

INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS DE BAIXA TEMPERATURA: UMA DÉCADA DE CASOS DE ESTUDO PARA UM FUTURO PROMISSOR

Domingos G.A., Rosa P.A.R., Rosa L.G.

IDMEC, Dep. Eng. Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, goncalo.almeida.domingos@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia renovável capaz de produzir calor, promover reações químicas ou gerar eletricidade. As suas vantagens relativamente a outras fontes de energia têm favorecido o crescimento do número de aplicações industriais, sendo atualmente uma das principais fontes de energias renováveis e com grande potencial de crescimento. Neste trabalho é realizada uma revisão de vários casos de estudo da aplicação da energia solar térmica em processos industriais de baixa temperatura (80-150°C), com o objetivo de dar foco aos benefícios da sua aplicação de forma direta ou sinérgica com tecnologias complementares no campo industrial. O trabalho permite identificar as potenciais aplicações da energia solar térmica no setor industrial: - quais dos processos industriais estão mais bem-adaptados à sua integração; - as vantagens e desvantagens da sua aplicação; - e que tipos de coletores solares são usados nesta gama de temperaturas. Finalmente, a análise permite identificar alguns desafios enfrentados na implementação das tecnologias de solar térmico, e que limitam a sua utilização mais generalizada no setor industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Térmica de Baixa Temperatura, Calor Solar, Indústria Alimentar, Indústria Têxtil, Indústria Automóvel, Indústria Química, Indústria Mineira

ABSTRACT

Solar energy is a renewable energy source capable of producing heat, promoting chemical reactions, or generating electricity. Its advantages over other energy sources have favoured the growth in the number of industrial applications, being currently one of the main sources of renewable energy and with great growth potential. In this work, a review of several case studies of the application of solar thermal energy in low temperature industrial processes (80-150°C) is carried out, in order to focus on the benefits of its application directly or synergistically with complementary technologies in the industrial field. The work makes it possible to identify the potential applications of solar thermal energy in the industrial sector: - which of the industrial processes are best adapted to its integration; - the advantages and disadvantages of its application; - and what types of solar collectors are used in this temperature range. Finally, the analysis makes it possible to identify some challenges faced in the implementation of solar thermal technologies, which limit their more widespread use in the industrial sector.

KEYWORDS: Low Temperature Solar Thermal Energy, Solar Heat, Food Industry, Textile Industry, Automotive Industry, Chemical Industry, Mining Industry

INTRODUÇÃO

De acordo com os últimos dados da Agência Internacional de Energia, as necessidades de calor abaixo dos 200°C no setor industrial equivalem a cerca de 44% do total (IEA, 2019b), num sector cujo consumo energético é aproximadamente 38% do consumo global (IEA, 2021b). Paradoxalmente, apesar de ser um mercado em expansão, a utilização da energia solar térmica em processos industriais continua a representar menos de 0,02% do consumo global de calor no setor (IEA 2019a). Tendo em vista esta assineria, o objetivo é reunir e apresentar um conjunto de casos de estudo atuais da aplicação da energia solar térmica em processos industriais, que tipo de coletores são usados, em que indústria se inserem e algumas vantagens e desvantagens da sua utilização. Pretendemos com isto realçar o potencial da energia térmica solar na indústria e na transição energética, e a especial importância que tem tendo em conta não só os requisitos exigentes da indústria em termos energéticos, com tendência a aumentar, mas também por causa dos benefícios da energia solar quando aplicada de forma direta.

ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA: VISÃO GLOBAL

As necessidades de calor no setor industrial foram já previamente identificadas, donde destacamos os trabalhos de Kalogirou (2003), Vannoni *et al.* (2008), Lauterbach *et al.* (2011), Vajen *et al.* (2012) e Igogo *et al.* (2020): de forma sistemática, são apontadas várias indústrias que, pelas necessidades térmicas dos seus processos, podem beneficiar da introdução da energia solar térmica de baixa temperatura. É o caso da indústria alimentar, onde os requisitos térmicos de processos como a secagem, a cozedura, a limpeza, a evaporação, a destilação, a esterilização ou a pasteurização serem maioritariamente abaixo dos 160°C; da indústria automóvel, numa gama abaixo de 100°C, para processos de preparação de superfícies, de limpeza ou de revestimento, como a cromagem, fosfatização e eletrodeposição; da indústria química, em particular do setor farmacêutico, onde não só a limpeza e a esterilização são processos chave, mas as temperaturas necessárias para muitas das reações bioquímicas são também < 200°C; da indústria mineira e de extração, em processos de aquecimento para HVAC ou na extração eletrolítica; da indústria têxtil, onde o tingimento, o branqueamento, a lavagem e a secagem ocorrem abaixo dos 150°C. Focando-nos dentro destas indústrias, procurámos identificar alguns casos de estudo recentes da aplicação da energia solar térmica, que se apresentam na Fig. 1 conforme a sua localização geográfica.

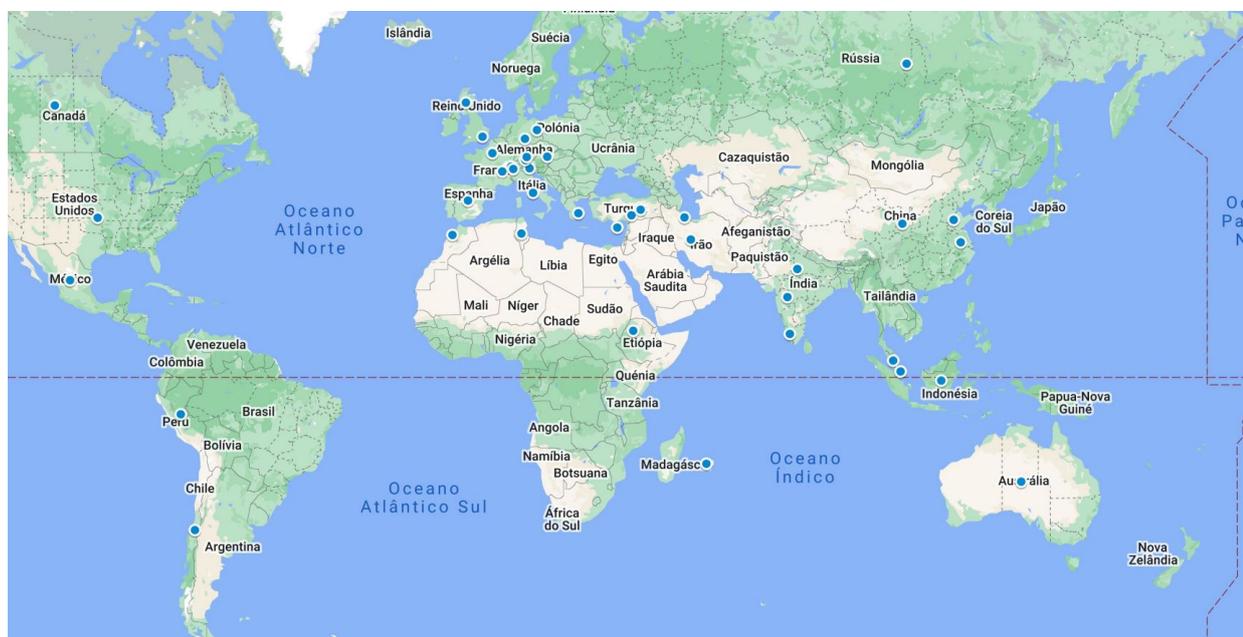


Fig. 1. Distribuição geográfica dos casos de estudo analisados

INDÚSTRIA ALIMENTAR

Dentro da indústria alimentar, o caso particular dos laticínios parece estar particularmente bem alinhado com a aplicação de sistemas de energia solar térmica em diferentes pontos dos processos inerentes ao processamento do leite nos seus derivados. Na Suíça, por exemplo, Wallerand *et al.* (2018), apresentam um caso de estudo de diferentes sistemas de aproveitamento solar, PV, ST com FPC e um híbrido de termal e fotovoltaico concentrado (HCPVT), com benefício maior para a solução híbrida com bomba de calor e recuperação de calor. Martínez-Rodríguez *et al.*

(2022), no México, apontam a uma integração compreensiva da energia solar térmica de forma a atingir zero emissões de CO₂. Em Marrocos, Allouhi *et al.* (2017), referem a aplicação de um sistema de ETC para fornecer uma linha de pasteurização, com temperaturas dos processos associados entre os 5°C e os 90°C, analisando a influência de fatores como a inclinação dos painéis, a área de coleção e o volume dos tanques de armazenamento na redução dos custos associados ao ciclo de vida da linha de produção. Na ilha da Reunião, Maillot *et al.* (2019) consideraram quatro cenários de integração da energia solar térmica no processo de produção de iogurte da empresa Sorélaít-Danone, inicialmente alimentado por uma caldeira a combustível. Em três cenários diferentes, em França, Marrocos e Chipre (Mkadmi e Wahed, 2016), a utilização de coletores FPC e ETC foi analisada como fonte de calor indireta de uma linha de limpeza, aquecimento e pasteurização, com vantagem dos coletores ETC na redução das emissões.

Tabela 1: Lacticínios

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Wallerand <i>et al.</i> 2017)	Suíça	<98	FPC, PV e HCPVT, com HP	Redução CO ₂ até 75%, quando combinado com recuperação calor e HP; Redução maior se produção apenas diurna; FPC solução de baixo custo, redução de 30% emissões CO ₂
(Martínez-Rodríguez <i>et al.</i> 2022)	México	<100	FPC	Redução CO ₂ de 100%; Custo competitivo 0,047 EUR/kWh vs. 0,048 EUR/kWh gás natural;
(Allouhi <i>et al.</i> 2017)	Casablanca, Marrocos	<90	ETC	Redução de 77,23 toneladas de CO ₂ emitido e custos do ciclo de vida de 168 kEUR; SSF de 41% e ROI de 12,27 anos;
(Maillot <i>et al.</i> 2019)	Ilha da Reunião	<100	ETC	Redução de até 24% no combustível usado;
(Mkadmi e Wahed, 2016)	França Marrocos e Chipre	< 120	FPC, ETC	ST fornece 89, 76 e 94 % das necessidades térmicas indústria nas regiões Chipre, França e Marrocos, reduções > de 65 ton/ano CO ₂

A secagem de alimentos é também um exemplo do quão bem-adaptado o processo está à utilização de energia solar, e quão versátil é a sua aplicação às mais variadas culturas. São vários os casos de estudo: por exemplo, na Índia, o caso da secagem da polpa de manga (Shrivastava *et al.*, 2022) e a cozedura e desidratação do gengibre (Nukulwar e Tungikar, 2021), e na Turquia, a maçã (Daş e Akpınar, 2020). A introdução de armazenamento térmico na secagem como complemento à energia solar térmica é uma das vias de baixo custo para melhorar o processo e de prolongar o processo para além das horas de maior intensidade solar: na Índia: o caso da banana (Arun *et al.* 2019) e no Irão, o alperce e as ameixas (Baniasadi *et al.* 2017).

Tabela 2: Secagem de alimentos

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Shrivastava <i>et al.</i> 2022)	Gwalior, Índia	< 43	Estufa + ETC	Estufa + ETC reduz tempo de secagem vs. secagem em estufa ou sob o sol (18h vs 22h e 25h, respetivamente); Maior taxa de remoção de humidade com ETC, poupança anual de 50% vs. estufa sem ETC; ROI de 0,25 anos;
(Daş e Akpınar, 2020)	Turquia	< 62	Estufa + SAC	Eficiência térmica aumenta de 51,7% para 75,7% no SAC com seguimento solar de 2 eixos;
(Nukulwar e Tungikar, 2021)	Índia	< 100	Scheffler	Eficiência cozedura do gengibre de 19,93% , capacidade para 100kg/dia; Eficiência do secador: 1,62% e 49,76%, com e sem vapor; Redução tempo secagem de 63,88% e 52,77% com e sem vapor, vs. secagem a céu aberto
(Arun <i>et al.</i> 2019)	Kerala, Índia	< 51	SCD + parafina	SCD permite secar 5 vezes mais quantidade de banana do que secagem ao ar livre;
(Baniasadi <i>et al.</i> 2017)	Isfahan, Irão		SAC+SCD +parafina	Utilização da parafina diminui o tempo de secagem em cerca de 50%;

São vários os casos de estudo noutros sectores da indústria alimentar. O caso das fábricas de cerveja, por exemplo na Escócia (Eiholzer et al. 2017) e na Alemanha (Lauterbach, 2014; Müller et al. 2014); de processamento de salsichas na Áustria (Pietruschka et al. 2016; Cotrado et al. 2014), de processamento de aves na Malásia (Fluch et al. 2019), de carne de porco e dos seus derivados na Europa (Garcia et al. 2019) e a indústria da massa, em Itália (Bolognese et al. 2020).

Tabela 3: Indústrias cervejeira, da carne e da massa

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Eiholzer <u>et al.</u> 2017)	Escócia	< 97	FPC, ETC	Redução consumo combustível em 206MWh/ano, 38 ton/ano CO ₂ ; Processos até 60°C, sistema com ST responde a 40% necessidades calor; ROI entre 6,4 e 6,8 anos; Limitação à capacidade instalada pelo programa de incentivo limita SSF a 7.7%. Sem limite, duplica.
(Lauterbach, 2014)	Alemanha	< 90	FPC	Grande esforço de integração e operação sistema ST num processo industrial pré-existente; Falhas de projeto ou dimensionamento podem ter um impacto considerável no desempenho do sistema: interferência manual de operadores por exemplo. Necessidade de monitorização e deteção de problemas; Parâmetros com mais influência na eficiência do processo são a eficiência dos coletores e o perfil de aquecimento dos tanques de água;
(Müller <u>et al.</u> 2014)	Leuterschach, Alemanha	< 100	---	ST com potencial de fornecer 30,7% das necessidades térmicas na indústria.
(Pietruschka <u>et al.</u> 2016; Cotrado <u>et al.</u> 2014)	Sieghartskirchen, Áustria	< 98	FPC	Eficiência dos coletores entre 25 e 43%; Cerca de 26,9% de combustível poupado por ano, 507 kEUR poupança;
(Fluch <u>et al.</u> 2019)	Johor, Malásia	< 91	ETC	SSF de 80% permite reduzir 260 ton/ano CO ₂
(Garcia <u>et al.</u> 2019)	Atenas, Berlim, Londres, Madrid, Paris e Roma	< 100	ETC	<i>Indústrias com caldeira elétrica:</i> ST economicamente vantajoso em todos os locais, SSF entre 14 e 53% e redução custos entre 10 e 41%; <i>Indústrias com caldeira gás:</i> baixo custo do gás torna o ST economicamente não rentável; <i>Indústrias com caldeira a gasóleo:</i> em locais com maior irradiação solar, ST vantajoso, com ROI entre 10 e 14 anos. Locais menos vantajosos, alteração do horário produção e com um aumento preço combustível pode tornar o ST viável
(Bolognese <u>et al.</u> 2020)	Predazzo, Itália	< 135	CPC, LFR, PTC	PTC mais eficiente na gama de temperaturas entre os 110 e os 180°C; SSF de 23%, redução de 99 ton/ano CO ₂

INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Dentro das linhas de produção automóvel, a zona de pintura e revestimento é a que contribui mais (cerca de 32%) para o consumo energético global (Giamperi et al. 2020). Alinhados com esse impacto energético, existem vários casos de estudo de aplicação da energia solar térmica em processos decorrentes da pintura. A mais baixas

temperaturas, por exemplo, na Malásia, para processos de eletrodeposição e fosfatização, vários cenários de integração da energia solar foram estudados por Arshad *et al.* (2021).

Tabela 4: Indústria automóvel

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Arshad <i>et al.</i> 2021)	Malásia	< 50	HP; HP + ST; HP + PV	Soluções propostas mais eficientes que sistema com caldeira original; Economicamente, PV mais bem-adaptado, maior eficiência com sistema HP + ST

INDÚSTRIA QUÍMICA

A indústria química é o maior consumidor de energia do setor industrial, movido sobretudo pela produção de químicos como o etileno, o propileno, o benzeno, a amónia e o metanol (IEA, 2021a). Devido aos processos envolvidos nas suas produções ocorrerem a altas temperaturas, o potencial do solar térmico limita-se aos sistemas concentradores. No entanto, no sector farmacêutico existe necessidade de temperaturas baixas. Na Suíça, dois casos do benefício de uma integração simples do solar térmico em linhas de secagem de reagentes pré-existentes foram analisados por Guillaume *et al.* (2019). Nos EUA, Agee *et al.* (2016) apresentaram uma utilização particularmente interessante: a síntese de ibuprofeno completamente movida por energia solar térmica.

Tabela 5: Indústria química

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Guillaume <i>et al.</i> 2019)	Bulle e St. Prex, Suíça	<100	FPC, ETC	Bulle: SSF média 38% permite redução de 154t/ano CO ₂ ; St. Prex: SSF média 28% redução de 95t/ano CO ₂ ; Custo por MWh dobro do preço do gás, embora fixo durante ciclo de vida (20 anos)
(Agee <i>et al.</i> 2016)	EUA	< 65	Coletor paraboloide	Eficiências nas reações comparáveis à síntese convencional em laboratório

INDÚSTRIA MINEIRA

A indústria mineira, dos maiores consumidores energéticos no setor industrial, com cerca de 38% do consumo global (Igogo *et al.* 2020), requer grandes quantidades de calor dentro das atividades de extração, com necessidades de temperaturas desde abaixo dos 150°C até aos 1200°C. Na gama de baixa temperatura, por exemplo, no Irão (Jannesari e Babaei, 2018), a energia solar térmica parece estar bem-adaptada ao processo de extração eletrolítica do cobre, devido às baixas temperaturas necessárias. No Chile, onde a exploração mineira do cobre é o maior consumidor energético, Quiñones *et al.* (2020) analisaram a implementação da energia solar térmica através de vários tipos de coletores no mesmo processo de extração do cobre, para várias regiões do país, sendo atrativo do ponto de vista económico, técnico e ambiental. A extração do chumbo, analisado por Farjana *et al.* (2020) em sete países diferentes, aponta para o benefício na redução dos impactos da indústria de extração de chumbo, nomeadamente ao nível do aquecimento global, da toxicidade para o meio ambiente e da escassez de combustíveis fósseis.

Tabela 6: Indústria mineira

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Jannesari e Babaei, 2018)	Sarcheshmeh, Irão	< 55	ETC	Até 78% energia fornecida por ST, redução 970 ton/ano CO ₂ ;
(Farjana <i>et al.</i> 2020)	Austrália, Canadá, Indonésia, China, Perú, Rússia e EUA	< 80	ETC, FPC	SSF > 90% em todos os países exceto no caso da Rússia, China e Canadá, redução emissões de até 32%;
(Quiñones <i>et al.</i> 2020)	Chile	< 60	ETC, FPC e PTC	FPC é a opção mais barata; Redução emissões CO ₂ de até 14808 ton; SSF até 30%.

INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil é um sector com um consumo energético intensivo. Na China, o maior produtor e exportador têxtil do mundo, o consumo agregado da indústria têxtil, das fibras sintéticas e de produção de vestuário atingiu os 4,1% do consumo total nacional em 2011 (Peng *et al.* 2015). Num setor onde a parcela energética relativa a aquecimento ou geração de vapor pode atingir os 48% (Hasanbeigi e Price, 2012), o potencial da energia solar térmica é alto. Em Bahir Dar, na Etiópia (Tilahun *et al.* 2019), dois tipos de controlo do processo industrial integrado com solar térmico foram estudados: um controlo simples (CMI) que ativa a circulação do fluido proveniente do coletor solar para o permutador de calor, e um controlo modulado do caudal (CMII), de forma a manter uma temperatura constante no permutador. Na Alemanha, uma instalação piloto de 70 kW_{th} com reduções significativas na energia consumida (Frey *et al.* 2015). Em Kahramanmaraş, na Turquia (Çiftçioğlu *et al.* 2017), onde a indústria têxtil tem um dos maiores requisitos energéticos para aquecimento dos processos, a aplicação de coletores FPC eficientes e grandes áreas de coleção apontam para reduções significativas no consumo de gás natural. Paralelamente à Turquia, na Índia (Sharma *et al.* 2017), onde a indústria têxtil representa 14% da produção industrial, o impacto da introdução de sistemas de solar térmico com e sem armazenamento térmico mais uma vez aponta para o grande potencial da tecnologia na redução do impacto da indústria nas emissões de gases com efeito de estufa. Na China (Jia *et al.* 2018), dois exemplos de sucesso de integração, nas regiões de Shandong e Jiangsu. Na Tunísia (Calderoni *et al.* 2012), onde a implementação da energia solar térmica é estudada tendo em conta a política energética do país.

Tabela 7: Indústria têxtil

Ref.	Local	T (°C)	Sistema implementado	Resultados principais
(Tilahun <i>et al.</i> 2019)	Bahir Dar, Etiópia	< 90	ETC	CMI: Fração solar de 56,28% com redução de 252,2 ton CO ₂ e um ROI de 5,7 anos; CMII: redução de 5,6% no ROI e 0,98 ton CO ₂ vs. CMI;
(Frey <i>et al.</i> 2015)	Alemanha	< 60	PTC	Poupança de energia de 81% vs. sistema caldeira a gás
(Çiftçioğlu <i>et al.</i> 2017)	Kahramanmaraş, Turquia	< 110	FPC, ETC	ST pode substituir 9,3% consumo anual gás natural, com ROI de 5,15 anos
(Sharma <i>et al.</i> 2017)	Índia	< 130	FPC, ETC	SSF: 22 a 32% sem armazenamento térmico; com armazenamento, 20 a 60%; Redução de até 7648 ton de gases com efeito de estufa, dependendo da localização e armazenamento térmico;
(Jia <i>et al.</i> 2018)	China	< 60	ETC	Shandong, SSF = 60%, redução de 2826 ton CO ₂ Jiangsu, SSF = 60%, redução 3100ton CO ₂
(Calderoni <i>et al.</i> 2012)	Tunísia	< 98	FPC, ETC	ST não é atrativo por força da subsídio pública aos combustíveis fósseis, com ROI > 20 anos

CONCLUSÕES

A literatura da especialidade mostra existir um conjunto significativo de aplicações industriais recentes, globalmente responsáveis por um grande consumo energético, onde a energia solar térmica permitiu reduzir a dependência energética dos combustíveis fósseis. As vantagens em termos de custos de produção e redução de emissões são evidentes, nomeadamente através de soluções híbridas entre a energia solar térmica e fontes energéticas convencionais. A distribuição geográfica das aplicações industriais aponta ainda para o quão bem-adaptada a energia solar térmica está a diferentes regimes de irradiância solar, quando usada de forma isolada ou como complemento a fontes energéticas convencionais. Ainda assim, embora as vantagens da sua aplicação sejam evidentes, e os casos de estudo indiquem de forma geral o sucesso numa transição para sistemas industriais mais verdes, resta perceber a causa da inércia em tal transição. A análise realizada permite identificar alguns exemplos que podem ser uma explicação para a pouca utilização das tecnologias de solar térmico, nomeadamente, razões como as dificuldades técnicas de integração em processos pré-existentes, e que levam a um esforço considerável de implementação, ou dificuldades de operação e de manutenção quando o processo não está bem dimensionado ou quando a interferência humana suplanta o controlo otimizado dos sistemas híbridos. Mas também ao nível político, a subsídio pública de combustíveis fósseis, em perfeita desarmonia com os desafios lançados à nossa civilização e o esforço comum de todos nós em cumprir com as metas traçadas para a transição energética, bem como a falta de programas de incentivo

robustos para pôr em marcha uma transição energética célere, compromete seriamente a vontade da comunidade e da indústria em avançar para um futuro mais verde e mais independente energeticamente.

NOMENCLATURA

FPC – Flat plate collector; ETC – Evacuated tube collector; ST – Solar thermal; HP – Heat pump; PV – Photovoltaic; PTC – Parabolic through collector; SAC – Solar air collector; SCD – Solar cabinet dryer; LFR – Linear Fresnel reflector; CPC – Compound parabolic collector; ROI – Return of investment; SSF – Solar savings fraction; HVAC – Heating, ventilation and air conditioning; HCPVT – High concentration photovoltaic and thermal system.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, através do IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica (Pólo IST) e LAETA (projeto UIDB/50022/2020).

REFERÊNCIAS

- Agee B. M., Mullins G. and Swartling D. J. (2016). Progress towards a more sustainable synthetic pathway to ibuprofen through the use of solar heating. *Sustainable Chemical Processes* 4, 1-9.
- Allouhi A., Agrouaz Y., Amine M. B., Buker M. S., Kouskou T., Jamil A. and Benbassou A. (2017). Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process. *Applied Energy* 216, 1-11.
- Arshad K. M. A. K., Ho W. S., Asli U. A., Muis Z. A. and Haslenda H. (2021). Solar Assisted Heat Pump Application in the Automotive Manufacturing Industry. *Chemical Engineering Transactions* 89, 1-6.
- Arun K. R., Srinivas M., Saleel C. A. and Jayaraj S. (2019). Active drying of unripened bananas (Musa Nendra) in a multi-tray mixed-mode solar cabinet dryer with backup energy storage. *Solar Energy* 188, 1-11.
- Baniasadi E., Ranjbar S. and Boostanipour O. (2017). Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. *Renewable Energy* 112, 1-20.
- Bolognese M., Viesi D., Bartali R. and Crema L. (2020). Modeling study for low-carbon industrial processes integrating solar thermal technologies. A case study in the Italian Alps: The Felicetti Pasta Factory. *Solar Energy* 208, 548-558.
- Calderoni M., Aprile M., Moretta S., Aidonis A. and Motta M. (2012). Solar thermal plants for industrial process heat in Tunisia: Economic feasibility analysis and ideas for a new policy. *Energia Procedia* 30, 1390 – 1400.
- Çiftçiöğlü G. A., Kadirgan M. A. N. and Kadirgan F. (2017). High Efficiency Solar Thermal Collectors Utilization in Process Heat: A Case Study of Textile Finishing Industry. *International Journal of Energy and Power Engineering* 11, 350-353.
- Cotrado M., Dalibard A., Söll R. and Pietruschka D. (2014). Design, Control and First Monitoring Data of a Large Scale Solar Plant at the Meat Factory Berger, Austria. *Energia Procedia* 48, 1144 – 1151.
- Daş M. and Akpınar E. K. (2020). Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test. *Case Studies in Thermal Engineering* 21, 1 – 15.
- Eiholzer T., Olsen D., Hoffmann S., Sturm B. and Wellig B. (2017). Integration of a solar thermal system in a medium-sized brewery using pinch analysis: Methodology and case study. *Applied Thermal Engineering* 113, 1558 – 1568.
- Farjana S. H., Mahmud M. A. P. and Huda N. (2020). Solar process heat integration in lead mining process. *Case Studies in Thermal Engineering* 22, 1 – 19.
- Fluch J., Gruber-Glatzl W., Brunner C., Shrestha S. and Sayer M. (2019). Solar Heat for Industrial Processes and Industrial Energy Efficiency in Malaysia and Egypt. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 4 – 7 Nov, Santiago, Chile.
- Frey P., Fischer S., Drück H. and Jakob K. (2015). Monitoring Results of a Solar Process Heat System Installed at a Textile Company in Southern Germany. *Energia Procedia* 70, 615 – 620.
- García J. L., Porrás-Prieto C. J., Benavente R. M., Gómez-Villarino M. T. and Mazarrón F. R. (2019). Profitability of a solar water heating system with evacuated tube collector in the meat industry. *Renewable Energy* 131, 966 – 976.
- Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., Smallbone A. and Roskilly A. P. (2020). A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy* 261, 1 – 29.

- Guillaume M., Wagner G., Jobard X., Eicher S. and Citherlet S. (2019). Solar Thermal Systems for the Swiss Pharmaceutical Industry Sector. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 4 – 7 Nov, Santiago, Chile.
- Hasanbeigi A. and Price L. (2012). A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6, 3648 – 3665.
- IEA (2019a). Renewables 2019. IEA, Paris.
- IEA (2019b). World Energy Outlook. IEA, Paris.
- IEA (2021a). Chemicals. IEA, Paris.
- IEA (2021b). Tracking Industry. IEA, Paris.
- Igogo T., Lowder T., Engel-Cox J., Newman A. and Awuah-Offei K. (2020). Integrating Clean Energy in Mining Operations: Opportunities, Challenges, and Enabling Approaches. NREL/TP-6A50-76156.
- Jannesari H. and Babaei B. (2018). Optimization of solar assisted heating system for electro-winning process in the copper complex. *Energy* 158, 957 – 966.
- Jia T., Huang J., Li R., He P. and Day Y. (2018). Status and prospect of solar heat for industrial processes in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, 457 – 489.
- Kalogirou S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy* 76, 4, 337 – 361.
- Lauterbach C., Rad S. J., Schmitt B. and Vajen K. (2011). Feasibility Assessment of Solar Process Heat Applications. *Proceedings of the Solar World Congress*, 28 Ago – 2 Set, Kassel, Alemanha.
- Lauterbach C. (2014). Potential, system analysis and preliminary design of low-temperature solar process heat systems. *PhD thesis*, Kassel University Press.
- Maillot C., Castaing-Lasvignottes J. and Marc O. (2019). Modelling and dynamic simulation of solar heat integration into a manufacturing process in Réunion Island. *Procedia Manufacturing* 35, 118 – 123.
- Martínez-Rodríguez G., Fuentes-Silva A. L., Velázquez-Torres D. and Picón-Núñez M. (2022). Comprehensive solar thermal integration for industrial processes. *Energy* 239, Part D, 1 – 14.
- Mkadmi C. E. and Wahed A. (2016). Optimization of a solar thermal system for low temperature industrial heating process. *Proceedings of the Renewable and Sustainable Energy Conference*, 14 – 17 Nov, Marraquexe, Marrocos.
- Müller H., Brandmayr S. and Zörner W. (2014). Development of an Evaluation Methodology for the Potential of Solar-thermal Energy Use in the Food Industry. *Energy Procedia* 48, 1194 – 1201.
- Nukulwar M. R. and Tungikar V. B. (2021). Drying kinetics and thermal analysis of turmeric blanching and drying using solar thermal system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45, 101120.
- Peng L., Zhang Y., Wang Y., Zeng X., Peng N. and Yu A. (2015). Energy efficiency and influencing factor analysis in the overall Chinese textile industry. *Energy* 93, Part 1, 1222 – 1229.
- Pietruschka D., Hassine I. B., Cotrado M., Fedrizzi R. and Cozzini M. (2016). Large Scale Solar Process Heat Systems -planning, Realization and System Operation. *Energy Procedia* 91, 638 – 649.
- Quiñones G., Felbol C., Valenzuela C., Cardemil J. M. and Escobar R. A. (2020). Analyzing the potential for solar thermal energy utilization in the Chilean copper mining industry. *Solar Energy* 197, 292 – 310.
- Sharma A., Sharma C., Mullick S. C. and Kandpal T. C. (2017). GHG mitigation potential of solar industrial process heating in producing cotton based textiles in India. *Journal of Cleaner Production* 145, 74 – 84.
- Shrivastava A., Gaur M. K. and Singh P. (2022). Mango leather (Aam Papad) drying in hybrid greenhouse solar dryer with evacuated tube collector and finned drying tray: drying behavior and economic analysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1 – 20.
- Tilahun F. B., Bhandari R. and Mamo M. (2019). Design optimization and control approach for a solar-augmented industrial heating. *Energy* 179, 186 – 198.
- Vajen K., Lauterbach C. and Schmitt B. (2012). Solar heat for industrial processes – Potential, technologies and applications. *Proceedings of the International Conference on Solar energy for MENA region*, 22 – 23 Out, Amman, Jordânia.
- Vannoni C., Battisti R. and Drigo S. (2008). *Potential for Solar Heat in Industrial Processes*, pp. 1 – 21. CIEMAT, Madrid.
- Wallerand A. S., Kermani M., Voillat R., Kantor I. and Maréchal F. (2018). Optimal design of solar-assisted industrial processes considering heat pumping: Case study of a dairy. *Renewable Energy* 128, Part B, 565 – 585.