigou nove eixos temáticos essenciais sobre os trocadores de calor solo-ar nos últimos 45 anos: a evolução histórica da produção científica, as obras de maior impacto acadêmico, os pesquisadores de maior destaque e a dinâmica de colaboração internacional. Adicionalmente, mapearam-se as nações mais produtivas, as principais agências de financiamento, as áreas disciplinares envolvidas, as editoras e fontes periódicas de maior influência e, por fim, as tendências e desafios tecnológicos para as direções futuras de pesquisa no setor.

2.2 Análise Bibliométrica

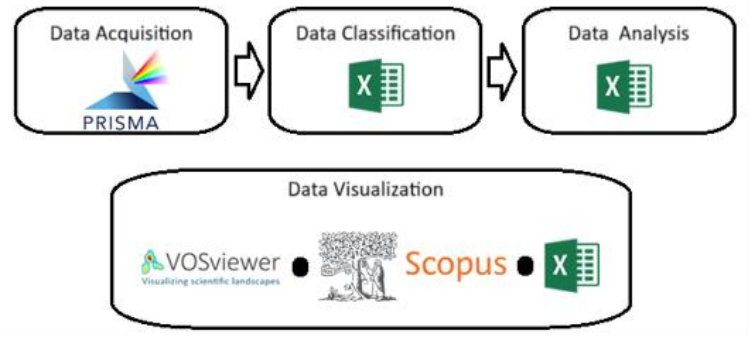
A análise bibliométrica emprega métodos quantitativos para avaliar estatisticamente dados acadêmicos em larga escala, mapeando tendências de produtividade, colaboração e impacto científico dentro de um determinado campo (COBO *et al*., 2011). Trata-se de ferramenta analítica robusta para visualizar a evolução e o crescimento do conhecimento entre diferentes disciplinas (FENG *et al.*, 2017). Esse mapeamento identifica os principais contribuintes (autores, instituições e periódicos), revelando temas emergentes (SONG *et al*., 2019; CHIU; HO, 2007), direcionamentos de pesquisa, relações de coautoria e dinâmicas de citação a partir de metadados relacionais (DZIKOWSKI, 2018; GENG *et al*., 2017; GIMENEZ *et al.*, 2018; BELLIS, 2009).

2.3 Protocolos e ferramentas computacionais

Esta seção apresenta os protocolos e as ferramentas digitais utilizados ao longo da investigação.

Este estudo empregou rigorosamente o framework Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (PAGE *et al*., 2021; MÜHL; DE OLIVEIRA, 2022; DASILAS; RIGANI, 2024) para orientar sistematicamente a seleção da literatura através de quatro fases integradas: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. O software Microsoft Excel foi utilizado para a tabulação estruturada, análise estatística e organização abrangente dos dados coletados na base primária. Finalmente, o programa VOSviewer (versão 1.6.20) foi empregado para a análise avançada e geração de mapas de visualização de redes bibliométricas, devido à sua capacidade gráfica em larga escala (WALTMAN; VAN ECK, 2012; CASTILLO-VERGARA *et al*., 2018; COBO *et al*., 2011). A Figura 1 ilustra o fluxograma multiferramenta aplicado.

Figura 1. Protocolos e ferramentas computacionais utilizadas na revisão.



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

3 Resultados da Revisão e Análise Bibliométrica

Os resultados estão organizados em três seções distintas. A Parte 1, Protocolo PRISMA para coleta de dados, apresenta os desfechos da aplicação da metodologia PRISMA. A Parte 2, análise bibliométrica, examina tendências de publicação, principais contribuintes, redes de citação e agrupamentos temáticos dentro do corpus selecionado. A Parte 3, análise setorial, realiza uma avaliação direcionada dos estudos selecionados.

3.1 Resultados da aplicação do protocolo PRISMA para coleta de dados

3.1.1 Identificação (Etapa 1)

A etapa inicial utilizou a base de dados Scopus devido à sua cobertura multidisciplinar e funcionalidade de busca robusta (ZARE *et al*., 2017). A cadeia de busca construída foi: TITLE-ABS-KEY (“Earth-to-air heat” OR “Canadian well” OR “Earth-to-air tube”). O período de coleta e idioma foram mantidos abertos nesta fase. A Tabela 1 resume os parâmetros estruturais utilizados.

Tabela 1 - Parâmetros de dados de pesquisa para recuperação inicial de documentos.

Parâmetro	Configurações
Base de dados	Scopus
Cadeia de caracteres de consulta	“Earth-to-air heat” OR “Canadian well” OR “Earth-to-air tube”
Data de Coleta	14 de julho de 2025

Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Os parâmetros aplicados resultaram em 441 registros, que foram exportados para processamento cruzado no Microsoft Excel e no programa VOSviewer.

3.1.2 Triagem (Etapa 2)

Os registros passaram por refinamento de parâmetros estruturais, detalhados na Tabela 2, restando 413 estudos elegíveis após a aplicação de filtros tipológicos e idiomáticos.

Tabela 2 - Filtros avançados aplicados após a pesquisa inicial.

Parâmetro	Configurações
Intervalo de tempo	1980-2025*
Tipo de documento	Artigo, artigo de conferência, resenha ou capítulo de livro
Idioma	Inglês

Fonte: elaborada pelos autores (2026).
Nota: * Foram considerados arquivos publicados até 14/07/2025.

3.1.3 Elegibilidade (Etapa 3)

Após a triagem de títulos, leitura de resumos e alinhamento com os limites técnicos e foco residencial do estudo, 60 documentos preencheram todos os critérios de avaliação metodológica e constituíram a amostra final incluída na revisão (Figura 3). A Tabela 3 resume a morfologia dessa amostra abrangente, que cobre pesquisadores de 24 países (Figura 2).

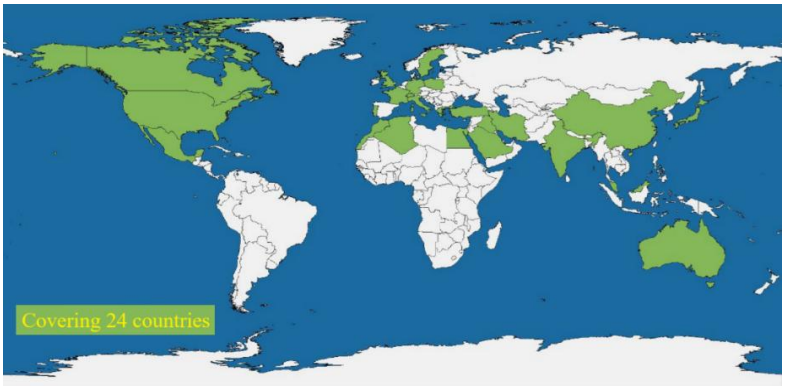
Tabela 3 - Resumo dos resultados gerais de elegibilidade.

Critérios	Quantidade
Documentos	60
Autores	163

Tipo de fonte (periódicos)	59
Países	24
Visualizando citações	1621
Referências citadas	4067

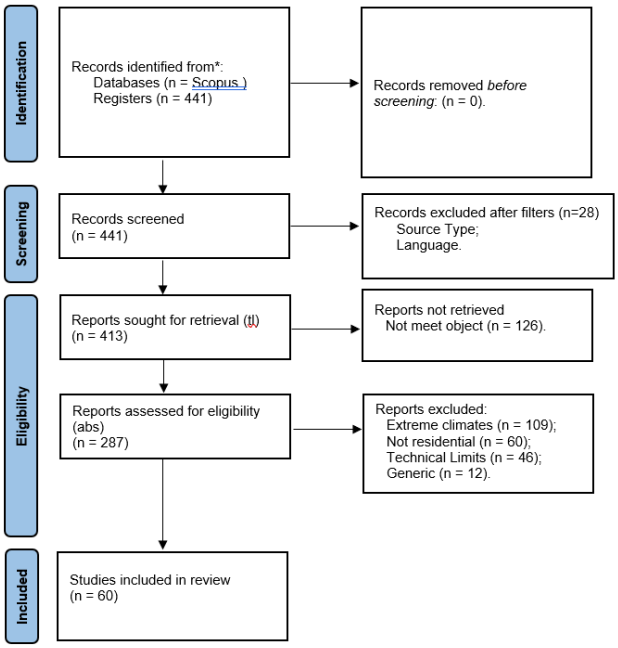
Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Figura 2 - Número de países representados na amostra: 24.



Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 3 - Estrutura do protocolo PRISMA.



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

3.2 Resultados da análise bibliométrica

3.2.1 Publicações por Tipo e Ano

A Tabela 4 sintetiza a tipologia dos documentos analisados, destacando a predominância maciça de artigos de periódicos revisados por pares (90%). Quanto ao traçado histórico, o volume de publicações reflete a expansão técnica do tema (Figuras 4 e 5). Evidencia-se um crescimento agudo e sustentado a partir

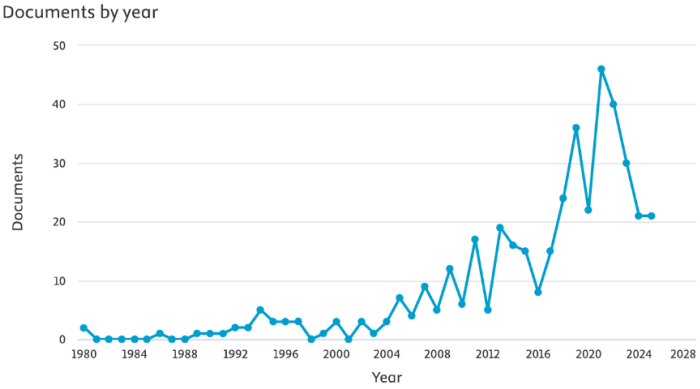
dos anos 2000, culminando em picos recentes que atestam a consolidação acadêmica da Ventilação Geotérmica Passiva, apesar de retrações atípicas notadas transitoriamente no período de 2021-2024.

Tabela 4 - Publicações por tipo.

Tipo de documento	Número de documentos	Porcentagem
Artigo	54	90.00
Revisão	5	8.33
Artigo da Conferência	1	1.67
Total	**60**	**100.00**

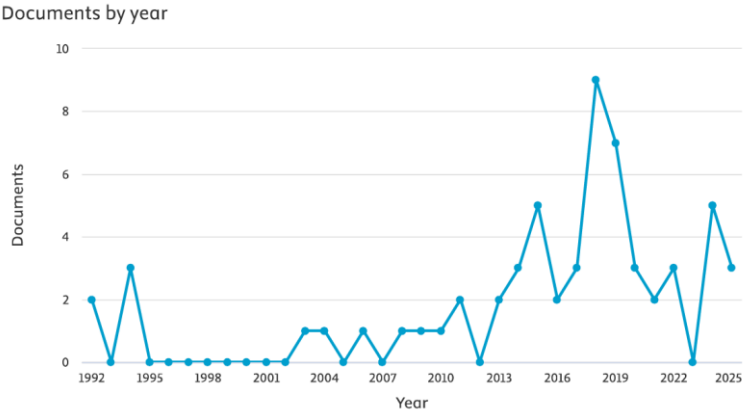
Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Figura 1 - Número de publicações por ano com 413 relatórios.



Fonte: extraída de Scopus (2025).

Figura 2 - Número de publicações por ano com 60 relatórios.



Fonte: extraída de Scopus (2025).

3.2.2 Estudos mais influentes

A influência acadêmica do campo foi aferida pelas métricas de citação (SMITH *et al.*, 2020; BORNMANN; MARX, 2014), que totalizaram 4.067 ocorrências (média de 67,78 citações por documento). A Tabela 5 cataloga os 15 artigos mais citados, os quais concentram isoladamente 53,53% das citações globais da área, ressaltando o peso fundacional do trabalho de Pfafferott (2003) em números absolutos e de Peretti *et al.* (2013) na taxa analítica de citações por ano. A rede de cocitação mapeada na Figura 6 (VAN

ECK; WALTMAN, 2010) corrobora visualmente essa hierarquia, demonstrando os nós estruturais formados em torno desses autores.

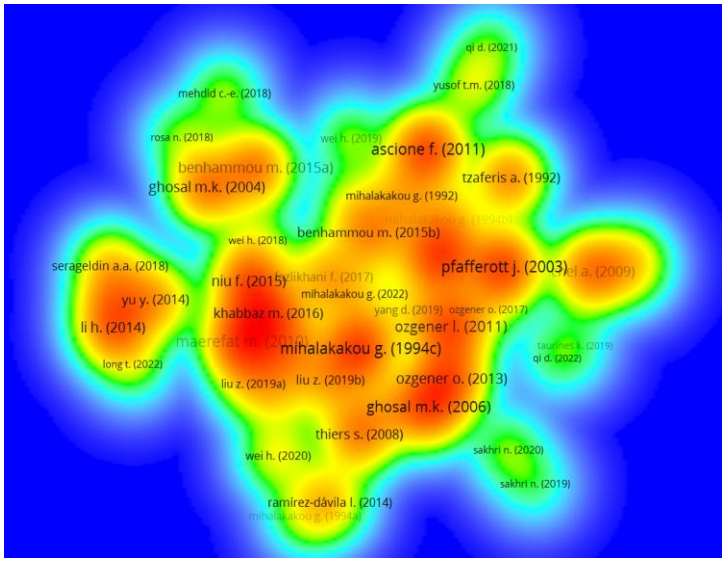
Tabela 5 - Os 15 artigos mais citados, 1992-2025.

Rank	Título do documento	Autores	Ano	TC	CPY	Periódico
1	Evaluation of *Earth-to-Air Heat Exchangers* with a standardised	Pfafferott, J.	2003	175	7.61	Energy and Buildings, 35(10),
2	*Earth-to-Air Heat Exchangers*for Italian climates	Ascione, F., Bellia, L., Minichiello, F.	2011	171	11.40	Renewable Energy, 36(8), pp.
3	Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers	Mihalakakou, G., Santamouris, M.,	1994	171	5.34	Solar Energy, 53(3), pp. 301–305
4	Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat	Maerefat, M., Haghighi, A.P.	2010	168	10.50	Renewable Energy, 35(10), pp.
5	**The design and environmental evaluation of *Earth-to-Air Heat***	**Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M.,**	**2013**	**162**	**12.46**	**Renewable and Sustainable Energy**
6	A review on the experimental and analytical analysis of earth to air	Ozgener, L.	2011	154	10.27	Renewable and Sustainable Energy
7	Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth	Ghosal, M.K., Tiwari, G.N.	2006	154	7.70	Energy Conversion and
8	Heat and mass transfer performance analysis and cooling	Niu, F., Yu, Y., Yu, D., Li, H.	2015	137	12.45	Applied Energy, 137, pp.
9	Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air	Chel, A., G.N.Tiwari	2009	134	7.88	Energy and Buildings, 41(1), pp.
10	A practical approach to predict soil temperature variations for	Ozgener, O., Ozgener, L., Tester,	2013	129	9.92	International Journal of Heat and
11	Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat	Ghosal, M.K., Tiwari, G.N.,	2004	128	5.82	Energy and Buildings, 36(3), pp.
12	Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat	Benhammou, M., Draoui, B.	2015	127	11.55	Renewable and Sustainable Energy
13	Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat	Li, H., Yu, Y., Niu, F., Shafik, M., Chen,	2014	125	10.42	Renewable Energy, 62, pp. 468–
14	Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger	Khabbaz, M., Benhamou, B.,	2016	122	12.20	Energy and Buildings, 125, pp.
15	Thermal and environmental assessment of a passive building	Thiers, S., Peuportier, B.	2008	120	6.67	Solar Energy, 82(9), pp. 820–831

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Nota: TC é o número total de citações calculado em 19 de julho de 2025.; CPY é a média de citações por ano.

Figura 6 - Visualização de densidade dos estudos mais influentes na amostra.



Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

3.2.3 Principais autores e Mapeamento de Coautoria

A Tabela 6 e a Figura 7 quantificam o impacto da produção autoral. Evidencia-se um cenário altamente concentrado: enquanto mais de 90% dos 163 pesquisadores assinam apenas de 1 a 2 trabalhos, a liderança é exercida por um círculo restrito focado em Yang, Mihalakakou e Santamouris. Ao mapear as coautorias (Figuras 8, 9, 10 e 11, e Tabela 7), identificam-se clusters de pesquisa densos (notadamente capitaneados por El Mankibi, Li e Liu), revelando, contudo, uma fratura na conectividade: os maiores líderes em produtividade não mantêm laços robustos fora de seus subgrupos imediatos, o que sinaliza entraves e fragmentação na dinâmica colaborativa internacional.

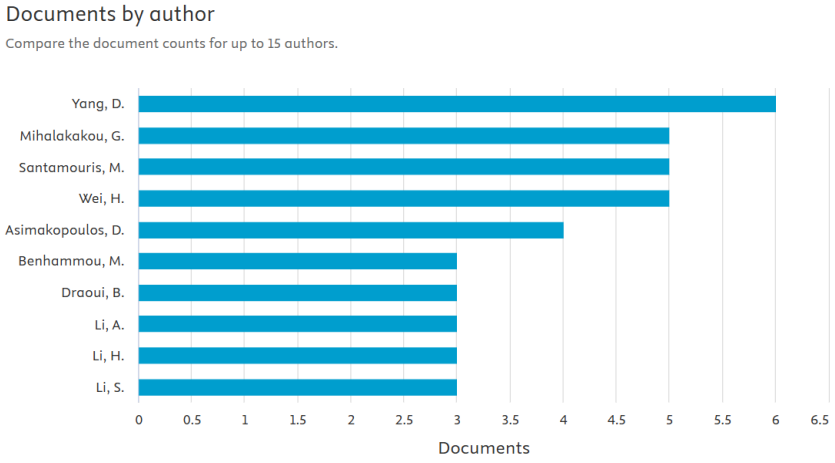
Tabela 6 - Os 10 principais autores produtivos, classificados por número de documentos.

Rank	Autor	País	Instituição	MD	TP	TC	CPP	h-
1	Yang, Dong	China	Chongqing University	6	103	2,429	23.58	30
2	Mihalakakou,	Grecce	University of Patras	5	78	6,162	79.00	45
3	Santamouris,	Australia	UNSW Sydney	5	603	36,851	61.11	100
4	Wei, Haibin	China	Power China Huadong	5	18	359	19.94	11
5	Asimakopoulos,	Grecce	University of Athens	4	201	7,074	35.19	44
6	Benhammou,	Algeria	Centre de Développement des	3	11	353	32.09	7
7	Draoui,	Algeria	University of Tahhri Mohamed	3	127	1,926	15.17	22
8	Li, Angui	China	Xi'an University of Architecture	3	389	6,275	16.13	41
9	Li, Haorong	USA	UNL College of Engineering	3	79	2,696	34.13	32
10	Li, Shixiong	China	Xi'an University of Architecture	3	4	83	20.75	4

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

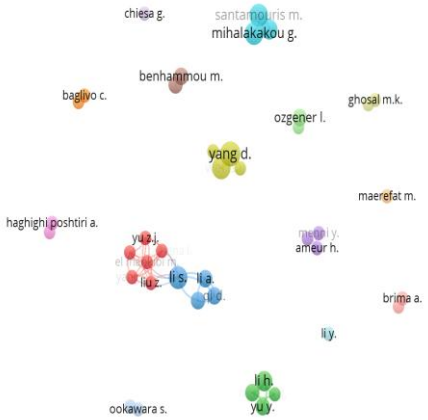
Nota: MD é o número de documentos correspondentes; TP é o número total de publicações; TC é o número total de citações; CPP são citações por publicação; O h-Index é baseado nos números do banco de dados Scopus.

Figura 3 - Número de documentos por autor.



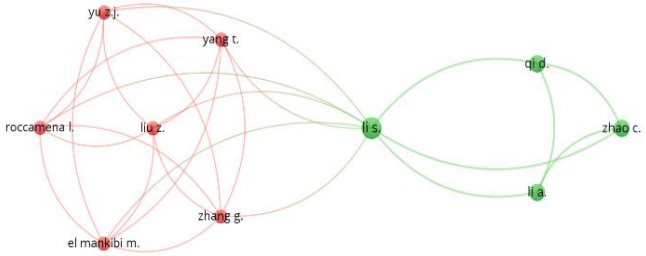
Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 8 - Visualização em rede de todos os clusters de análise de coautoria de autores.



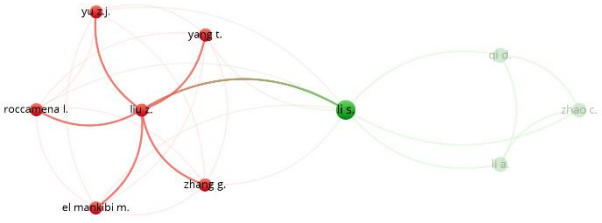
Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

Figura 9 - Visualização em rede de clusters de análise de coautoria de autores conectados.



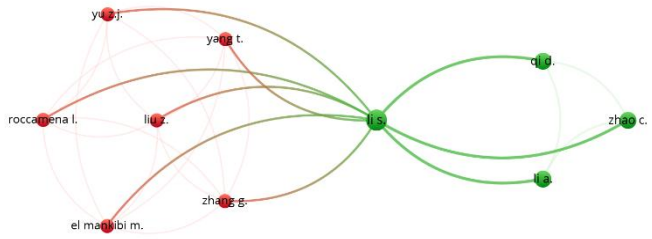
Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

Figura 4 - Detalhes da rede de colaboração sobre o autor mais influente no Cluster 1.



Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

Figura 5 - Detalhes da rede de colaboração sobre o autor mais influente no Cluster 2.



Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

Tabela 2 - Análise da coautoria dos autores.

Cluster 1	Cluster 2
El Mankibi, M.	Li, A..
Liu, Z.	Li, S.
Roccamena, L.	Qi, D.
Yang, T.	Zhao, C.
Yu, Z.J..	
Zhang, G.	

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

3.2.4 Países mais influentes

O mapeamento geopolítico da produção científica revela uma forte concentração de autoria e impacto liderada de forma absoluta pela China, que registra 14 documentos publicados, 551 citações acumuladas e uma força total de ligação (Total Link Strength - TLS) de 93, vigor decorrente diretamente do incentivo institucional centralizado da National Natural Science Foundation of China, principal agência de fomento do setor, conforme detalhado na Tabela 9 (SMITH *et al*., 2020; ZARE *et al.*, 2017). O núcleo de alta colaboração em rede é dominado por conexões densas estabelecidas na Europa e no Norte da África, com destaque para a França (5 documentos, 400 citações, 51 TLS), Argélia (7 documentos, 384 citações, 50 TLS) e Grécia (6 documentos, 515 citações, 47 TLS), países que encabeçam as dinâmicas de coautoria internacional (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

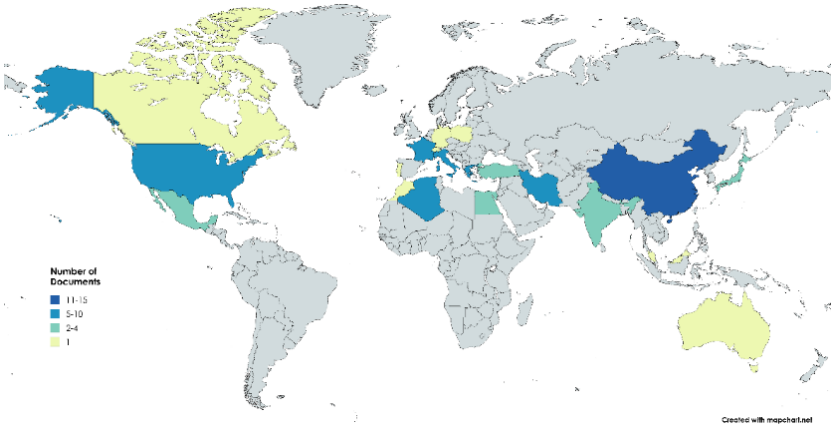
Tabela 8 - Os 10 principais patrocinadores de financiamento produtivo.

Agências de Fomento	País / Região	Arquivo
Fundação Nacional de Ciências Naturais da China	China	10
Fundos de Pesquisa Fundamental para as Universidades Centrais	China	5
Fundação de Ciência de Pós-Doutorado da China	China	3
Conselho de Bolsas de Estudo da China	China	2
Corporação Estatal de Engenharia de Construção da China	China	2
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología	México	2
Egypt-Japan University of Science and Technology	Egypt-Japan	2
European Commission	Europe	2
Indian Council of Agricultural Research	India	2
Ministério do Ensino Superior	Egito-Japão	2

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

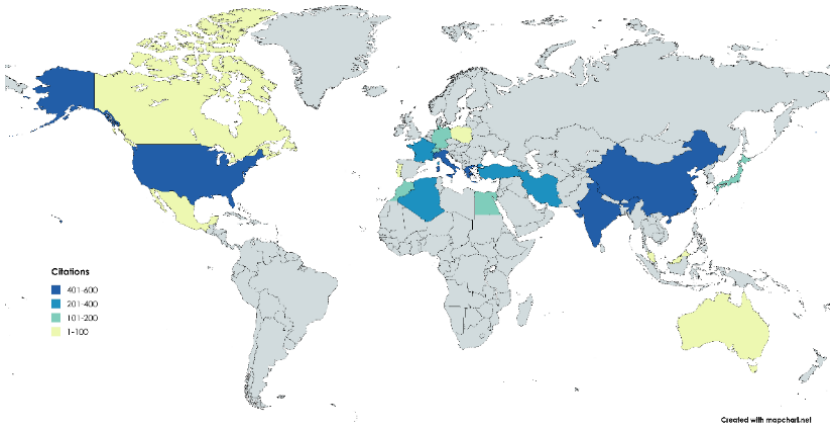
No bloco intermediário de expressivo impacto termoenergético, destacam-se o Irã (5 documentos, 290 citações, 46 TLS), os Estados Unidos (5 documentos, 515 citações, 45 TLS), a Itália (7 documentos, 433 citações, 34 TLS), a Índia (4 documentos, 430 citações, 30 TLS) e a Turquia (3 documentos, 313 citações, 26 TLS). Concluindo a capilaridade global do campo entre as 20 nações mais prolíficas, figuram produções pontuais de alta relevância qualitativa: Austrália (1 documento, 82 citações, 18 TLS), Marrocos e Suíça (ambos com 1 documento, 122 citações, 14 TLS), Egito e Japão (cada qual com 2 documentos, 129 citações, 13 TLS), Alemanha (1 documento, 175 citações, 13 TLS), México (2 documentos, 86 citações, 10 TLS), Canadá (1 documento, 60 citações, 8 TLS), Malásia (1 documento, 47 citações, 6 TLS), Portugal (1 documento, 35 citações, 3 TLS) e Polônia (1 documento, 76 citações, 1 TLS), configurando um panorama diversificado de difusão da ventilação geotérmica passiva.

Figura 6 - Número de documentos publicados pelos países que compõem a amostra.



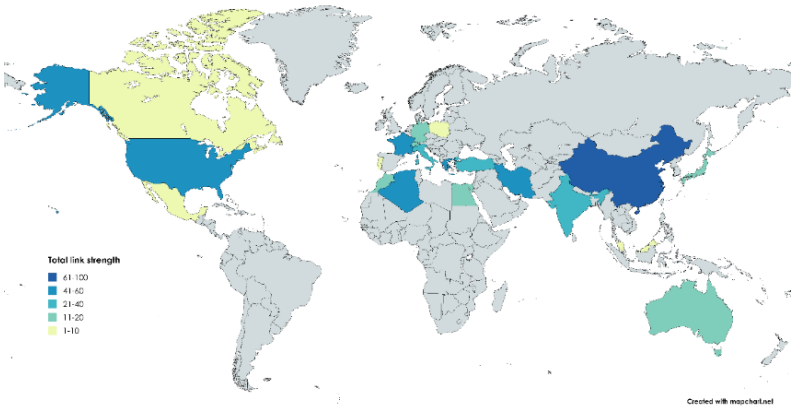
Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 7 - Número de citações obtidas pelos países que compõem a amostra.



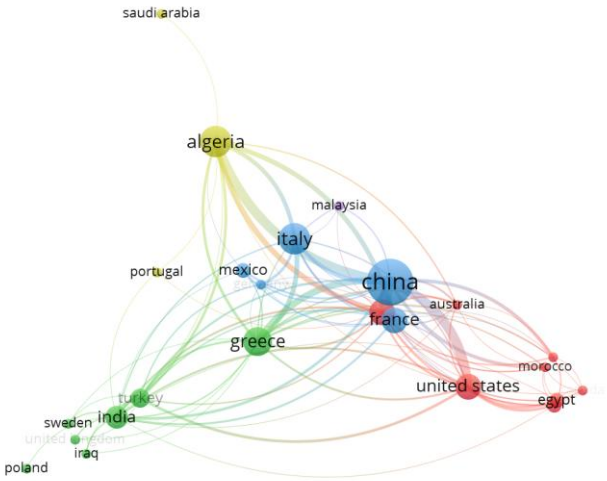
Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 8 - Resistência total da ligação obtida pelos países que compõem a amostra.



Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 9 - Visualização em rede da coautoria de países conectados.



Fonte: elaborada pelos autores (2026), com o auxílio do software VOSviewer.

3.2.5 Áreas de Conhecimento, Editoras e Palavras-chave

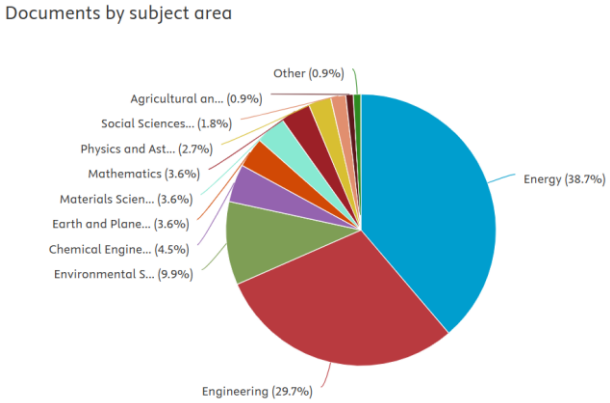
As áreas disciplinares de "Energia" e "Engenharia" respondem juntas por quase 70% de todo o foco de pesquisa (Figuras 16 e 17). Alinhado a este recorte de ciências aplicadas, as Tabelas 9 e 10, associadas à Figura 18, confirmam o amplo domínio de difusão por parte da editora Elsevier. Ao isolarmos os termos óbvios de busca ("earth-to-air heat exchanger") nas análises de palavras-chave (Figuras 19 e 20 e Tabela 11), o foco pragmático se evidencia através de conceitos balizadores das contingências atuais, como "gases de efeito estufa", "condições climáticas" e "ventilação natural".

Figura 10 - Distribuição de documentos por área de conhecimento.



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Figura 11 - TOP 6 áreas de conhecimento.



Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Tabela 9 - Os 10 principais periódicos produtivos, classificados por número de documentos.

Rank	Fonte	Editor	TP	TC	CiteScore	JCR if (2023)	5-years	JCR Quartile
1	Energy and Buildings	Elsevier	9	883	10.9	7.20	7.89	Q1
2	Energy Conversion and Management	Elsevier	7	613	15.2	11.53	10.87	Q1
3	Applied Energy	Elsevier	6	450	18.7	11.24	11.38	Q1
4	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Elsevier	5	523	23.4	15.90	16.11	Q1
5	Renewable Energy	Elsevier	5	503	12.6	8.63	8.90	Q1
6	Applied Thermal Engineering	Elsevier	4	128	8.1	5.29	5.74	Q1
7	Solar Energy	Elsevier	3	351	9.8	6.55	6.78	Q1
8	Geothermics	Elsevier	3	34	4.9	3.10	3.45	Q2
9	Energy	Elsevier	2	96	11.3	8.85	8.03	Q1
10	Sustainable Energy Technologies and	Elsevier	2	80	9.3	7.63	7.22	Q1

Fonte: elaborado pelos autores (2026).
Nota: TP indica o número total de publicações do periódico na amostra; TC é o número total de citações obtidas; JCR if indica o Fator de Impacto do Journal Citation Reports.

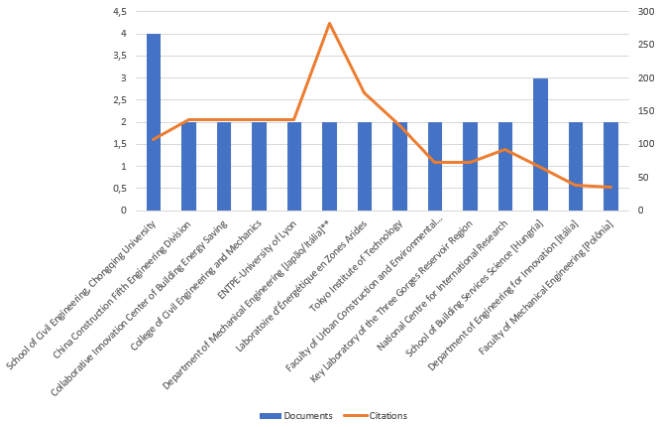
Tabela 10 - Os 10 principais periódicos produtivos, classificados por número de citações.

Rank	Fonte	Editor	TP	TC	CiteScore	JCR if (2023)	5-years	JCR Quartile
1	Energy and Buildings	Elsevier	9	883	10.9	7.20	7.89	Q1
2	Energy Conversion and Management	Elsevier	7	613	15.2	11.53	10.87	Q1
3	Renewable and Sustainable Energy	Elsevier	5	523	23.4	15.90	16.11	Q1
4	Renewable Energy	Elsevier	5	503	12.6	8.63	8.90	Q1
5	Applied Energy	Elsevier	6	450	18.7	11.24	11.38	Q1
6	Solar Energy	Elsevier	3	351	9.8	6.55	6.78	Q1
7	International Journal of Heat and Mass	Elsevier	1	129	7.5	5.43	5.28	Q1
8	Applied Thermal Engineering	Elsevier	4	128	8.1	5.29	5.74	Q2
9	Energy	Elsevier	2	96	11.3	8.85	8.03	Q1

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

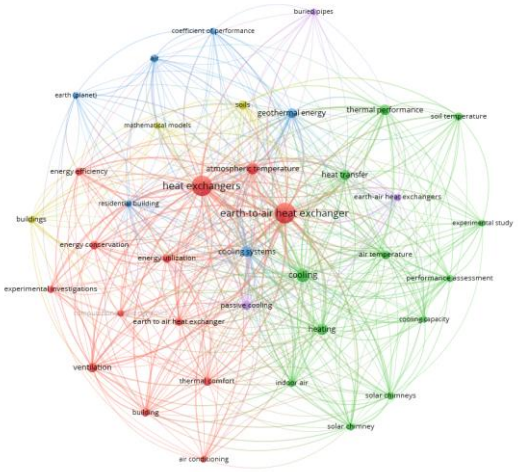
Nota: TP indica o número total de publicações do periódico na amostra; TC é o número total de citações obtidas; JCR if indica o Fator de Impacto do Journal Citation Reports.

Figura 12 - TOP 14 editoras acadêmicas produtivas.



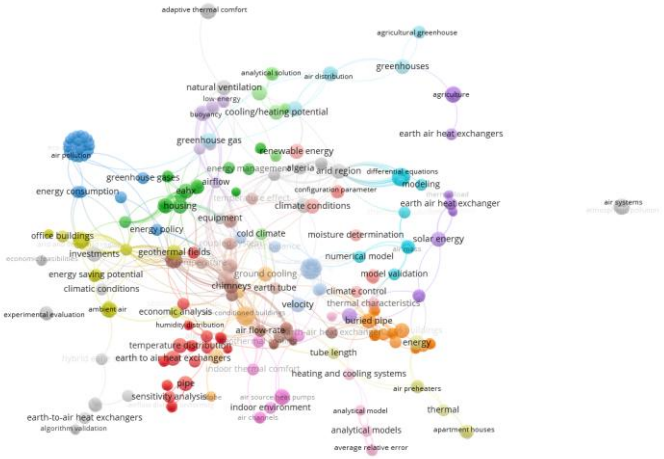
Fonte: adaptada de Scopus (2025).

Figura 13 - Palavras-chave: análise de co-ocorrência (Visualização em rede).



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Figura 14 - Palavras-chave análise de co-ocorrência (visualização de rede) – Palavras-chave usadas na string de consulta omitidas.



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

Tabela 11 - As 15 principais palavras-chave, excluindo palavras-chave de string de pesquisa

Rank	Palavra-chave	Ocorrências	Força do link*
1	Gases com efeito de estufa	3	93
2	Chaminés	3	88
3	Condições climáticas	3	85
4	Investimentos	3	78
5	Campos geotérmicos	3	75
6	Equipamento termoelétrico	3	72
7	Velocidade	3	72
8	Umidade relativa	3	70
9	Habitação	3	68
10	Ventilação natural	3	63
11	Resfriamento do solo	3	62
12	Região árida	3	61
13	Economia de energia	3	61
14	Estufas	3	58
15	Tubo enterrado	3	46

Fonte: elaborado pelos autores (2026).
Nota: * Refere-se a uma medida fornecida pelo VOSviewer que indica a força do link para outras palavras-chave.

3.3 Análise Bibliográfica

3.3.1 Histórico dos Trocadores de Calor Terra-Ar (Earth-to-Air Heat Exchangers - EAHEs)

Os trocadores de calor solo-ar possuem raízes históricas em técnicas ancestrais de climatização passiva. Na antiguidade (pré-século XX), sistemas como os Qanats na Pérsia (3000 a.C.) utilizavam canais subterrâneos para resfriamento de água e ventilação em climas áridos (SAKHRI *et al.*, 2019, 2020), enquanto habitações enterradas e túneis eram empregados na China e na Roma Antiga para estabilização de temperaturas (PERETTI *et al.*, 2013).

A formalização científica e a modelagem térmica da tecnologia consolidaram-se no século XX. Entre as décadas de 1940 e 1960, estudos pioneiros de Kusuda e Achenbach (1965) propuseram as primeiras equações de transferência de calor solo-ar. Posteriormente, nas décadas de 1970 e 1980, o interesse técnico expandiu-se para aplicações em estufas agrícolas (GHOSAL; TIWARI, 2004) e edificações residenciais, com a introdução de tubulações termoplásticas de baixo custo, como o cloreto de polivinila (QI *et al.*, 2022).

A partir da década de 1990, a modelagem numérica avançada refinou as simulações transientes ao incorporar a umidade e a estratificação do solo (MIHALAKAKOU *et al.*, 1994; TZAFERIS *et al*., 1992), delimitando diâmetros (10 a 30 cm) e comprimentos de duto (10 a 70 m) recomendados (BENHAMMOU; DRAOUI, 2015). O período recente (2010 ao presente) destaca-se pelas inovações em sistemas híbridos, acoplando trocadores de calor solo-ar a chaminés solares (LI *et al*., 2014), materiais de mudança de fase (LONG *et al.*, 2022), e técnicas de resfriamento evaporativo em climas úmidos (MIRZAZADE AKBARPOOR; HAGHIGHI POSHTIRI, 2025), além de sistemas verticais compactos para áreas urbanas restritas (LIU *et al.,* 2019). A Tabela 12 resume cronologicamente esses marcos evolutivos.

Tabela 12 - Evolução Histórica dos trocadores de calor solo-ar.

Período	Principais Desenvolvimentos	Tecnologias-Chave	Referência
Pré-século XX	Sistemas passivos ancestrais (Qanat, casas enterradas)	Canais subterrâneos, túneis de ventilação	Sakhri *et al*. (2019, 2020); Peretti *et al*. (2013)
1940-1960	Primeiros modelos analíticos unidimensionais	Equações de transferência de calor solo-ar	Kusuda & Achenbach (1965); Ozgener *et al*. (2013)
1970-1980	Aplicação em estufas e edifícios	Tubos de PVC, sistemas de ventilação integrada	Ghosal & Tiwari (2004); Qi *et al*. (2022)
1990-2000	Modelagem numérica avançada	Simulações transientes, consideração de umidade	Mihalakakou *et al*. (1994); Tzaferis (1992)
2010-presente	Sistemas híbridos e IA	EAHEs verticais, acoplamento com PCM e fotovoltaicos	Long *et al*. (2022); Wei *et al*. (2018)

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Nota: Esta periodização destaca marcos tecnológicos essenciais no desenvolvimento dos EAHEs, desde técnicas ancestrais até os atuais sistemas híbridos. EAHE refere-se a trocadores de calor solo-ar (do inglês, Earth-to-Air Heat Exchanger); PCM representa materiais de mudança de fase (do inglês, Phase Change Materials); IA indica inteligência artificial; CFD é a dinâmica dos fluidos computacional (do inglês, Computational Fluid Dynamics).

3.3.2 Viabilidade climática e desempenho térmico dos Earth-to-Air Heat Exchangers(EAHES): uma análise baseada em evidências recentes

A viabilidade e a eficiência termoenergética dos trocadores de calor solo-ar variam conforme as contingências macroclimáticas regionais. Em climas quentes e áridos, o potencial de resfriamento é máximo, registrando quedas térmicas de até 20,7 °C e coeficientes de desempenho entre 1,9 e 5,51 (ZHAO *et al*., 2024). Em zonas tropicais úmidas, embora a umidade limite a troca de calor sensível, a eficácia do sistema atinge 0,9 durante estiagens (ZHAO *et al*., 2024). Em regiões mediterrâneas, os trocadores equilibram de forma otimizada as demandas sazonais de aquecimento e resfriamento, reduzindo as temperaturas de verão

em até 10 °C (ZHAO *et al.*, 2024). Em contrapartida, climas frios exigem a integração de recuperadores de calor para pré-aquecer o ar externo em até 14 °C (ZHAO *et al.*, 2024).

Geometricamente, o desempenho térmico correlaciona-se ao comprimento do duto (15 a 50 m) e a profundidades de assentamento de 3 a 5 m, faixas que mitigam as oscilações térmicas diárias da atmosfera (DHAIDAN *et al.*, 2024). Velocidades de fluxo entre 1 e 5 m/s equilibram a taxa de transferência térmica e a perda de carga hidráulica do escoamento (DHAIDAN *et al.*, 2024). Adicionalmente, solos argilosos úmidos exibem maior condutividade térmica frente a solos arenosos secos (GHOSAL *et al.*, 2006; PERETTI *et al.*, 2013), sendo a eficiência otimizada em solos cobertos por vegetação rasteira, que reduzem a temperatura do duto em até 1,2 °C em relação ao solo nu (MIHALAKAKOU *et al.*, 1994). A Tabela 13 sumariza essas variáveis climáticas e os parâmetros ótimos de projeto.

Tabela 13 - Viabilidade Climática e Desempenho Térmico.

Parâmetro	Clima Árido/Quente	Clima Tropical/Úmido	Clima Mediterrâneo	Clima Frio
Redução de Temperatura	Até 20,7 °C (Zhao *et al.*, 2024)	Eficácia de 0,9 (Zhao *et al.*, 2024)	Até 10 °C (Zhao *et al.*, 2024)	Até 14 °C com auxílio (Zhao *et al.*, 2024)
COP	1.9–5.51 (Zhao *et al.*, 2024)	Variável (Zhao *et al.*, 2024)	Elevado (Zhao *et al.*, 2024)	Limitado sem auxílio (Zhao *et al.*, 2024)
Profundidade Ideal	3–5 m (Dhaidan *et al.*, 2024)	3–5 m (Dhaidan *et al.*, 2024)	2–3 m (Peretti *et al.*, 2013)	3–5 m (Dhaidan *et al.*, 2024)
Solo Ideal	Argila úmida (Peretti *et al.*, 2013)	Solos úmidos (Peretti *et al.*, 2013)	Solos úmidos (Peretti *et al.*, 2013)	Solos com alta condutividade (Ghosal *et al.*, 2006)
Sistemas Híbridos	EAHE + PCM (Long *et al.*, 2022)	EAHE + Chaminé Solar (Serageldin *et al.*, 2020)	EAHE + Recuperador de Calor (Zhao *et al.*, 2024)	EAHE + Recuperador de Calor (Zhao *et al.*, 2024)
Payback	1,29 anos (Zhao *et al.*, 2024)	3–4 anos (Misra *et al.*, 2015)	5,4 anos (Serageldin *et al.*, 2020)	6,8 anos (Serageldin *et al.*, 2020)

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Nota: Destaca-se a adaptabilidade dos EAHEs a diferentes climas e suas eficiências térmicas e econômicas. Os resultados reforçam a importância do projeto adequado e da integração com sistemas complementares para maximizar o desempenho em cada contexto climático. COP é o coeficiente de desempenho (do inglês, Coefficient of Performance); PCM representa materiais de mudança de fase.

3.3.3 Modelagem e Simulação de Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHEs): Avanços Recentes e Perspectivas Computacionais

A predição de desempenho e o dimensionamento térmico de trocadores de calor solo-ar fundamentam-se em abordagens analíticas, numéricas e validações experimentais. Modelos analíticos utilizam formulações clássicas de transferência térmica e balanço de energia; contudo, a simplificação estática de parâmetros frequentemente desconsidera a saturação térmica do solo em regimes de operação contínua, uma limitação superada por modelos transientes harmônicos (ALIKHANI *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2016). Estes últimos demonstram que dutos de seção retangular reduzem a amplitude de variação térmica em 24,7% frente a dutos circulares sob flutuações sazonais (YANG *et al.*, 2016).

A aplicação de ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional de alta precisão (como ANSYS Fluent e COMSOL Multiphysics) viabiliza o mapeamento tridimensional dos gradientes de temperatura e dos perfis de velocidade no sistema. Utilizando o método Taguchi integrado a simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional, Qi *et al*. (2024) determinaram que diâmetros de 150 mm, profundidade de 3 m e velocidade de 2,0 m/s otimizam a climatização de estufas, enquanto Amanowicz (2018) demonstrou que configurações de duto em "U" mitigam perdas de carga em até 36% frente a modelos em "Z". A precisão dessas ferramentas de simulação é comprovada por monitoramento de campo, registrando erros máximos absolutos de apenas 0,72 °C em modelos transientes particionados por profundidade (LIU *et al.*, 2019), e validando o uso de algoritmos de projeto inverso orientados por demanda (WEI *et al*., 2020). A Tabela 14 compara as principais abordagens de modelagem identificadas na literatura.

Tabela 14 - Comparativo de Técnicas de Modelagem.

Aspecto	Abordagem/*Software*	Principais Resultados	Referência
Modelo Analítico	Equações de COP e resistências térmicas	Comprimento ótimo 37,9% maior que o inicial devido à saturação termal do solo	Alikhani *et al*. (2025)
Simulação CFD	ANSYS Fluent (método Taguchi)	Diâmetro 150 mm, profundidade 3 m e vazão 20 m/s otimizam desempenho em estufas	Qi *et al*. (2024)
Estruturas Multi-tubo	CFD comparando "U" vs. "Z"	"U" reduz perdas de pressão em 6–36% e melhora uniformidade do fluxo	Amanowicz (2018)
Modelo Transiente	Equações de flutuação harmônica	Tubos retangulares reduzem amplitude térmica em 24,7% vs. tubos circulares	Yang *et al*. (2016)
Validação Experimental	Monitoramento em EAHE vertical	Erro máximo de 0,72°C em simulações com partição por profundidade	Liu *et al*. (2019)
Modelo Inverso	Abordagem orientada por demanda	Múltiplas combinações de parâmetros atendem ao mesmo conforto térmico	Wei *et al*. (2020)

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Nota: Esta tabela sintetiza as principais contribuições dos artigos, destacando a diversidade de métodos e a importância da integração entre modelagem, simulação e validação experimental para o projeto eficiente de EAHEs.

3.3.4 Direções Futuras para os Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHEs): Tendências e Inovações Baseadas em Evidências Recentes

O avanço no desenvolvimento técnico dos trocadores de calor solo-ar concentra-se no refinamento de modelos transientes que incorporem a dinâmica de umidade do solo e a transferência de calor latente, sanando lacunas de imprecisão em climas tropicais úmidos (NIU *et al*., 2015; LI *et al*., 2019). A hibridização operacional com geradores fotovoltaicos e coletores térmicos desponta como prioridade estratégica para elevar a autonomia do sistema (OZGENER *et al.*, 2017). Adicionalmente, o uso de novos materiais nanocompósitos e substâncias de mudança de fase visa expandir a capacidade de armazenamento de energia do meio circundante em climas de alta amplitude diurna (LONG *et al*., 2022).

Sob o aspecto de otimização termodinâmica, investigam-se geometrias tubulares complexas (como perfis helicoidais ou ranhuras texturizadas) para maximizar o turbilhonamento do ar e a taxa de troca térmica (AMANOWICZ, 2018; QI *et al.*, 2024). O controle operacional preditivo ganha robustez mediante a

aplicação de redes neurais artificiais e modelos de aprendizado de máquina para adaptar a vazão às variações climáticas em tempo real (YANG *et al.*, 2016; WEI *et al.*, 2020), demandando, contudo, estudos experimentais de monitoramento contínuo de longo prazo para diagnosticar o envelhecimento dos dutos e a degradação da condutividade térmica do solo (GROSSO; CHIESA, 2015). As principais tendências de inovação e seus respectivos desafios estão sumarizados na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativo das Direções Futuras para Trocadores de calor solo-ar.

Aspecto	Abordagem/*Software*	Principais Resultados	Referência
Modelo Analítico	Equações de COP e resistências térmicas	Comprimento ótimo 37,9% maior que o inicial devido à saturação termal do solo	Alikhani *et al*. (2025)
Simulação CFD	ANSYS Fluent (método Taguchi)	Diâmetro 150 mm, profundidade 3 m e vazão 20 m/s otimizam desempenho em estufas	Qi *et al*. (2024)
Estruturas Multi-tubo	CFD comparando "U" vs. "Z"	"U" reduz perdas de pressão em 6–36% e melhora uniformidade do fluxo	Amanowicz (2018)
Modelo Transiente	Equações de flutuação harmônica	Tubos retangulares reduzem amplitude térmica em 24,7% vs. tubos circulares	Yang *et al*. (2016)
Validação Experimental	Monitoramento em EAHE vertical	Erro máximo de 0,72°C em simulações com partição por profundidade	Liu *et al*. (2019)
Modelo Inverso	Abordagem orientada por demanda	Múltiplas combinações de parâmetros atendem ao mesmo conforto térmico	Wei *et al*. (2020)

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Nota: A integração entre avanços teóricos, tecnológicos e experimentais emerge como fator crítico para superar as limitações atuais e ampliar a aplicabilidade destes sistemas em diferentes contextos climáticos e de construção.

Sob a lente do materialismo histórico, a evolução dos trocadores de calor solo-ar revela a contradição dialética entre o avanço técnico e a mercantilização do conforto térmico, onde patentes de materiais de mudança de fase e automações privatizam tecnologias sustentáveis em prol de edifícios comerciais corporativos (WEI *et al.*, 2018; LIU *et al*., 2019; OZGENER *et al.*, 2017). Para superar a marginalização das habitações de interesse social e as lógicas de acumulação de capital, impõe-se a desmercantilização do setor por meio de softwares de modelagem abertos e a consolidação de redes térmicas coletivas voltadas ao desenvolvimento social (MISRA *et al.*, 2015).

Geopoliticamente, as assimetrias na divisão internacional do trabalho contrapõem o Norte Global, com sistemas integrados de alta tecnologia que aumentam em 30% a eficiência térmica (LONG *et al.*, 2022) e reduzem em 60,2% o consumo hídrico (AKBARPOOR; POSHTIRI, 2025), ao Sul Global periférico, fornecedor de matérias-primas críticas (LIU *et al*., 2019) e dependente de soluções locais em solo argiloso para obter reduções de 10 a 12 °C (SAKHRI *et al.*, 2020). Apesar de paybacks reduzidos de 1,2 anos em climas áridos e limitações úmidas em regiões tropicais (ZHAO *et al.*, 2024; RAMÍREZ-DÁVILA *et al.*, 2014), soluções inovadoras de baixo custo em "U" de PVC (MOLINA-RODEA *et al.*, 2024) viabilizam a resiliência energética na periferia do sistema econômico.

4 Considerações Finais

A análise sistemática e bibliométrica evidenciou que a pesquisa sobre Trocadores de Calor Solo-Ar consolidou-se como um campo científico maduro, que apresenta crescimento exponencial contínuo desde as últimas décadas. Apoiado em protocolos rigorosos de extração de dados (PRISMA) e ferramentas robustas de mineração (VOSviewer), o mapeamento revela uma expressiva liderança científica da China e uma forte polarização disciplinar em Engenharia e Energia Sustentável, capitaneada amplamente por grandes conglomerados editoriais, como a Elsevier.

Os marcos teóricos estabelecidos por estudos seminais (PFAFFEROTT *et al*., 2003; MIHALAKAKOU *et al*., 1994; ASCIONE *et al.*, 2011) forneceram as bases para a atual transição tecnológica: a evolução para sistemas de climatização híbridos que acoplam chaminés solares (MAEREFAT; HAGHIGHI, 2010) e materiais de armazenamento térmico com mudança de fase (LONG *et al.*, 2022). O desempenho climático dessas configurações demonstrou extrema versatilidade adaptativa, alcançando formidáveis reduções de até 20,7°C de temperatura em regiões áridas (ZHAO *et al*., 2024), e contornando obstáculos atrelados à umidade em climas tropicais mediante integrações de resfriamento evaporativo (AKBARPOOR; POSHTIRI, 2025). Simultaneamente, as metodologias de simulação via Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (QI *et al.*, 2024) e cálculos de flutuação harmônica (YANG *et al.*, 2016) ampliaram inegavelmente a exatidão empírica do design dos trocadores de calor solo-ar.

Apesar deste alto potencial de mitigação climática atestado tecnicamente, as análises de coautoria indicam que barreiras colaborativas internacionais e assimetrias estruturais de acesso refreiam uma democratização global da tecnologia. As tendências de desenvolvimento sinalizam que a consolidação dos trocadores de calor solo-ar em escala pragmática dependerá crucialmente não apenas de inovações como o uso de inteligência artificial ou modelagens preditivas inversas (WEI *et al*., 2018), e da estrita validação contínua da saturação do solo em campo (LIU *et al.*, 2019), mas, sobretudo, de um olhar integrativo. Para assegurar a verdadeira sustentabilidade energética prometida pela Ventilação Geotérmica Passiva, a área demanda a quebra dos silos mercadológicos vigentes e um avanço para políticas sociotécnicas e redes de conhecimento interdisciplinares unificadas.

Referências

ALIKHANI, A.; MAEREFAT, M.; SOBHANI, S. M. J. Analytical investigation on the optimal tube length of Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE). Geothermics, [S. l.], v. 127, p. 103250, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103250

AMANOWICZ, Ł. Influence of geometrical parameters on the flow characteristics of multi-pipe earth-to-air heat exchangers – experimental and CFD investigations. Applied Energy, [S. l.], v. 226, p. 849-861, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.096

ASCIONE, F.; BELLIA, L.; MINICHIELLO, F. Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. Renewable Energy, [S. l.], v. 36, n. 8, p. 2177-2188, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.013

BAGLIVO, C. *et al.* Toward a Sustainable Indoor Environment: Coupling Geothermal Cooling with Water Recovery Through EAHX Systems. Energies, [S. l.], v. 18, n. 9, p. 2297, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/en18092297

BAGLIVO, C.; D'AGOSTINO, D.; CONGEDO, P. M. Design of a ventilation system coupled with a horizontal air-ground heat exchanger (HAGHE) for a residential building in a warm climate. Energies, [S. l.], v. 11, n. 8, p. 2122, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/en11082122

BENHAMMOU, M. *et al.* Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 91, p. 1-11, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B.; HAMOUDA, M. Improvement of the summer cooling induced by an earth-to-air heat exchanger integrated in a residential building under hot and arid climate. Applied Energy, [S. l.], v. 208, p. 428-445, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.045

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 44, p. 348-355, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030

CHEL, A.; TIWARI, G. N. Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate. Energy and Buildings, [S. l.], v. 41, n. 1, p. 56-66, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006

CHIESA, G. EAHX – Earth-to-air heat exchanger: Simplified method and KPI for early building design phases. Building and Environment, [S. l.], v. 144, p. 142-158, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.014

DHAIDAN, N. S. *et al.* Enhancing the thermal performance of an agricultural solar greenhouse by geothermal energy using an earth-air heat exchanger system: A review. Geothermics, [S. l.], v. 123, p. 103115, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103115

FAZLIKHANI, F.; GOUDARZI, H.; SOLGI, E. Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 148, p. 78-89, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.069

GHOSAL, M. K.; TIWARI, G. N. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 47, n. 13-14, p. 1779-1798, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.013

GHOSAL, M. K.; TIWARI, G. N.; SRIVASTAVA, N. S. L. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: An experimental validation. Energy and Buildings, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 219-227, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.11.006

GROSSO, M.; CHIESA, G. Horizontal earth-to-air heat exchanger in Imola, Italy. A 30-month-long monitoring campaign. Energy Procedia, [S. l.], v. 78, p. 73-78, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.026

HAMDI, O. *et al.* Experimental study of the performance of an earth to air heat exchanger located in arid zone during the summer period. International Journal of Heat and Technology, [S. l.], v. 36, n. 4, p. 1321-1327, 2018. DOI: https://doi.org/10.18280/ijht.360422

KHABBAZ, M. *et al.* Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. Energy and Buildings, [S. l.], v. 125, p. 109-121, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.071

LI, H. *et al.* Experimental investigation on the cooling performance of an Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. Energy and Buildings, [S. l.], v. 196, p. 280-292, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.007

LI, H. *et al.* Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. Renewable Energy, [S. l.], v. 62, p. 468-477, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.008

LIU, Z. *et al.* Experimental investigation of a vertical earth-to-air heat exchanger system. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 195, p. 1098-1110, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.007

LIU, Z. *et al.* Numerical modeling and parametric study of a vertical earth-to-air heat exchanger system. Energy, [S. l.], v. 172, p. 220-231, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.116

LONG, T. *et al.* Benefits of integrating phase-change material with solar chimney and earth-to-air heat exchanger system for passive ventilation and cooling in summer. Renewable Energy, [S. l.], v. 203, p. 763-778, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.081

MAEREFAT, M.; HAGHIGHI, A. P. Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. Renewable Energy, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 2316-2324, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.011

MEHDID, C.-E. *et al*. Thermal design of Earth-to-air heat exchanger. Part II a new transient semi-analytical model and experimental validation for estimating air temperature. Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 198, p. 1536-1544, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.135

MIHALAKAKOU, G. *et al*. Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 155, p. 111862, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111862

MIHALAKAKOU, G. *et al.* Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. Applied Energy, [S. l.], v. 48, n. 1, p. 19-32, 1994. DOI: https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90064-7

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modelling the earth temperature using multiyear measurements. Energy and Buildings, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 1-9, 1992. DOI: https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90002-U

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. Solar Energy, [S. l.], v. 53, n. 3, p. 301-305, 1994. DOI: https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90636-X

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. On the cooling potential of earth to air heat exchangers. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 35, n. 5, p. 395-402, 1994. DOI: https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90098-1

MIRZAZADE AKBARPOOR, A.; HAGHIGHI POSHTIRI, A. Cooling urban buildings with a combined meander EAHE–DEC system: Energy and water consumption analysis. Journal of Building Engineering, [S. l.], v. 104, p. 112850, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112850

MIRZAZADE AKBARPOOR, A.; HAGHIGHI POSHTIRI, A.; BIGLARI, F. Performance analysis of domed roof integrated with earth-to-air heat exchanger system to meet thermal comfort conditions in buildings. Renewable Energy, [S. l.], v. 168, p. 1265-1293, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.110

MISRA, A. K. *et al.* Design and performance evaluation of low cost Earth to air heat exchanger model suitable for small buildings in arid and semi arid regions. KSCE Journal of Civil Engineering, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 853-856, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-015-0588-y

MOLINA-RODEA, R. *et al.* Experimental evaluation of a "U" type earth-to-air heat exchanger planned for narrow installation space in warm climatic conditions. Energy and Built Environment, [S. l.], v. 5, n. 5, p. 772-786, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.06.004

NIU, F. *et al.* Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger. Applied Energy, [S. l.], v. 137, p. 211-221, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.010

OZGENER, O.; OZGENER, L.; GOSWAMI, D. Y. Seven years energetic and exergetic monitoring for vertical and horizontal EAHE assisted agricultural building heating. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 80, p. 175-179, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.155

OZGENER, O.; OZGENER, L.; TESTER, J. W. A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. International Journal of Heat and Mass Transfer, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 473-480, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.013

OZGENER, L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 15, n. 9, p. 4483-4490, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.132

PERETTI, C. *et al.* The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 28, p. 107-116, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.058

PFAFFEROTT, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. Energy and Buildings, [S. l.], v. 35, n. 10, p. 971-983, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00030-3

QI, D. *et al.* Comparative analysis of earth to air heat exchanger configurations based on uniformity and thermal performance. Applied Thermal Engineering, [S. l.], v. 183, p. 116152, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116152

QI, D. *et al.* Optimizing the thermal environment of greenhouse with multi-pipe earth-to-air heat exchanger system using the Taguchi method. Applied Thermal Engineering, [S. l.], v. 242, p. 122469, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122469

QI, D. *et al.* Structural optimization of multi-pipe earth to air heat exchanger in greenhouse. Geothermics, [S. l.], v. 98, p. 102288, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102288

QI, X. *et al.* Theoretical modelling and experimental evaluation of thermal performance of a combined earth-to-air heat exchanger and return air hybrid system. Renewable Energy, [S. l.], v. 236, p. 120534, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120534

RAMÍREZ-DÁVILA, L. *et al.* Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. Energy and Buildings, [S. l.], v. 76, p. 238-248, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.065

ROSA, N. *et al.* Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation. Journal of Building Physics, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 259-287, 2018. DOI: https://doi.org/10.1177/1744259117754298

SAKHRI, N.; MENNI, Y.; AMEUR, H. Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments. Journal of Arid Environments, [S. l.], v. 180, p. 104215, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104215

SAKHRI, N. *et al.* Study of heat and mass transfer through an earth to air heat exchanger equipped with fan in south west of Algeria. International Journal of Heat and Technology, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 689-695, 2019. DOI: https://doi.org/10.18280/ijht.370304

SERAGELDIN, A. A. *et al.* Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas. Solar Energy, [S. l.], v. 206, p. 145-162, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.102

SERAGELDIN, A. A.; ABDELRAHMAN, A. K.; OOKAWARA, S. Parametric study and optimization of a solar chimney passive ventilation system coupled with an earth-to-air heat exchanger. Sustainable Energy Technologies and Assessments, [S. l.], v. 30, p. 263-278, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.010

TAURINES, K. Energy and thermal analysis of an innovative earth-to-air heat exchanger: Experimental investigations. Energy and Buildings, [S. l.], v. 187, p. 1-15, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.037

THIERS, S.; PEUPORTIER, B. Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France. Solar Energy, [S. l.], v. 82, n. 9, p. 820-831, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.017

TZAFERIS, A. *et al.* Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. Energy and Buildings, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 35-43, 1992. DOI: https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90049-M

WEI, H. *et al.* Coupling of earth-to-air heat exchangers and buoyancy for energy-efficient ventilation of buildings considering dynamic thermal behavior and cooling/heating capacity. Applied Energy, [S. l.], v. 276, p. 115493, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.011

WEI, H. *et al.* Field experiments on the cooling capability of earth-to-air heat exchangers in hot and humid climate. Applied Energy, [S. l.], v. 276, p. 115493, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115493

WEI, H.; YANG, D. Performance evaluation of flat rectangular earth-to-air heat exchangers in harmonically fluctuating thermal environments. Applied Thermal Engineering, [S. l.], v. 162, p. 114262, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114262

YANG, D. *et al.* A demand-oriented approach for integrating earth-to-air heat exchangers into buildings for achieving year-round indoor thermal comfort. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 182, p. 95-107, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.040

YANG, D.; GUO, Y.; ZHANG, J. Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. Energy and Buildings, [S. l.], v. 113, p. 142-152, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.030

YUSOF, T. M. *et al.* Thermal analysis of earth-to-air heat exchanger using laboratory simulator. Applied Thermal Engineering, [S. l.], v. 134, p. 130-140, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.010

YU, Y. *et al.* Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney. Applied Energy, [S. l.], v. 114, p. 209-217, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.037

ZHAO, J. *et al.* Comprehensive review on climatic feasibility and economic benefits of Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 195, p. 114350, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114350