

## **Energia Térmica Residencial: alternativas para o aumento da eficiência energética e redução do impacto ambiental**

Residential Thermal Energy: alternatives for increasing energy efficiency and reducing environmental impact  
Energía Térmica Residencial: alternativas para aumentar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental

Tiago de Freitas Paulino <sup>1</sup>  
Willian Moreira Duarte <sup>2</sup>  
Everthon de Souza Oliveira <sup>3</sup>

### **Resumo**

A geração e o uso da energia estão entre os principais fatores de interferência humana na ecologia global. Dados atuais dão conta de que aproximadamente 50% da energia elétrica consumida nas residências brasileiras dá-se nos sistemas térmicos. Esses sistemas são utilizados para conservação de alimentos, produção de água quente,

---

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor Lotado no Departamento de Engenharia de Materiais e Credenciado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (CEFET-MG). Líder do Grupo de Pesquisa em Refrigeração, Aquecimento e Climatização (GRAC), credenciado junto ao CNPq. Membro do Centro de Pesquisa em Energia Inteligente. E-mail: [tfpaulinoeng@gmail.com](mailto:tfpaulinoeng@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2446-0373>

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor Lotado no Departamento de Engenharia de Mecânica e Credenciado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (UFMG). Membro do Grupo de Pesquisa em Refrigeração e Aquecimento (GREa), credenciado junto ao CNPq. E-mail [willianmoreiraduarte@gmail.com](mailto:willianmoreiraduarte@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6519-430X>

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor Lotado no Departamento de Engenharia de Elétrica (CEFET-MG). Membro do Centro de Pesquisa em Energia Inteligente. E-mail [everthonsol@yahoo.com.br](mailto:everthonsol@yahoo.com.br). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6016-9025>

condicionamento de ar ambiente dentre outras finalidades. Não obstante ao importante consumo de energia nesses sistemas, projeções revelam uma expectativa de um crescimento substancial da demanda de energia neles bem como de um importante aumento da demanda de energia elétrica no horário de pico. Assim, o presente trabalho visa analisar alternativas, a partir de uma revisão bibliográfica, para que essa ampliação da demanda seja atendida por soluções mais sustentáveis, que operem com eficiência elevada e reduzido impacto ambiental. Os esforços de pesquisa apontados contemplam ações para acoplamento de outras energias renováveis aos sistemas, como a solar e a geotérmica, a adequada seleção de fluidos refrigerantes, o armazenamento de energia térmica e o uso de estratégias de controle e de previsão do tempo.

**Palavras-chave:** Energia Térmica. Consumo Residencial. Eficiência Energética. Impacto Ambiental.

### **Abstract**

The production and use of energy is one of the main factors of human intervention in the global ecology. Current data shows that around 50% of the electrical energy consumed in Brazilian homes occurs in thermal systems. These systems are used for food preservation, hot water production, air conditioning and other applications. Despite the important energy consumption of these systems, projections show that energy demand in these systems is expected to grow significantly, as well as a significant demand for electricity at peak times in them. Therefore, the present work aims to analyze alternatives, based on a bibliographical review, so that this increase in demand is met by more sustainable solutions that operate with high efficiency and reduced environmental impact. The research efforts highlighted include coupling other renewable energies to systems, such as solar and geothermal, selecting appropriate refrigerant fluids, storing thermal energy, using control strategies, and employing weather forecasting.

**Keywords:** Thermal energy. Residential Consumption. Energy Efficiency. Environmental impact.

### **Resumen**

La generación y el uso de energía se encuentran entre los principales factores de interferencia humana en la ecología global. Los datos actuales muestran que aproximadamente el 50% de la energía eléctrica

consumida en los hogares brasileños ocurre en sistemas térmicos. Estos sistemas se utilizan para conservación de alimentos, producción de agua caliente, climatización ambiental, entre otros fines. A pesar del importante consumo energético en estos sistemas, las proyecciones revelan una expectativa de crecimiento sustancial de la demanda energética en los mismos, así como un aumento significativo de la demanda eléctrica durante las horas punta. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar alternativas, a partir de una revisión bibliográfica, para que este aumento de la demanda sea atendido por soluciones más sostenibles, que operen con alta eficiencia y reducido impacto ambiental. Los esfuerzos de investigación destacados incluyen acciones para acoplar otras energías renovables a los sistemas (como la solar y la geotérmica), la selección adecuada de fluidos refrigerantes, el almacenamiento de energía térmica y el uso de estrategias de control y previsión meteorológica.

**Palabras clave:** Energía Térmica. Consumo Residencial. Eficiencia energética. Impacto ambiental.

## Introdução

As energias térmicas residenciais cumprem um papel importante para a atual organização social, basta tomar como referência a conservação de alimentos em uma geladeira, tecnologia cujo desenvolvimento foi possível após a criação dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, o que remete a década de 30 do século XIX. Pode-se imaginar que a vida em uma cidade seria muito mais complexa sem um local no qual carnes, laticínios, verduras, legumes etc. pudessem ser armazenados no intuito de que a sua durabilidade fosse prolongada. Em outra perspectiva, observa-se os benefícios propiciados pelo aquecimento da água para banho, seja através de uma resistência elétrica ou de sistemas de aquecimento a gás ou solar. Para dar destaque a mais uma importante aplicação, deve-se observar o conforto térmico

propiciado pelos sistemas de ar-condicionado. Esses e outros sistemas térmicos presentes em residências (freezers, purificadores de água, adegas, climatizadores de ar etc.) contribuem para o estilo de vida atual, mas não fazem isso sem um consumo de energia elétrica e um consequente impacto ambiental.

No Brasil os últimos dados disponíveis mostram que aproximadamente 50% do consumo de energia elétrica nas residências ocorre nos sistemas térmicos: (i) perto de 35% são utilizadas na produção de frio (em torno de 17,5% nas geladeiras, 14% no condicionamento de ar e 4% nos freezers); e (ii) aproximadamente 15% é utilizada na produção de calor nos chuveiros elétricos (EPE, 2018). Para além do atual consumo, já expressivo, estimativas dão conta de que o consumo, em particular aquele relativo à produção de frio tende a aumentar, tornando-se o mais expressivo em edificações, no mundo. A OECD/IEA (2018) aponta como fatores que contribuirão para esse aumento: (i) as mudanças climáticas, em detrimento do aumento médio da temperatura e em virtude da maior incidência de eventos com temperaturas extremas; (ii) o crescimento econômico e maior acessibilidade aos equipamentos de condicionamento de ar; (iii) os fatores geográficos como o crescimento populacional e a urbanização. Nessa direção, a estimativa é de que 48,5 TWh sejam consumidos no Brasil em 2035, nos sistemas de ar-condicionado, frente aos 18,7 TWh consumidos em 2017, um crescimento anual de 5,4% ao ano no período destacado (EPE, 2018). Cabe ainda destaque, nesse contexto, o consumo de energia elétrica no horário de pico. Estimativas desenvolvidas pela OECD/IEA (2018),

referentes ao Brasil, dão conta de que em 2016, aproximadamente 8% do consumo de energia no horário de pico era referente aos sistemas de condicionamento de ar. Entretanto, em 2050, esse valor deverá corresponder a mais de 30%. Esse fato tem potencial para afetar não somente a demanda por produção de energia elétrica no país, mas também as redes de distribuição de energia elétrica.

O sistema de compressão de vapor, utilizado nos condicionadores de ar, geladeiras, freezers, purificadores de água e adegas é constituído por quatro equipamentos principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e o evaporador. Esses equipamentos são conectados por tubulações, em conjunto com equipamentos secundários. Dentro dessas tubulações e equipamentos circula o fluido refrigerante responsável pela transferência de calor no sistema. Já é de conhecimento amplo que o vazamento de fluidos refrigerantes degrada o meio ambiente. Molina e Rowland (1974) identificaram o potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) pelos fluidos refrigerantes, o que culminou na assinatura do Protocolo de Montreal em 1987 restringindo gradualmente o uso de fluidos com ODP diferente de zero. Protocolo que teve ressonância no Brasil através da resolução 267 do CONAMA (2000). Identificou-se também que o vazamento de fluidos refrigerantes contribui de forma direta para o aquecimento global. Uma mudança importante, deu-se então com o uso de fluidos refrigerantes com baixo potencial de aquecimento global (GWP), o que foi motivado pelo protocolo de Kyoto em 1997 e retificado em 2016 pela Emenda de Kigali, bem como por outras legislações (UNIÃO EUROPEIA, 2014).

Entretanto, não é somente o vazamento dos fluidos refrigerantes que contribui para o aquecimento global. Como esses sistemas fazem uso de energia elétrica, há um potencial indireto de aquecimento global associado a eles. Assim, a eficiência associada ao ciclo de refrigeração impacta diretamente no aquecimento global. Cabe ressaltar que esse potencial varia de país a país em função das estratégias utilizadas para produção da energia elétrica. Técnicas mais atuais de seleção de fluidos refrigerantes levam em consideração tanto o impacto direto do vazamento do fluido como o impacto relativo à eficiência energética do sistema (MAKHNATCH e KHODABANDEH, 2014).

O contexto que se apresenta é desafiador, ampliar a oferta dos sistemas aqui apresentados e ao mesmo mais fazê-lo em uma perspectiva de maximização da eficiência energética e de redução do impacto ambiental. O aquecimento global, também gerado pela operação desses sistemas tem impactado a humanidade. No Brasil, no ano de 2023 observou-se recordes históricos de temperaturas. No mundo pela primeira vez, ainda em 2023, registrou-se um dia com temperatura média global 2°C acima da era pré-industrial. Muitos esforços têm sido empregados para mitigar / reduzir os efeitos do aquecimento global, como aqueles empregados nas COP's (Conferência das Partes, evento realizado no contexto da Conferência do Clima da ONU), apesar de ainda se mostrarem insuficientes. Diferentes instituições (governos, universidades, ONGs etc.) têm feito importantes esforços nesse sentido, dentre esses está Igreja Católica através dos documentos *Laudato Si'* (FRANCISCO, 2015) e *Laudate Deum* (FRANCISCO, 2023) no qual

convida todas as pessoas, em especial aos governos a tomarem as urgentes ações necessárias para mitigar os impactos das ações do ser humano sobre o planeta.

Na perspectiva da busca por soluções mais efetivas, o presente trabalho pretende apresentar alternativas de ações, em particular no campo da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, que podem ser adotadas no Brasil para aumentar a eficiência dos sistemas de produção de energia térmica residencial e reduzir o impacto ambiental advindo deles nesse cenário de ampliação de demanda.

## **1. Alternativas para redução do consumo de energia elétrica e do impacto ambiental**

### **1.1. Uso de energias renováveis na produção de frio**

A produção de frio no ciclo de compressão de vapor convencional dá-se através do uso da energia térmica (renovável) presente no ar ambiente. Nesses sistemas, o condensador troca calor com o ar atmosférico externo (fonte quente) e o evaporador troca calor com a fonte fria produzindo o efeito almejado pelo sistema. Quanto mais distantes forem as temperaturas das fontes quente e fria menor será a eficiência da operação desses sistemas, resultando assim em maior consumo de energia elétrica e maior impacto ambiental para produzir o efeito desejado.

Uma solução amplamente utilizada no mundo, e pouco empregada no Brasil, para aproximar as fontes quente e fria é o uso de energia geotérmica. Nos sistemas geotérmicos, o condensador troca calor com o solo através de variadas configurações, algumas das configurações utilizadas são apresentadas na Figura 1. A Figura 2 ajuda a compreender as vantagens que podem ser obtidas com o uso dessa fonte energética que também é renovável. Nela pode-se observar um gráfico típico dos perfis de temperatura do ar e do solo, cabe ressaltar que os valores e a amplitude deles variam de localidade para localidade. Observa-se ao longo do ano, para uma cidade no estado da Flórida/EUA, a variação da temperatura ambiente e do solo em função da profundidade. É importante notar que à medida que a profundidade do solo vai aumentando a temperatura dele tende a ficar aproximadamente constante ao longo do ano, e de uma maneira geral essa temperatura é a média anual das temperaturas do ar atmosférico. Nesse sentido, o uso de trocadores de calor geotérmicos torna-se uma tecnologia relevante durante o verão, período em que as temperaturas do ar são maiores que as temperaturas do solo e momento no qual a demanda de energia térmica nos sistemas de produção de frio nas residências é mais elevada.



Figura 1 – Alternativas para trocadores de calor geotérmico em circuito fechado. Adaptado de Brescansi (2015).

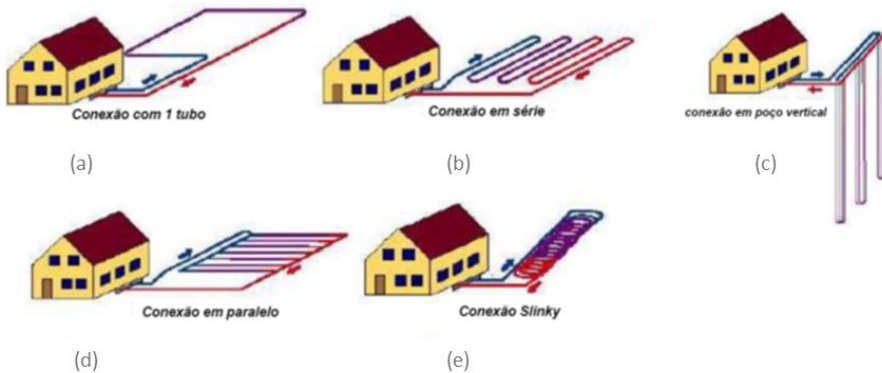
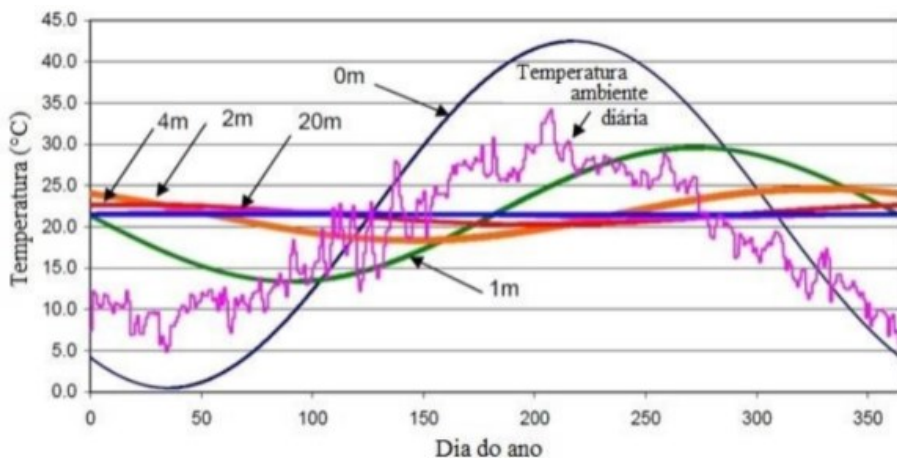


Figura 2 – Variação anual da temperatura ambiente e do solo em função da profundidade para uma cidade na Flórida/EUA. Adaptado de Florides (2015).



O uso de sistemas geotérmicos em localidades cujo a demanda do equipamento de condicionamento de ar é de produção de frio tem

mostrado importante economia de energia elétrica e consequente redução do impacto ambiental (KHARSEH, AL-KHAWAJA e SULEIMAN, 2015; WIDIATMOJO et al., 2019; DUARTE et al. 2023). Um estudo teórico comparativo entre o sistema de ar-condicionado convencional e um sistema geotérmico (ambos aplicados a um escritório de pequenas dimensões, cujo porte é similar ao dos equipamentos de ar-condicionado residencial), desenvolvido para o Brasil (DUARTE et al. 2023) mostrou, no melhor cenário analisado, uma economia de 34% no sistema geotérmico com uma estimativa de retorno de investimento de 1,4 anos. Corroborar com o potencial de uso da energia geotérmica superficial em ciclos de compressão de vapor o PNE 2050 (EPE, 2020) que aponta essa como uma tecnologia com potencial disruptivo.

## **1.2. Uso de energias renováveis na produção de calor**

Como já mencionado o aquecimento de água para banho no Brasil dá-se, majoritariamente através de três alternativas: (i) aquecedor elétrico, nos chuveiros; (ii) aquecedores a gás; (iii) aquecedor solar.

No contexto brasileiro, o aquecedor a gás, ao queimar um combustível fóssil pode emitir uma quantidade de dióxido de carbono na atmosfera, por kWh de energia térmica gerada, que seja aproximadamente 20 vezes superior ao total emitido pelo aquecimento através de uma resistência elétrica (cabe lembrar que se considera aqui a emissão de CO<sub>2</sub> que ocorre na geração da energia elétrica). O elevado impacto ambiental associado a esse sistema deveria ser suficiente para que não continue a ser uma

alternativa considerada para esse fim. Os aquecedores elétricos têm um custo de instalação bastante reduzido, o que num país com limitados recursos financeiros, como é o caso do Brasil, faz com que seu uso continue bastante expressivo. O aquecedor solar de água é bastante difundido no Brasil e apresentou crescimento em área instalada de coletores de aproximadamente 49% entre os anos de 2013 e 2020 (ABRASOL, 2021). O uso do aquecedor solar contribui sobremaneira para a redução do consumo de energia elétrica e conseqüentemente contribui para a redução do impacto ambiental associado ao aquecimento da água.

Nos dias em que a irradiação é mais elevada os aquecedores solares não precisam de complemento energético para que a água seja aquecida nas condições desejadas, a saber: (i) 45°C para consumo direto, e (ii) acima de 60°C para armazenamento evitando proliferação da bactéria *Legionella* (KIM, et al., 2022). Apesar de ser uma tecnologia em uso corrente, diversas melhorias nesses sistemas são avaliadas (SADHISHKUMAR e BALUSAMY, 2014; DESPOTOVIC e NEDIC, 2015; ARAÚJO, et al., 2023). Para os dias em que a energia disponibilizada pelo sol não é suficiente para aquecer a água na temperatura desejada é preciso fazer uso de um complemento energético. Geralmente, esse complemento energético é realizado através de um aquecedor elétrico. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do aquecedor solar com complemento energético dado por um aquecedor elétrico. Uma alternativa ao aquecedor elétrico é a bomba de calor, sistema de compressão de vapor no qual o condensador transfere calor

para a água e o evaporador absorve energia ambiente (BUKER e RIFFAT, 2016), nessa configuração o equipamento é caracterizado como bomba de calor solar. As bombas de calor, por absorverem energia do ar ambiente caracterizam-se como um complemento energético com consumo bastante reduzido de energia, o que pode representar reduções da ordem de 75%. Uma representação esquemática de uma bomba de calor solar (ou em uma descrição mais completa, bomba de calor assistida por energia solar do tipo indireta operando em paralelo) é apresentada na Figura 4. Como já realçado no texto a diferença entre as tecnologias apresentadas nas figuras 3 e 4 está na forma de se prover a energia para o complemento energético. A adequação de bombas de calor solar, busca pelo aumento da eficiência nesses sistemas, bem como a avaliação dos arranjos mais favoráveis tem recebido atenção em diferentes pesquisas (DUARTE, 2018, PAULINO et al., 2019, DINIZ et al., 2023).

Figura 3 – Aquecedor solar com complemento energia de aquecedor elétrico.

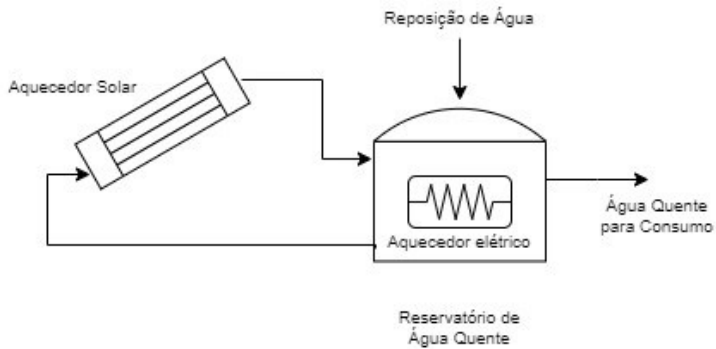
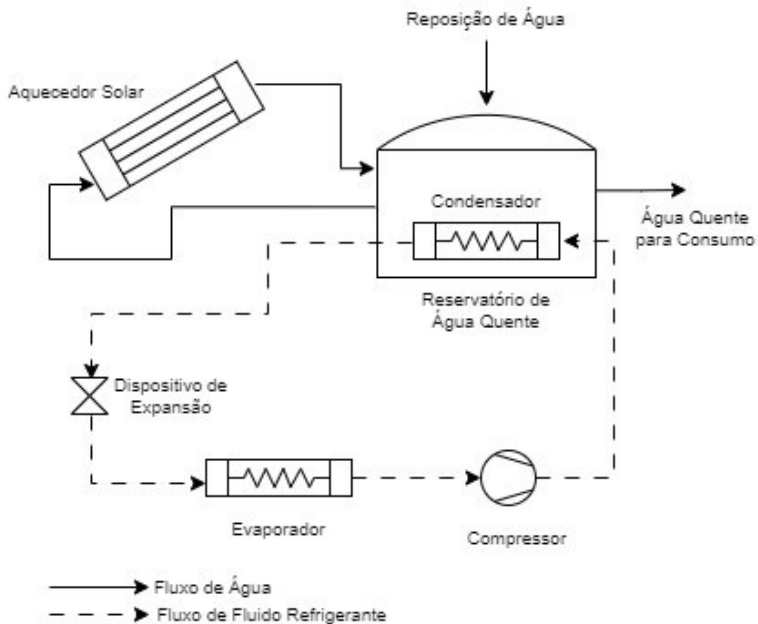


Figura 4 – Bomba de calor assistida por energia solar do tipo indireta operando em paralelo.



As bombas de calor do tipo híbrida podem ainda se configurar como uma alternativa. Elas seriam uma modificação do arranjo apresentado na Figura 4, no qual o evaporador poderia receber energia do ar atmosférico ou do solo a depender das temperaturas. Nos momentos em que a temperatura do solo for maior, a troca ocorreria com este. Por sua vez, quando a temperatura do ar atmosférico for mais elevada a troca ocorreria com ele. A aplicação de uma bomba de calor híbrida para aquecimento de água em uma localidade com clima tropical foi avaliada por Duarte et al. (2021) e os resultados indicaram que a bomba de calor híbrida opera com maior eficiência que a bomba de calor solar.

### **1.3. Seleção de fluidos refrigerantes**

A seleção do adequado fluido refrigerante pode variar em função do propósito, do porte e da localidade do sistema e é atualmente um relevante tópico de pesquisa (SARBU, 2014; DUARTE et al., 2019; STAUBACH, MICHEL e REVELLIN, 2023). O consenso é pela busca de um fluido refrigerante que tenha ODP nulo e que apresente baixo GWP. Utilizar somente o GWP como parâmetro de avaliação do impacto para o aquecimento global não parece ser a melhor opção. O GWP, possibilita apenas a análise do impacto direto (em decorrência do vazamento) do fluido refrigerante. Assim, o impacto indireto, em virtude da geração da energia elétrica utilizada no sistema, não é contabilizado. Para tentar suprir essa lacuna, outros parâmetros têm sido utilizados

como: (i) o TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*); e (ii) o LCCP (*Life Cycle Climate Performance*). Esses parâmetros buscam considerar o efeito indireto (relativo ao desempenho energético) do uso do fluido refrigerante no aquecimento global. É importante notar que os estudos têm mostrado que nos fluidos com baixo GWP o impacto direto é praticamente desprezível (MAKHNATCH e KHODABANDEH, 2014; PAULA et al., 2020, Humia et al. 2021), assim utilizar o TEWI como parâmetro ambiental na seleção de fluidos refrigerantes seria mais assertivo.

O propósito do sistema (produção de frio ou calor), a capacidade (carga térmica) e as características do ambiente são condições essenciais para definição dos equipamentos (principais e secundários), bem como do fluido refrigerante a ser utilizado. Cabe ainda ressaltar que são possíveis configurações diferentes no arranjo do sistema ou no uso de diferentes equipamentos / componentes secundários. Questões como essa demandam análises (teóricas e experimentais) individualizadas desses sistemas, uma vez que a melhor solução de fluido refrigerante não será a mesma quando as características variam. Em particular é preciso observar que como a condição ambiente no Brasil difere, em particular dos países onde a maioria das pesquisas é produzida (China, EUA e Europa) os esforços locais tornam-se ainda mais necessários.

## 1.4. Armazenamento de energia térmica

Através do armazenamento de energia térmica em um reservatório térmico (TES), pode-se desacoplar o horário de consumo da energia do horário no qual ela é produzida. A energia pode então ser produzida no horário mais favorável do ponto de vista termodinâmico, aquele no qual as temperaturas das fontes quentes e frias estejam mais próximas. Ou fora do horário de pico, para reduzir a demanda de transmissão de energia elétrica nesses momentos.

A energia térmica pode ser armazenada na forma de calor sensível (através da mudança de temperatura do material, sem ocorrer mudança de fase do material) ou na forma de calor latente (ocorrendo mudança de fase do material). O armazenamento em materiais que mudam de fase (PCM) possibilita que a mesma quantidade de energia seja armazenada em um volume menor (MONTEIRO, 2018). Uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, avaliando o contexto brasileiro, indicou a parafina como o PCM mais promissor (DUTRA et al., 2020). Um estudo comparativo, fazendo uso de um modelo matemático, para um sistema de ar-condicionado cuja demanda de frio pode ser atendida de forma direta ou atendida através de TES/PCM que armazenou a energia durante a noite foi realizado por Santos (2023) para a cidade de Teresina/PI. Observou-se, para o sistema analisado que o uso do TES/PCM (com produção do frio durante a madrugada, evitando o consumo de energia no sistema de ar-condicionado durante o horário de pico) pode contribuir para uma redução do consumo de energia elétrica



que variou entre 1,2% e 9,4%, a depender das condições meteorológicas. Uma análise da literatura sobre a aplicação de PCMs em sistemas de refrigeração de pequeno porte é apresentado por Rocha et al. (2023), nele os autores discorrem sobre o potencial e limitações para implementação da tecnologia, na conclusão desse trabalho de revisão eles indicam que há um consenso, na literatura, que o uso de PCMs nos sistemas de refrigeração de pequeno porte contribui para aumento de eficiência nestes.

### **1.5. Controle e uso de previsão do tempo**

As estratégias de controle são fundamentais para garantir segurança e maximização de eficiência nos sistemas térmicos residenciais. Diferentes esforços têm sido empregados nessa direção, em algumas situações para aumento de desempenho (JENSEN et al., 2021) outras visando segurança na operação (KONG et al., 2018). Essas soluções não são simples pois demandam um esforço de uma equipe multidisciplinar na busca de soluções adequadas.

O acoplamento de sistemas de previsão do tempo às estratégias de controle / automação pode contribuir para aumento da eficiência e redução do impacto ambiental. Basta considerar que de uma maneira geral, há um melhor horário do dia para produção da energia térmica. Para esse acoplamento de controle / automação com previsão do tempo, o armazenamento de energia faz-se necessário. Assim, pode-se buscar respostas a questões como: (i) qual o melhor período naquele dia para se

produzir a energia térmica (calor ou frio)?; (ii) qual a melhor fonte de energia a se utilizar (ar atmosférico, solar, geotérmica)?; (iii) por quanto tempo o equipamento precisará permanecer ligado para que a energia almejada seja produzida? Esses entre outros questionamentos podem ajudar a ampliar a eficiência na produção da energia almejada. A busca pelo uso de técnicas de previsão do tempo em sistema de compressão de vapor já tem sido observada na literatura (THYGESEN e KARLSSON, 2016; DAHL, BRUN e ANDRESEN, 2017; XIE et al., 2020) mas existem diferentes lacunas a serem preenchidas.

## **Conclusão**

O presente trabalho busca apresentar o contexto brasileiro de energia térmica residencial, apresentando o status atual e as perspectivas no campo da investigação científica. Observa-se que o consumo de energia térmico residencial é expressivo, apresenta indicativos de aumento de demanda e de aumento do consumo no horário de pico. O uso de novas tecnologias pode auxiliar nas duas frentes descritas: ampliar a eficiência energética dos sistemas e reduzir o consumo de energia no horário de pico. Para aumento da eficiência energética as soluções discutidas foram: (a) acoplamento de outras energias renováveis aos sistemas, como a solar e a geotérmica; (b) a adequada seleção de fluidos refrigerantes; (c) o armazenamento de energia térmica; e (d) o uso de estratégias de controle e previsão do tempo. Os dois últimos pontos listados estão diretamente vinculados à possibilidade de produção da energia térmica fora do horário de pico.

Os benefícios obtidos com as modificações podem ser promissores e um roteiro nessa direção pode conter: (i) na primeira etapa esforços de pesquisa multidisciplinar em trabalhos teóricos e experimentais; (ii) em uma segunda etapa será necessário o aumento de parcerias com a indústria de forma a produzir em uma escala maior os produtos desenvolvidos; e (iii) por fim, o estabelecimento de políticas públicas que visem o melhor uso da energia, redução do impacto ambiental e aumento da qualidade de vida. Essas ações têm potencial para contribuir na mitigação dos efeitos da interferência humana na ecologia global.

### **Referências Bibliográficas**

ABRASOL - Associação Brasileira de Energia Solar Térmica. Pesquisa de Produção e Vendas de Sistemas de Aquecimento Solar 2021 (base 2020). 2021.

ARAÚJO, António et al. Optimization of collector area and storage volume in domestic solar water heating systems with on–off control—A thermal energy analysis based on a pre-specified system performance. **Applied Thermal Engineering**, v. 219, p. 119630, 2023.

ARIF, W.; SASIMOOK, C.; ISAO, T. Ground-Source Heat Pumps with Horizontal Heat Exchangers for Space Cooling in the Hot Tropical Climate of Thailand. *Energies*. 2019.

BRESCANSIN, R. A; ALCANTARA, D. S. Projeto e dimensionamento de sistema de climatização comercial utilizando resfriamento geotérmico. 2015

BUKER, Mahmut Sami; RIFFAT, Saffa B. Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic

review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 399-413, 2016.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 267 de 2000. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Ministério do Meio Ambiente, 2000.

DAHL, Magnus; BRUN, Adam; ANDRESEN, Gorm B. Using ensemble weather predictions in district heating operation and load forecasting. **Applied Energy**, v. 193, p. 455-465, 2017.

DINIZ, Hélio Augusto Goulart et al. Energetic, exergetic, environmental and economic (4E) analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump with low GWP refrigerant. **International Journal of Refrigeration**, v. 154, p. 84-98, 2023.

DESPOTOVIC, Milan; NEDIC, Vladimir. Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly, seasonal and monthly levels. **Energy Conversion and Management**, v. 97, p. 121-131, 2015.

DUARTE, Willian M. Numeric model of a direct expansion solar assisted heat pump water heater operating with low GWP refrigerants (R1234yf, R290, R600a and R744) for replacement of R134a. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2018.

DUARTE, Willian M. et al. Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water. **Solar Energy**, v. 184, p. 527-538, 2019.

DUARTE, Willian M. et al. Feasibility of solar-geothermal hybrid source heat pump for producing domestic hot water in hot climates. **International Journal of Refrigeration**, v. 124, p. 184-196, 2021.

DUARTE, Willian M. et al. Comparative study of geothermal and conventional air conditioner: A case of study for office applications. **Journal of Building Engineering**, v. 65, p. 105786, 2023.

DUTRA, Clarice M. L. C. et al. The Brazilian perspective of thermal energy storage focused on air conditioning and water heating for bath: literature review. In: 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica EPE 030/2018. Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. PNE 2050 – Plano Nacional de Energia. 2020.

FLORIDES, G. Annual Ground Temperature Measurements at Various Depths. Higher Technical Institute. Paper reference. 2015

FRANCISCO, Papa; BERGOGLIO, Jorge Mario. Carta Encíclica Laudato Si': sobre o cuidado da casa comum. 2015.

FRANCISCO, Papa; BERGOGLIO, Jorge Mario. Carta Encíclica Laudate Deum: sobre a crise climática. 2013.

HUMIA, Gleberon M. et al. Experimental study and simulation model of a direct expansion solar assisted heat pump to CO<sub>2</sub> for water heating: Inventory, coefficient of performance and total equivalent warming impact. **Solar Energy**, v. 230, p. 278-297, 2021.

JENSEN, Jonas Kjær et al. Comparison of compressor control strategies for energy efficient refrigerated counters. **International Journal of Refrigeration**, v. 126, p. 1-11, 2021.

KHARSEH, Mohamad; AL-KHAWAJA, Mohammed; SULEIMAN, Muhannad T. Potential of ground source heat pump systems in cooling-dominated environments: Residential buildings. **Geothermics**, v. 57, p. 104-110, 2015.

KIM, B. R. et al. Literature review—efficacy of various disinfectants against Legionella in water systems. **Water research**, v. 36, n. 18, p. 4433-4444, 2002.

KONG, Xiangqiang et al. Control strategy and experimental analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater with R134a. *Energy*, v. 145, p. 17-24, 2018.

MAKHNATCH, Pavel; KHODABANDEH, Rahmatollah. The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. *Energy Procedia*, v. 61, p. 2460-2463, 2014.

MOLINA, Mario J.; ROWLAND, F. Sherwood. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, v. 249, n. 5460, p. 810-812, 1974.

MONTEIRO, M. M. Caracterização termofísica de bio materiais de mudança de fase por meio da metodologia THistory. 128p. Dissertação de mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. 2018

OECD/IEA, International Energy Agency. The Future of Cooling Opportunities for energy efficient air conditioning. 2018

PAULA, Cleison Henrique et al. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration*, v. 113, p. 10-20, 2020.

PAULINO, T. F. et al. Modeling and experimental analysis of the solar radiation in a CO<sub>2</sub> direct-expansion solar-assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering*, v. 148, p. 160-172, 2019.

ROCHA, Thiago Torres Martins et al. Potential of latent thermal energy storage for performance improvement in small-scale refrigeration units: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 187, p. 113746, 2023.

SADHISHKUMAR, S.; BALUSAMY, T. Performance improvement in solar water heating systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 191-198, 2014.

SANTOS, A. H. C., 2023. Air conditioning system integrated with thermal energy storage for buildings. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

SARBU, Ioan. A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 46, p. 123-141, 2014.

STAUBACH, Dario; MICHEL, Benoît; REVELLIN, Rémi. Refrigerant selection from an economic and TEWI analysis of cascade refrigeration systems in Europe based on annual weather data. **Applied Thermal Engineering**, v. 230, p. 120747, 2023.

THYGESEN, Richard; KARLSSON, Björn. Simulation of a proposed novel weather forecast control for ground source heat pumps as a mean to evaluate the feasibility of forecast controls' influence on the photovoltaic electricity self-consumption. **Applied energy**, v. 164, p. 579-589, 2016.

UNIÃO EUROPEIA. REGULAMENTO (UE) N.º 517/2014 do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de abril de 2014. Relativo aos gases fluorados com efeito de estufa e que revoga o Regulamento (CE) n.º 842/2006

XIE, Yiwei et al. A hybrid short-term load forecasting model and its application in ground source heat pump with cooling storage system. **Renewable Energy**, v. 161, p. 1244-1259, 2020.

WIDIATMOJO, Arif et al. Ground-source heat pumps with horizontal heat exchangers for space cooling in the hot tropical climate of Thailand. **Energies**, v. 12, n. 7, p. 1274, 2019.