

Fogão Solar Parabólico de Baixo Custo: Desenvolvimento, Modelagem e Análise de Desempenho

Geraldo Pôrto de Araújo^{1,2}, Alisson P. Costa^{1,2}

¹*Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional - Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC - Ilhéus - Bahia - Brasil.*

²*Centro Estadual de Educação Profissional do Chocolate Nelson Schaun - CEEP do Chocolate - Ilhéus - Bahia - Brasil.*

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um fogão solar parabólico de baixo custo, construído a partir de uma antena reutilizada. A análise experimental mostrou temperaturas próximas a 300 °C. A modelagem teórica descreveu a concentração e a dispersão da energia no foco, explicando o comportamento térmico observado. Os resultados indicam viabilidade como alternativa sustentável para preparo de alimentos.

Palavras-chave: Fogão solar parabólico; energia solar térmica; concentração de energia; sustentabilidade; óptica geométrica.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de fogões solares tem sido amplamente investigada como uma alternativa tecnológica de baixo impacto ambiental para o preparo de alimentos, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de radiação solar (Kalogirou, 2014; Saxena et al., 2011). Entre as diferentes configurações, os modelos tipo caixa e painel destacam-se pela simplicidade e baixo custo, embora apresentem menor eficiência térmica e maior tempo de cocção (Said et al., 2017; Nahar, 2003). Em contrapartida, os fogões solares parabólicos apresentam desempenho superior, pois concentram a radiação em uma região focal reduzida, permitindo atingir temperaturas mais elevadas e viabilizar processos como fervura, fritura e assamento (Mullick et al., 2006). No entanto, esses sistemas exigem maior controle de apontamento solar e apresentam desafios relacionados à segurança e estabilidade (Petela, 2005). Trabalhos recentes indicam avanços no uso de superfícies refletoras mais eficientes, isolamento térmico aprimorado, mecanismos de rastreamento solar e integração com armazenamento térmico, como materiais de mudança de fase (PCM), visando ampliar a eficiência e a autonomia desses sistemas (Abed et al., 2020; Sharma et al., 2009). Nesse contexto, destaca-se também o uso de antenas parabólicas reaproveitadas, que associam baixo custo e sustentabilidade, embora seu desempenho dependa fortemente da geometria, refletividade e precisão do foco (Kumar et al., 2019; Harmim et al., 2012).

No semiárido brasileiro, onde há elevada incidência solar ao longo de praticamente todo o ano (EPE, 2022), o fogão a lenha ainda constitui a principal fonte de energia para o preparo de alimentos.

Contudo, seu uso intensivo contribui para a degradação ambiental, intensificando processos de desmatamento e desertificação (FAO, 2017), além de causar impactos à saúde devido à emissão de poluentes em ambientes domésticos (WHO, 2018). Nesse cenário, o aproveitamento da energia solar térmica surge como uma alternativa sustentável, limpa e de baixo custo, com potencial para reduzir tanto os impactos ambientais quanto os custos energéticos domésticos, especialmente em comunidades de baixa renda, onde a insegurança alimentar ainda é significativa (Governo da Bahia, 2023).

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um fogão solar parabólico de baixo custo, baseado na aplicação de princípios da óptica geométrica para a concentração da radiação solar em um ponto focal por meio de superfícies côncavas espelhadas. O sistema é construído a partir do reaproveitamento de antenas parabólicas e materiais refletivos, buscando aliar eficiência energética, acessibilidade e sustentabilidade. Adicionalmente, o projeto possui caráter educacional, ao envolver estudantes na aplicação prática de conceitos físicos. Assim, este trabalho tem como objetivos principais: (i) desenvolver um protótipo funcional de fogão solar parabólico de baixo custo; (ii) analisar seu desempenho térmico a partir da concentração da radiação solar; e (iii) avaliar seu potencial como alternativa sustentável para o preparo de alimentos no contexto do semiárido brasileiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MONTAGEM E ANÁLISE

Para a construção do forno solar, utilizou-se uma antena parabólica com raio aproximado de 30 cm, previamente inutilizada e destinada ao descarte. Inicialmente, a estrutura foi higienizada (Fig. 1) e submetida a um processo de lixamento, com o objetivo de melhorar a aderência do material refletor aplicado posteriormente.



Figura 1. Preparação da antena parabólica para revestimento.

Após essa etapa de preparo, uma manta espelhada adesiva (Espelho Adesivo para Decoração em Mosaico Artesanal) foi fixada sobre a superfície côncava da antena (Fig. 2), transformando-a em um refletor capaz de concentrar os raios solares em um ponto focal. Esse arranjo permitiu a convergência do feixe luminoso, promovendo a concentração de energia térmica no foco — elemento central do funcionamento do fogão solar. Observou-se, já nos primeiros testes, a geração de calor significativo, compatível com os objetivos do trabalho.



Figura 2. Espelho adesivo artesanal decorativo.

Quantitativamente, medições iniciais indicaram que a temperatura média no ponto focal atingiu aproximadamente 300 °C. Em testes subsequentes, avaliou-se a relação entre a distância focal — definida como a distância entre a superfície refletora

e o ponto de convergência dos raios — e a temperatura alcançada (Fig. 3).



Figura 3. Protótipo parabólico montado com revestimento espelhado com termômetro análogo de forno/estufa no ponto estimado de convergência dos raios solares refletidos.

Verificou-se que, após cerca de 30 segundos de exposição solar, a temperatura no ponto estimado como foco atingiu cerca de 250 °C, valor máximo registrado pelo termômetro disponível. Ressalta-se, contudo, que, sob condições ideais de irradiação solar, sistemas dessa configuração podem alcançar temperaturas próximas a 400 °C.

É importante destacar que a montagem experimental observada na Fig. 3 precisou de ajustes durante os testes iniciais, para que a mesma obtivesse o correto alinhamento com o Sol de modo a receber a máxima incidência solar possível. Para contornar essa limitação, foi utilizada uma base de sustentação que se adaptasse a essa necessidade e uma articulação de elevação na qual a antena foi fixada, permitindo maior estabilidade e ajuste angular mais eficiente. A Figura 4 a seguir mostra a montagem vista do fundo.



Figura 4. Vista de fundo para observação do suporte fixado à antena.

Com a estrutura principal estabilizada, tornou-se necessário projetar um suporte adequado para a panela, garantindo seu posicionamento correto em

relação ao foco. Após diversas tentativas sem sucesso, optou-se pela utilização da estrutura metálica de uma mesa escolar em desuso (Fig. 5), que se mostrou adequada ao permitir o alcance de tem



Figura 5. Vista lateral da montagem com recipiente de cozimento (panela) sobre o suporte, posicionado na projeção do foco para a antena.

Na etapa final, realizamos testes práticos de desempenho térmico e capacidade de cozimento. Utilizou-se uma caçarola com óleo para fritura de um ovo (Fig. 6), observando-se que o tempo de preparo foi superior ao de um fogão convencional a gás.



Figura 6. Ovo sendo frito por meio da energia solar.

Ainda assim, o protótipo demonstrou viabilidade funcional, com tempo médio de aproximadamente 5 minutos para total fritura, o que evidencia seu potencial como alternativa sustentável, se não como fonte primária de preparo de alimentos, ao menos como uma fonte secundária, particularmente em situações que não demandam consumo imediato.

2.2 MODELAGEM TEÓRICA E ESTUDO ENERGÉTICO DO SISTEMA

A fim de complementar a análise experimental, desenvolvemos uma modelagem teórica para estimar

o desempenho térmico do nosso protótipo de fogão solar parabólico. Inicialmente consideramos que a superfície refletora da antena parabólica pode ser descrita pela geometria de uma parábola, dada por:

$$y^2 = 4fx \quad (1)$$

onde f representa a distância focal. Essa propriedade geométrica garante que raios solares incidentes paralelos ao eixo óptico sejam refletidos para o foco.

Agora, partir da geometria da antena, com raio R e profundidade h , a distância focal pode ser obtida por:

$$f = \frac{R^2}{4h} \quad (2)$$

Essa relação é obtida substituindo o ponto da borda da parábola ($y = R$, $x = h$) na equação fundamental da parábola dada na Eq. (1). Assim, por meio da Eq. (2) podemos saber com clareza matemática onde colocarmos nossa panela para o cozimento. Se considerarmos $R \approx 30 \text{ cm}$ e profundidade típica $h \approx 6 \text{ m}$ encontramos um valor de distância focal $f \approx 37,5 \text{ cm}$ a partir do centro da parábola.

Em seguida, precisamos também saber a área de coleta de incidência solar para conhecer o quanto de energia se tem disponível. Para isso, obtemos o valor da área por meio da equação a seguir:

$$A = \pi R^2 \quad (3)$$

Portanto, o valor de área disponível para captar energia solar é de aproximadamente $0,283 \text{ m}^2$. De modo que a potência térmica disponível no sistema, P , pode ser estimada, em *Watts* (W) através da equação abaixo:

$$P = I \cdot A \cdot \eta \quad (4)$$

onde I é a irradiância solar incidente (em W/m^2), η é a eficiência global do sistema. Para o valor de I , em condições de céu limpo, valores próximos de 900 W/m^2 são usados frequentemente como referência experimental em estudos de fogões solares (AL-Soud et al. 2010). O valor de η consideramos como $0,60$ - uma estimativa otimista de eficiência global para esse sistema - levando em conta perdas por reflexão imperfeita, desalinhamento, absorção incompleta pela panela, vento e perdas térmicas. Estudos experimentais em regiões de incidência solar menos intensa relatam eficiências nessa ordem (AL-Soud et al. 2010). Dessa forma, nossa potência disponível com o valor estimado de A , em conjunto

com as estimativas para I e η é de aproximadamente 153 W. Esse valor não significa que toda essa potência vira calor útil no alimento imediatamente. Ele é uma estimativa da potência térmica aproveitável sob hipóteses ideais/moderadas.

Para conhecermos a energia por unidade de área, ou seja, quanto de energia temos por m^2 no foco, usamos a equação para o fluxo de calor, dada por:

$$q'' = \frac{P}{A_f} \quad (5)$$

onde q'' representa a potência por unidade de área no foco, P a potência concentrada e A_f a área focal efetiva. Essa relação evidencia que a concentração de energia em uma pequena área resulta em alta densidade de potência. Considerando um raio focal de 1 cm, obtém-se $A_f = 3,14 \cdot 10^{-4} m^2$ e $q'' \approx 0,5 MW/m^2$ para $P=153 W$.

O valor estimado para q'' evidencia que a concentração da potência solar em uma pequena área focal gera uma elevada densidade de energia, justificando as altas temperaturas observadas experimentalmente. Entretanto, essa condição de máxima concentração ocorre apenas nas proximidades do foco. À medida que os raios refletidos se afastam desse ponto, o feixe passa a divergir, aumentando a área iluminada e reduzindo a energia disponível por unidade de área.

Nessa perspectiva, para descrever a perda de intensidade térmica após o foco, adotou-se uma aproximação geométrica na forma de um cone invertido. Nesse modelo, o raio do feixe aumenta com a distância z em relação ao ponto focal, permitindo estimar a expansão da área iluminada e, consequentemente, a variação da temperatura ao longo do eixo óptico, a Figura 7 a seguir representa a situação descrita com vista superior (de cima).

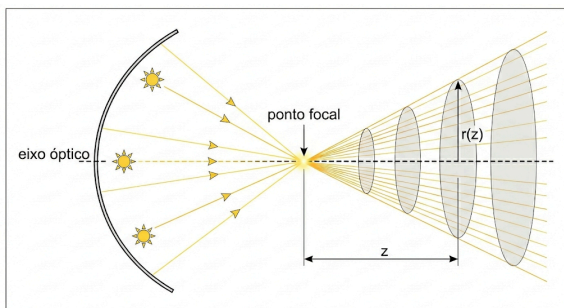


Figura 7. Vista superior esquemática da situação de convergência no foco e espalhamento pós foco.

A Fig. 7 ilustra o comportamento do feixe luminoso após a convergência no ponto focal, onde os raios refletidos passam a divergir, formando um cone invertido ao longo do eixo óptico. Nesse regime, a expansão geométrica do feixe pode ser descrita por

um modelo simples, no qual o raio da seção transversal cresce linearmente com a distância z a partir do foco. Assim, o raio do feixe é dado por

$$r(z) = r_0 + z \tan \theta \quad (6)$$

onde r_0 representa o raio mínimo na região focal e θ o ângulo de abertura do feixe. Com o aumento de $r(z)$, a área iluminada também cresce, podendo ser expressa por:

$$A(z) = \pi[r_0 + z \tan \theta]^2 \quad (7)$$

o que implica uma redução da densidade de energia ao longo do eixo. Consequentemente, a temperatura decai com o afastamento do foco, sendo aproximada por

$$T(z) = T_{amb} + (T_f - T_{amb}) \frac{r_0}{r_0 + z \tan \theta} \quad (8)$$

onde T_{amb} é a temperatura ambiente e T_f a temperatura no foco. A expressão para $T(z)$ foi adotada como uma aproximação fenomenológica que incorpora a expansão geométrica do feixe e as perdas térmicas efetivas, garantindo comportamento físico consistente nos limites do sistema. Ou seja, no foco ($z=0$): $r(z)=r_0 \Rightarrow T(z)=T_f$; e longe do foco ($z \rightarrow \infty$): $T(z) \Rightarrow T_{amb}$. Além disso, as seguintes considerações foram feitas: a potência total P se conserva (aproximação), a área do feixe cresce, $A(z) \propto r(z)^2$, logo, a densidade de potência decai: $q''(z) \propto [1/A(z)] \propto [1/r(z)^2]$

Finalmente, a modelagem desenvolvida estabelece uma descrição coerente do funcionamento do sistema, conectando a geometria da superfície parabólica à concentração e posterior dispersão da energia térmica. A partir das relações obtidas, torna-se possível compreender como a expansão do feixe após o foco implica na redução da densidade de potência e, consequentemente, da temperatura ao longo do eixo óptico. Essas expressões fornecem, portanto, uma base teórica para a interpretação do comportamento térmico do projeto do fogão solar, sendo exploradas na seção seguinte por meio de análise numérica e comparação com os resultados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas relações analíticas obtidas, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de visualizar o comportamento das grandezas físicas ao longo do eixo óptico. Em particular, analisamos a expansão do feixe, o crescimento da área iluminada e o decaimento da temperatura e da densidade de potência com a distância ao foco. Os resultados são

apresentados nas Figuras 8–11 permitem uma interpretação direta das relações descritas pelas Equações (6), (7) e (8).

A Figura 8 a seguir mostra a variação do raio do feixe em função da distância z , conforme descrito pela Eq. (6).

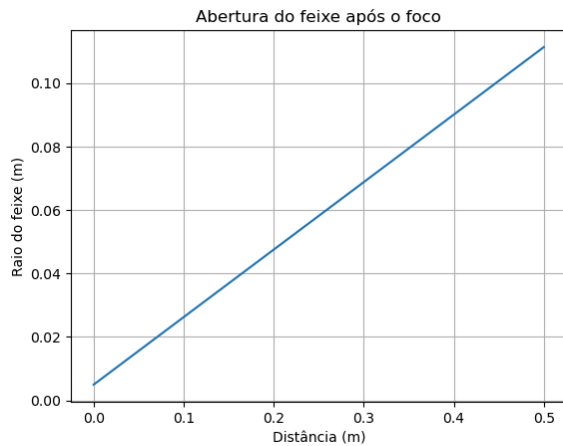


Figura 8. Variação do raio do feixe luminoso em função da distância ao longo do eixo óptico após o ponto focal, conforme o modelo geométrico dado pela Eq. (6).

Da Fig. 8 observamos um crescimento linear do raio, caracterizando a divergência do feixe após o foco. Esse comportamento confirma a validade da aproximação geométrica do cone invertido, indicando que pequenas variações em z resultam em aumento significativo da região iluminada.

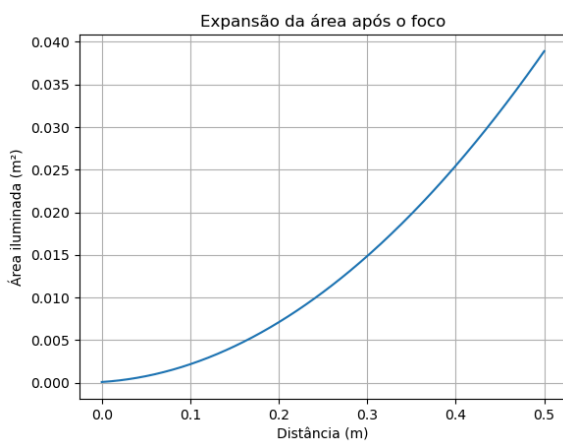


Figura 9. Expansão da área iluminada em função da distância ao foco, descrita pela Eq. (7), ilustrada na Fig. 7.

Como esperado, na Fig. 9, a área cresce de forma não linear (quadrática), evidenciando que a energia inicialmente concentrada no foco passa a se distribuir rapidamente em regiões cada vez maiores. Esse

resultado é fundamental, pois nos mostra como a redução da intensidade térmica ao longo do eixo.

Para a distribuição de temperatura ao longo do eixo óptico, encontramos o seguinte comportamento, modelado pela Eq. (8).

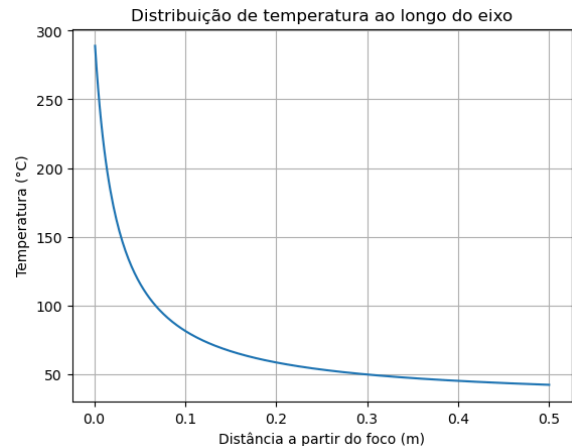


Figura 9. Distribuição de temperatura ao longo do eixo óptico após o foco, modelada por $T(z)$ (Eq. (8)). Observa-se um decaimento acentuado da temperatura com o aumento da distância, tendendo à temperatura ambiente.

Ao analisar a Fig. 9, observamos um decaimento acentuado da temperatura logo após o foco, seguido de uma aproximação assintótica à temperatura ambiente. Esse comportamento reflete a perda de concentração energética associada à expansão do feixe, sendo consistente com os limites físicos do sistema considerado previamente.

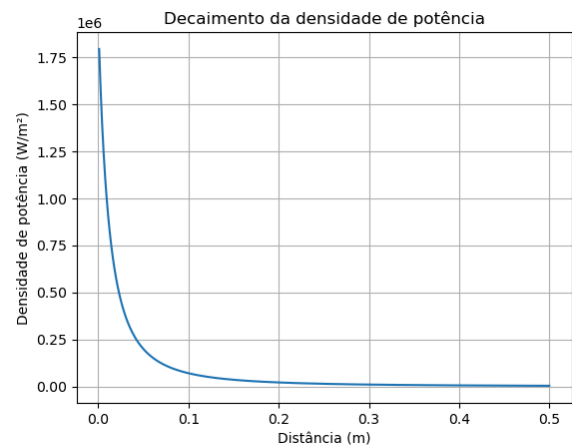
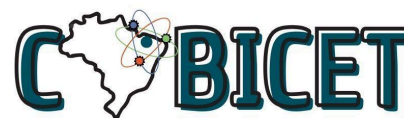


Figura 10. Decaimento da densidade de potência ao longo do eixo óptico, calculada a partir de $q''(z)$.

Por fim, a Figura 10 mostra o decaimento da densidade de potência ao longo do eixo, calculada a partir da Eq. (5), onde a densidade de potência é dada em unidades 10^6 W/m^2 . Nota-se da Fig. 10 que q'' apresenta uma queda abrupta nas proximidades do foco, consequência direta do crescimento da área



iluminada. Esse resultado reforça a importância do posicionamento preciso do recipiente na região focal, onde a densidade de energia é máxima.

Dessa forma, em conjunto, os resultados evidenciam que a expansão geométrica do feixe é o principal mecanismo responsável pela redução da intensidade térmica fora do foco. Assim, a eficiência do sistema está diretamente associada à capacidade de manter o recipiente o mais próximo possível da região de máxima concentração energética, como mostrado.

3. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a viabilidade técnica e energética de um projeto de fogão solar parabólico de baixo custo, construído a partir de materiais reaproveitados, como antenas parabólicas descartadas. A análise experimental evidenciou a capacidade do sistema em atingir temperaturas elevadas, próximas a 300 °C, confirmando seu potencial para aplicações práticas no preparo de alimentos, ainda que com tempos superiores aos de métodos convencionais.

A modelagem teórica desenvolvida permitiu compreender, de forma integrada, os principais mecanismos físicos envolvidos no funcionamento do sistema. A partir da geometria parabólica, foi possível determinar a posição do foco e estimar a potência térmica disponível, bem como a elevada densidade de energia concentrada nesta região. Adicionalmente, o modelo de espalhamento do feixe após o foco, descrito como um cone invertido, mostrou-se adequado para explicar a rápida redução da intensidade térmica ao longo do eixo óptico.

Os resultados numéricos corroboraram as previsões teóricas, evidenciando que o aumento da área iluminada implica uma queda acentuada da densidade de potência e da temperatura, reforçando a necessidade de posicionamento preciso do recipiente na região focal para maximizar a eficiência do sistema. Dessa forma, a combinação entre experimentação, modelagem analítica e simulação numérica proporcionou uma compreensão consistente do desempenho do fogão solar.

Do ponto de vista social, o protótipo desenvolvido representa uma alternativa complementar de preparo de alimentos que pode contribuir para a redução do consumo de lenha e de gás de cozinha, especialmente em regiões de alta incidência solar e em contextos de vulnerabilidade socioeconômica. Ainda que não substitua integralmente métodos convencionais, seu uso pode reduzir custos energéticos domésticos e mitigar impactos ambientais associados ao uso de combustíveis tradicionais. Nesse sentido, a proposta se insere como uma solução acessível e replicável, com potencial de aplicação em comunidades de baixa

renda, fortalecendo práticas sustentáveis e ampliando o acesso a tecnologias energéticas alternativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEEP do Chocolate Nelson Schaun e a CAPES.

REFERÊNCIAS

Abed, T. M. O. K.; et al. *Recent advances in solar cooker technologies: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 121, 109–119, 2020.

Al-Soud, M. S.; Abdallah, E.; Akayleh, A.; Abdallah, S.; Hrayshat, E. S. *A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system*. Applied Energy, 87, 463–470, 2010.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Balanço Energético Nacional 2022*. EPE, Rio de Janeiro, 2022.

Food and Agriculture Organization (FAO). *The State of Food and Agriculture*. FAO, Rome, 2017.

Governo do Estado da Bahia. *Relatório sobre Segurança Alimentar na Bahia*. Governo da Bahia, Salvador, 2023.

Harmim, R.; Boukar, M.; Amar, M.; Haida, A. *Experimental study of a solar parabolic cooker*. Energy Conversion and Management, 52, 227–232, 2012.

Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, London, 2014.

Kumar, A.; Yadav, A.; Dev Roy, S. *Performance analysis of a parabolic solar cooker using dish antenna*. Renewable Energy, 139, 873–881, 2019.

Mullick, S. C.; Kandpal, T. C.; Saxena, A. K. *Thermal test procedure for solar cookers*. Solar Energy, 80, 375–385, 2006.

Nahar, N. M. *Performance and testing of hot box solar cookers*. Energy Conversion and Management, 44, 1323–1331, 2003.

Petela, R. *Exergy analysis of solar thermal systems*. Solar Energy, 79, 221–233, 2005.

Said, N. A. M.; El-Sebaei, A. A.; Al-Snani, H. *Design, construction and performance evaluation of*



a solar cooker. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17, 33–41, 2017.

Saxena, A.; Varun; Pandey, S. P.; Srivastav, G. *A thermodynamic review on solar box type cookers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 3301–3318, 2011.

Sharma, A.; Tyagi, V. V.; Chen, C. R.; Buddhi, D. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 318–345, 2009.

World Health Organization (WHO). *Household air pollution and health*. WHO, Geneva, 2018.