



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v16n12022p138-160

Submetido em: 01 mar. 2021

Aceito em: 26 dez. 2022

Energia termosolar: uma revisão de literatura

Thermosolar energy: a literature review

Energía termosolar: una revisión de la literatura

Fabiano Baldez da Costa Brito  <https://orcid.org/0000-0002-9549-5506>

Instituto Federal Fluminense.

Mestre em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense: Macaé, RJ, BR

E-mail: fabianobcbrito@gmail.com

Marcos Antonio Cruz Moreira  <https://orcid.org/0000-0001-9928-7846>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, RJ, BR

E-mail: mcruzcn@gmail.com

Augusto Eduardo Miranda Pinto  <https://orcid.org/0000-0002-3473-8340>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Direito pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, RJ, BR

E-mail: augustoepinto@gmail.com

Severino Joaquim Correia Neto  <https://orcid.org/0000-0001-8287-1392>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Ciências da Educação pela Universidade Americana - PY

E-mail: profnetoseverino@gmail.com

Eurico Huziwara  <https://orcid.org/0000-0002-9256-2072>

Universidade Estácio de Sá.

Doutor em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: Campos dos Goytacazes, RJ, BR

E-mail: euricohuziwara@gmail.com

Resumo: O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta e sua utilização contribui para o equilíbrio da matriz energética. A energia do calor solar concentrado é um campo de pesquisa em expansão, carecendo de melhorias em todos os sistemas das plantas termosolares para aumento da eficiência. O presente trabalho apresenta uma breve introdução ao assunto e uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados entre 2015 e o primeiro trimestre de 2019, mostrando as principais tendências de pesquisa neste tema, classificadas em: estudos de viabilidade e modelagem matemática; análise de falhas; armazenamento de energia

térmica; revestimentos para coletores solares; riscos ambientais; e, outros usos relevantes. O desenvolvimento de plantas CSP, seja de grande capacidade instalada ou para geração distribuída, além de diversificar as fontes de energia aumentando a confiabilidade do sistema de geração nacional, pode fomentar a geração de emprego e renda no sertão brasileiro, área de grande vulnerabilidade social.

Palavras-chave: Termosolar. Energias Renováveis. CSP.

Abstract: The sun is the main source of energy on our planet and its use contributes to the balance of the energy matrix. Concentrated solar heat energy is an expanding research field, requiring improvements in all systems of termosolar plants to increase efficiency. This paper presents a brief introduction to the subject and a bibliographic review of works published between 2015 and the first quarter of 2019, showing the main research trends in this theme, classified into feasibility studies and mathematical modeling; failure analysis; thermal energy storage; coatings for solar collectors; environmental risks; and other relevant uses. The development of CSP plants, whether with large installed capacity or for distributed generation, in addition to diversifying energy sources, increasing the reliability of the national generation system, can foster the generation of employment and income in the Brazilian hinterland, an area of great social vulnerability.

Keywords: *Thermosolar. Renewable Energy. CSP.*

Resumen: El sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta y su uso contribuye al equilibrio de la matriz energética. La energía térmica solar concentrada es un campo de investigación en expansión, que carece de mejoras en todos los sistemas de plantas termosolares para aumentar la eficiencia. Este artículo presenta una breve introducción al tema y una revisión bibliográfica de los artículos publicados entre 2015 y el primer trimestre de 2019, mostrando las principales tendencias de investigación en este tema, clasificadas como: estudios de factibilidad y modelización matemática; análisis de fallas; almacenamiento de energía térmica; recubrimientos para colectores solares; riesgos ambientales; y otros usos pertinentes. El desarrollo de plantas CSP, ya sean de gran capacidad instalada o para generación distribuida, además de diversificar las fuentes de energía aumentando la confiabilidad del sistema nacional de generación, puede fomentar la generación de empleo e ingresos en el hintercountry brasileño, un área de gran vulnerabilidad social.

Palabras clave: Termosolar. Energías renovables. CSP.

1 Introdução

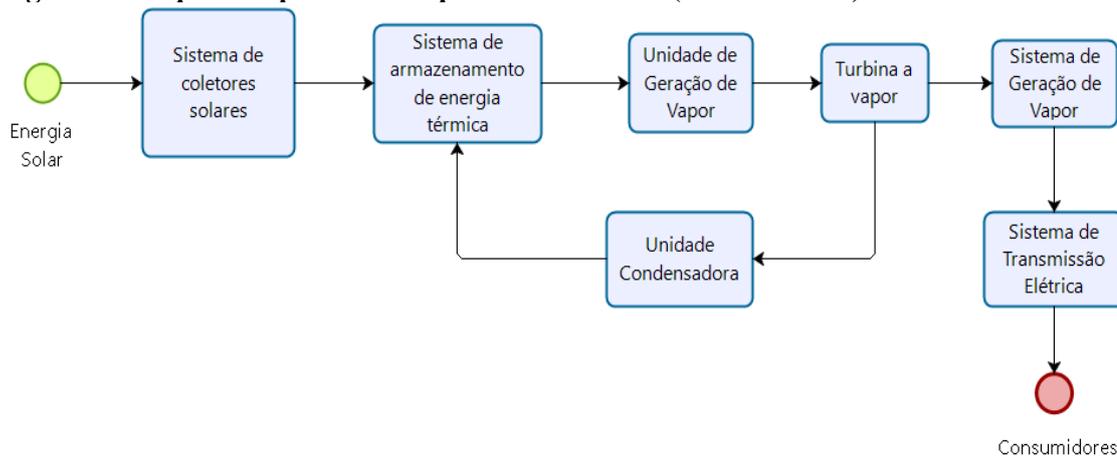
Segundo Bachiller (2009), a radiação solar é a principal fonte de energia da Terra, sendo a maior responsável pelos principais processos bioquímicos e meteoceanográficos, assim como fonte primária da energia armazenada nos combustíveis fósseis. Sua utilização como fonte de energia elétrica é de grande interesse, dada a sua disponibilidade em diferentes intensidades por todo o globo terrestre. No entanto, trata-se de uma fonte primária sazonal para uma dada região geográfica pelo evidente fato que só pode ser aproveitada diretamente durante o dia, o que suscita a necessidade de pesquisas para a máxima utilização.

A Figura 1 apresenta a média anual do total diário da irradiação direta normal sobre a superfície do território brasileiro. Pode-se notar que a região nordeste, notadamente o corredor sertanejo, apresenta o maior potencial para utilização deste tipo de tecnologia.

utilizado de diversas maneiras – a principal é a geração de vapor para movimentação de turbinas conforme o processo Rankine, que é o método mais utilizado nas plantas industriais em operação, sobretudo na Espanha, que, segundo REN21 (2019), é o país com maior capacidade instalada no mundo nesta modalidade. O presente trabalho se concentrará nesta última categoria de aproveitamento da energia termosolar concentrada.

Um esquema típico simplificado de uma planta termosolar baseada em turbina a vapor (ciclo Rankine) é descrito na Figura 2:

Figura 2 – Esquema típico de uma planta termosolar (ciclo Rankine)



Fonte: Autores (2019).

As principais componentes deste diagrama são:

a) Banco de coletores solares (heliostatos), superfícies refletoras de energia solar responsáveis pela transmissão da radiação ao fluido de transferência térmica (FTT). Podem ser do tipo lineares (coletores parabólicos ou tipo Fresnel), com torre concentradora ou em disco parabólico;

b) Sistema de armazenamento de energia térmica (ET), compostos de unidade de armazenamento de ET, normalmente em dois tanques, um para o sal frio e outro para o sal quente, permutadores de calor, material para armazenamento de ET e FTT, notadamente sais fundidos (LI; WU, 2015);

c) Unidade de geração de vapor, onde a água do circuito de geração se transforma em vapor para acionamento da turbina de geração após troca térmica com o FTT;

d) Unidade condensadora, responsável pela condensação mediante resfriamento por troca térmica do vapor arrefecido oriundo da turbina geradora com água, preparando o sistema para um próximo ciclo;

e) Turbina a vapor, força motriz responsável pela geração de energia elétrica propriamente dita;

f) Sistema de geração, transformação e transmissão de energia.

A despeito da grande Irradiação Solar Direta Normal (INSD) disponível em praticamente todo o território brasileiro, conforme ANEEL (2019), o aproveitamento da energia termosolar concentrada é praticamente inexistente. Assim, justifica-se o aprofundamento do estudo desta modalidade de geração de energia renovável no Brasil dado seu alto potencial e utilização praticamente nula. Este artigo tem por objetivo apresentar as pesquisas publicadas de 2015 a 2019 referentes os seguintes aspectos da energia termosolar: estudos de viabilidade, análise de falhas, revestimentos reflexivos, FTT, impactos ambientais, armazenamento e regulamentação comercial, além de um breve comentário sobre aquecimento de água.

2 Material e Método

Foi realizada uma revisão de bibliografia de cunho exploratório utilizando a palavra-chave *thermosolar* na base internacional de indexação *Scopus*.

Como critério de seleção, definiu-se a aceitação de artigos revisados por pares publicados a partir de 2015 que tivessem relação direta com o assunto, não sendo computados para o número total as versões duplicadas registradas em outras bases.

3 Resultados e Discussão

Após a aplicação do critério de seleção, foram destacados 76 artigos, sendo classificados em subcategorias para facilitar o entendimento: Estudos de viabilidade e modelagem matemática, Análise de falhas, FTT e Armazenamento, Revestimento dos coletores solares, Riscos Ambientais, Aquecimento de água e outros usos relevantes, que podem ser utilizados em paralelo com a planta para melhor aproveitamento do calor.

3.1 Estudos de viabilidade e Modelagem Matemática

Dentre as etapas iniciais de um projeto complexo de engenharia como uma usina termosolar estão os estudos de viabilidade, sejam estes referentes às dimensões técnica, econômico-financeira, social, ambiental ou outras. Nesta etapa, são utilizados ferramentas e modelos matemáticos para estudar etapas e sistemas, avaliar impactos da alteração intencional ou não de variáveis durante a operação e otimizar processos sem a necessidade prévia de implementação física do objeto de estudo.

A análise de otimização multiobjetivo e multicritério baseada em modelo analítico termodinâmico para uma planta termosolar multiestágios recuperativa com ciclo Brayton visando subsidiar projetos mais

eficientes é apresentada por Sánchez-Orgaz et al. (2015). Merchán et al. (2017, 2018) apresentaram um modelo termodinâmico considerando os dados reais de instalação de Sevilha, Espanha, incluindo a avaliação anual de performance, consumo de combustível e emissões de gases.

Visando fornecer subsídios à implantação de plantas de energia termosolar na Arábia Saudita, Kassem et al. (2017) conduziram uma análise técnico-econômica multicenário baseada na matriz SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, and threats* – forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) para definição das tecnologias de coleta, receptores termosolares, FTTs e de armazenamento de energia. Estudo com a mesma finalidade foi conduzido por Olmedo-Torre et al. (2018) para Burkina Faso.

Ambientes urbanos requerem pequenas aplicações que utilizem heliostatos menores, que permitam menores distâncias de deslocamento para os raios refletidos e aceitem maior margem de erro em operação. Com este fim, Torres-Roldán et al. (2015) propõem um novo sistema de heliostatos polares, os quais redirecionam os raios solares paralelamente ao eixo da Terra, podendo ainda alcançar um ponto desejado (como uma torre central) por meio de um espelho secundário fixo. Sua arquitetura permite o posicionamento em elevação e azimute através de ação única, podendo um único equipamento controlar diversos heliostatos associados.

A redução do tamanho físico e das possibilidades de falhas também permite a implantação de usinas termosolares mais seguras, confiáveis e de menor porte, o que pode estimular a entrada no mercado por investidores com menor capacidade de investimento. O trabalho de Olsen et al. (2016) apresenta uma nova configuração em desenvolvimento, a Termoeletricidade Solar via Armazenamento Avançado em Calor Latente (*Solar ThermoElectricity via Advanced Latent Heat Storage - STEALS*) que substitui a conversão eletromecânica da ET de alta temperatura gerada a partir do fluxo solar concentrado através de turbinas a vapor por uma que utiliza geradores termoelétricos de estado sólido, que convertem o calor diretamente em eletricidade. A ET é armazenada em um material de mudança de fase, que permite a continuidade da geração até certo grau mesmo mediante à variação da INSD da fonte.

Uma alternativa para a estabilidade da geração mesmo em condições de variação da INSD é a instalação de sistemas híbridos para manter vapor superaquecido. Olivenza-León et al. (2015) fizeram a modelagem termodinâmica para um sistema híbrido com o gás natural. Sahoo et al. (2016) e Durante et al. (2017) propuseram a utilização da biomassa, o primeiro em estudo de viabilidade termodinâmica (energética e exergética) para um ciclo de combustão externa e o segundo um modelo termodinâmica considerando a combustão externa. Bonilla; Roca (2018) e Colmenar-Santos et al. (2015) trataram do biogás em substituição ao armazenamento em sal como fonte primária renovável complementar.

Diversas plantas termosolares têm para sua partida permutadores gás queimado x FTT. Peterseim et al. (2016) defenderam a utilização de sistemas de partida multicomcombustível de forma a reduzir a demanda por gás natural (por exemplo, biomassa) e a utilização de permutadores de maior capacidade, em detrimento de unidades de menor capacidade de troca térmica, de forma a aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir custos.

Também para este fim, Aguilar-Jiménez et al. (2018) propuseram e estudaram a viabilidade técnica e econômica de uma planta híbrida fotovoltaica – termosolar concentrada como fonte de energia para microrredes isoladas. As células fotovoltaicas ficariam responsáveis pela geração durante o dia com o complemento da termosolar concentrada em momentos de baixa ou nula INSD através da recuperação da energia armazenada na forma de calor sensível.

A cogeração a partir de turbinas a gás foi estudada por Dabwan; Mokheimer (2017), visando reduzir a demanda por armazenamento de ET nos períodos de variação da INSD. De forma contrária, Rech et al. (2018) propõem a utilização da energia termosolar como forma de economia de combustível em usina termoeletrica a carvão, reduzindo assim a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Ventas et al. (2017) apresentam o estudo de um processo complexo de duplo efeito, que permite a geração de eletricidade e resfriamento utilizando amônia/ nitrato de lítio. Ele é particularmente útil para sistemas de geração distribuída urbanos podendo contribuir diretamente para o Objetivo 11 da Agenda 2030, onde a planta responsável por este processo supriria parte da eletricidade demandada e, por outro lado, auxiliaria na redução do consumo de energia para condicionamento do ar.

É possível em determinadas situações aumentar a eficiência global de um determinado sistema através do aumento da eficiência de uma parte em particular, a que se justifica a utilização da modelagem matemática. Piña-Ortiz et al. (2019) apresentaram um protótipo de receptor aletado de uma torre termosolar para a planta piloto da Universidade de Sonora, México, com o qual compararam o modelo termodinâmico gerado a partir de software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) com os dados medidos.

No complexo mercado de energia elétrica, a sazonalidade da energia solar pode trazer incertezas, sobretudo no mercado futuro. Além disso, por conta da integração na malha de geração de diversas fontes distintas, a previsão da disponibilidade de energia solar pode ser crucial para a programação de paradas de manutenções ou de entrada de pacotes de geração de forma a mitigar o risco de interrupção do fornecimento de energia aos consumidores. Nesta linha, Fernández-León et al. (2016) apresentaram o STEP4GRID, sistema utilizado na planta termosolar de Solúcar, localizada em Sanlúcar la Mayor, Sevilha, Espanha, como ferramenta para previsão da INSD e da produção bruta.

3.2 Análise de Falhas

Analisar falhas ocorridas no processo permite tratar suas causas e, através da implementação abrangente de ações de correção, mitigar ou mitigar problemas futuros em instalações correlatas.

Materiais para armazenamento de ET, notadamente sais fundidos (sais solares), são vitais para a operação em plantas termosolares convencionais. No entanto, a corrosão é um problema sério devido à reatividade natural do sal e as altas temperaturas a que o sistema está submetido. Prieto et al. (2016) desenvolveram e utilizaram uma nova metodologia, a Análise Gravimétrica Dinâmica, para avaliar a corrosão gerada pelos sais solares, e qual a influência do teor de cloreto neles contidos, em amostras de aço carbono ASTM A516 Gr70, como proposta de substituição ao método usual previsto na norma ASTM G1-03.

Como alternativa de prevenção à corrosão, Audigié et al. (2018) apresentaram alternativas de revestimento com ligas de alumínio e níquel-alumínio aplicadas por eletrodeposição e jateamento em uma liga P91 - 9% Cr em peso e testado com este a 580 °C e em contato com sal solar, mostrando-se ambos mais efetivos que a o não revestimento.

A seleção de materiais adequados às solicitações mecânicas, térmicas e de resistência à corrosão é também um imperativo de projeto para os permutadores de calor entre os materiais de mudança de fase e o vapor. Ruiz-Cabañas et al. (2017), ao avaliar o ASTM A516 Gr70, o aço inoxidável A316L e a liga base níquel Inconel 625. Os dois últimos mostraram boa resistência à corrosão, sendo então o A316L considerado como melhor escolha devido ao critério técnico-econômico.

Um sistema crítico para a usina de energia termosolar “La Asturiana”, localizada no sul da Espanha, é o de coleta, transporte e armazenamento de águas pluviais para o sistema de geração de vapor. Em ordem de estabelecer as causas de patologias identificadas no duto enterrado de concreto para transporte de águas pluviais da instalação, González-Nicieza et al. (2017) apresentaram novas técnicas de ensaios *in situ* para levantamento de dados posteriormente utilizados em modelo matemático para avaliar a relevância das hipóteses levantadas. Foi constatado que houve a penetração de partículas mais finas no enchimento utilizado para a união das seções, fato que *per si* não explica as trincas encontradas. No entanto, houve o acréscimo de carga devido ao aterramento imprevisto de 5m sobre o caminho do duto, que explicava as trincas na geratriz superior e, combinado com o enfraquecimento das juntas devido ao empobrecimento do material do enchimento, explicava também as trincas na geratriz inferior.

Ordiales Martinez et al. (2018) estudaram outra falha ocorrida na planta “La Asturiana” onde, durante o comissionamento para operação de uma instalação de tratamento de efluentes, foi constatada uma situação de recalque diferencial acima dos limites estabelecidos em norma, o que levou a uma parada não

programada da unidade. Após diversas análises de campo e modelagem computacional, foi constatado que os caminhos naturais de drenagem do solo sob a instalação foram bloqueados com a escavação e posterior preenchimento; com as primeiras chuvas, a água ficou retida na área. Durante o preenchimento com concreto, areia e argila formaram uma mistura impermeabilizante na qual a água arrastou os componentes mais finos e nela ficou retida. Durante o carregamento das fundações, houve aumento da pressão do solo e deslocamento da água nele retida, produzindo o recalque mencionado.

3.3 FTT e Armazenamento

O FTT é um componente crítico da usina termosolar. Seu aprimoramento e evolução dos métodos de transferência de ET aumentam a eficiência global da planta. Li; Wu (2015), utilizando simulação numérica, analisaram diversas configurações de permutadores casco e tubos, materiais de mudança de fase, incluindo NaNO_3 puro e um composto NaNO_3 / grafite expandida e os FTT óleo sintético e sais fundidos, demonstrando que permutadores aletados, o FTT composto e sais fundidos aumentam a eficiência do sistema.

Coco-Enríquez et al. (2017a, 2017b) propuseram um ciclo duplo contando com os FTT *Downtherm A* (óleo) e sal solar (60% NaNO_3 e 40% KNO_3) em coletores solares parabólicos ou lineares Fresnel acoplados a um ciclo Brayton supercrítico de CO_2 , que visa aproveitar as vantagens dos dois FTT - o primeiro, menor ação corrosiva sobre as tubulações e disponibilidade de equipamentos; o segundo maior temperatura de operação, chegando a 550°C e mitigar as desvantagens – o primeiro alcança apenas 400°C e o segundo solidifica em apenas 220°C, requerendo aquecimento em tubos e equipamentos para mantê-lo fundido, assim como etano, Xe, CH_4 e N_2 como alternativas ao CO_2 como fluido supercrítico, sendo o último confirmado como único capaz de oferecer aumento de eficiência quando considerado o aumento da pressão de entrada na turbina.

Em ordem de buscar alternativas que atinjam maiores temperaturas de operação, de 600°C a pelo menos 1000°C e, por consequência, maior eficiência nos processos de conversão de energia, Wang et al. (2017), apresentaram uma avaliação experimental de um receptor de quartzo com partículas sólidas da energia térmica solar concentrada.

Um método numérico baseada em uma abordagem euleriana foi desenvolvido por Kristiawan et al. (2018) para estudar a influência de nanopartículas e do número de Reynolds na transferência de calor de um nanofluido baseado em dióxido de titânio e água durante o escoamento em um trecho horizontal, donde foi verificado que o aumento da carga de nanopartículas aumenta a eficiência da transferência de ET, com

destaque para o aumento da eficiência com escoamento turbulento com a carga de 1,28%, caso que diverge dos demais casos, onde o escoamento laminar favorece a transferência de ET.

Considerando que o FTT baseado nanopartículas é mais eficiente que os fluidos tradicionais como corroboram dados experimentais, Visconti et al. (2016) projetaram um sistema de medição e controle de uma planta termosolar de forma a maximizar sua eficiência e economizar energia.

Ao comparar dois métodos de controle (proporcional-integral-derivativo – PID e splines de regressão adaptativa multivariável - MARS) para a temperatura do FTT de uma planta termosolar que opera segundo o ciclo Rankine, Rogada et al. (2018), mostraram que a técnica de mineração de dados aliada ao MARS pode ser um método adequado de controle.

Araújo; Medina (2018) apresentaram um modelo matemático simples, flexível e de baixo custo computacional, validado por dados publicados de duas usinas termosolares, para avaliar a perda de calor para o ambiente em tanques de armazenamento de calor sensível em sal solar de uma planta termosolar de calor concentrado devido a INSD, temperatura ambiente e velocidade do vento.

A utilização de tanques termoclínos de armazenamento simultâneo de calor sensível e latente é mais barato que a alternativa clássica de dois tanques, mas sua implantação enfrenta dificuldades com sua integridade estrutural. González et al. (2016) desenvolveram uma plataforma de simulação numérica capaz de avaliar os impactos térmicos e mecânicos sobre a operação normal da planta.

O hidreto de magnésio é uma alternativa para armazenamento de energia em plantas termosolares devido à alta entalpia das reações de hidrogenação e desidrogenação. Perejón et al. (2016) desenvolveram um método de análise cinética combinada para previsão do comportamento de desidrogenação sob diferentes condições de pressão e temperatura.

Echániz et al. (2016) obtiveram o espectro de emissividade térmica na faixa do infravermelho para uma faixa de temperaturas entre 225 e 320°C para uma liga eutética Mg-51%Zn, com vistas a sua avaliação como candidato à armazenagem térmica.

Sun et al. (2018) empregaram os rejeitos normalmente não aproveitáveis da produção de sílica-gel como base para a síntese em escala industrial de polietilenoglicol estabilizado/ silício hidroxila.

De forma a reduzir custos de armazenagem em plantas termosolares, visando a aplicação com as condições solares do Atacama, no Chile, Parrado et al. (2016) propuseram um substituto para o sal solar composto por 48%Ca(NO₃)₂+7%NaNO₃+45%KNO₃. Fernández et al. (2017) avaliaram as características físico-químicas do Ca(NO₃)₂ e LiNO₃ como aditivos ao sal solar, mostrando que estes melhoram a

estabilidade do sal em altas temperaturas, mas aumentam o custo final ao substituir o NaNO_3 , que aumenta a viscosidade da mistura.

De forma a mitigar eventuais impactos ambientais negativos sem prejuízos à eficiência da planta termosolar, Silva et al. (2019) propuseram um novo nanocompósito baseado nos poliésteres biodegradáveis Poli(e-caprolactona) (PCL), Poli(3-hidroxibutirato) (P-3-HB) ou suas combinações com Poli(etileno-óxido) (PEO) embutidos em nanoporos de grafite natural termicamente expandida como material de mudança de fase sólido-líquido. As avaliações realizadas através da análise espectroscópica infravermelha por Transformada de Fourier, análise termogravimétrica e calorimetria por varredura diferencial, mostrando que há estabilidade térmica e na capacidade de armazenamento de calor latente, tornando-o adequado para sistemas de armazenagem de baixa e média temperaturas, como sistemas de aquecimento de ar, de água, estufas etc.

3.4 Revestimento

López-Herraiz et al. (2017) apresentaram um estudo abrangente das propriedades óticas (absorvidade e emissividade) de diferentes revestimentos solar-seletivos e não-seletivos e os comparou com o revestimento comercial normalmente utilizados.

A síntese de pigmentos à base de argila pilarizada a partir da síntese de sais metálicos como componentes da formulação de revestimentos para absorção solar são propostos por Micó-Vicent; López-Herraiz; et al. (2017) em substituição ao revestimento comercial tradicional.

A utilização por Micó-Vicent; López; et al. (2017) nanocompósitos sintetizados a partir de açúcar, encontrando resultados promissores quando intercalado e calcinado em uma estrutura laminar de montmorillonita, um tipo de argila esmectita. Os pigmentos foram testados em forma de tinta em cupons metálicos a diferentes temperaturas, obtendo uma absorvidade acima de 96% de absorbância depois de 24h a 700°C.

Escobar-Galindo et al. (2018) e Heras et al. (2018) propuseram e estudaram revestimentos solar-seletivos para alta temperatura baseados em oxinitritos de alumínio e titânio, incluindo a caracterização com respeito à composição, morfologia, fase e microestrutura e, após simulação da operação, encontraram em duas alternativas testadas o potencial para operação até 600°C.

3.5 Riscos Ambientais

Apesar do impacto ambiental positivo pela utilização da energia termosolar ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa, no entanto, esta não está isenta de gerar impactos ambientais. Segundo Rudman et al. (2016), para usufruir os impactos sócio-econômicos da eventual instalação de uma usina termosolar na África do Sul, a saber, a geração de empregos, a disponibilidade de energia elétrica de menor pegada ecológica, é necessário analisar os impactos ambientais ao solo, à biodiversidade, ao ar e à águas da região.

Através de revisão bibliográfica, Otieno; Loosen (2016) identificaram dezessete riscos sócio-ambientais na instalação de plantas termosolares, destacando os cinco mais representativos de acordo com a classificação de seis especialistas – interrupção do fornecimento dos recursos hídricos locais, integridade física de espécies de aves, segurança e saúde dos trabalhadores, visual e comprometimento dos recursos recreacionais.

Ho (2016) elaborou uma revisão de estudos de casos de mortalidade de aves em instalações de usinas termosolares em cinco instalações localizadas nos Estados Unidos da América (três), Israel (uma) e Espanha (uma). As principais causas encontradas são as colisões com os heliostatos e queimaduras devido ao fluxo solar concentrado. Os resultados indicam que a taxa de mortalidade de aves em usinas termosolares é menor que as plantas movidas a combustíveis fósseis, mas maiores que as das plantas eólica e nuclear e são propostas medidas mitigatórias de dissuasão das aves através de meios acústicos, visuais, táteis e químicos e estratégias de mira do heliostatos que reduzam o fluxo solar enquanto estejam no modo de espera.

O último objetivo do estudo anterior encontrou desenvolvimento em Ho et al. (2017), onde, para avaliar os riscos à integridade física de aves migratórias na área das usinas termosolares, os autores desenvolveram um modelo de transferência de ET do fluxo de calor para as penas das aves ao longo da trajetória de voo sobre o espaço aéreo da usina com o objetivo de, ao combiná-lo com o modelo de performance da planta, identificar estratégias que conciliem a operação da planta de geração com a minimização dos riscos às aves.

Blanco-Moreno et al. (2017) apresentaram um método de biorremediação para um eventual vazamento para o solo do FTT constituído por uma mistura eutética de éter difenil e bifenil através da degradação por diferentes tipos de bactérias, obtendo uma opção bem efetiva para tal ocorrência.

3.6 Aquecimento de água

Subsídios governamentais podem ter importante papel na disseminação de tecnologias referentes a energias renováveis. Giglio; Lamberts (2016) fizeram uma análise sobre o impacto dos subsídios para famílias de baixa renda brasileiras para instalação de sistemas solares de aquecimento residencial de água.

Lenz et al. (2017) avaliaram garrafas PET, forro de PVC e latas de alumínio, mostrando as últimas o melhor resultado.

Como método de redução da utilização de combustível para sistema de aquecimento residencial de água na República da Eslováquia, Jobbágy et al. (2017) fizeram um estudo de retorno financeiro do custo da instalação, encontrando vinte e três anos, mesmo com subsídios governamentais.

Para aplicações de baixa temperatura (abaixo de 100°C), Strauss et al. (2015) apresentaram um conceito de coletor polimérico termosolar para operação em climas subtropicais o ano inteiro, alcançando absorvância de 90% do espectro solar com um revestimento de carbono preto em uma placa de polimetacrilato de metila e baixa emissividade de corpo negro através de uma cobertura de poliéster. A característica hidrofóbica e autolimpante foi obtida através adição de uma película de nanopartículas de SiO₂.

Diego-Ayala; Carrillo (2016) apresentaram uma análise térmica de uma placa solar plana para aquecimento de água, avaliada em condições reais, instalada em um sistema de termosifão com uso de bomba submersível sob condições de fluxo forçado, cuja utilização se mostrou interessante para aumento da eficiência e controle de temperatura.

Álvarez et al. (2016) apresentaram um algoritmo de controle híbrido (solar e gás natural) preditivo para sistemas de baixa temperatura para aplicações industriais.

3.7 Outros Usos

Além da geração de energia e aquecimento de água, há outras aplicações relevantes para a energia solar.

A pirólise solar mostra-se uma alternativa vantajosa à pirólise convencional no que tange à redução da emissão de CO₂ e produtos com maior poder calorífico, conforme Zeng et al. (2017), permitindo uma armazenagem de energia mais eficiente oriunda da biomassa, por exemplo. Serrano et al. (2019) compararam a pirólise de uma espécie de alcachofra feita em um reator que utiliza o calor excedente do sal solar e em um reator convencional de leito fixo, encontrando uma reação exotérmica na primeira e endotérmica na segunda.

Para aproveitar o calor que excede à capacidade da torre solar de uma usina termosolar, Marugán-Cruz et al. (2015) estudaram a possibilidade de direcioná-lo para uma segunda torre de absorção de um

chiller, para produção de água gelada para sistema de resfriamento da população, gerando assim economia que pode chegar a 75% com este gasto em suas contas de energia elétrica.

López-Zavala et al. (2019) apresentaram uma planta de dessalinização e de resfriamento à absorção de LiBr/H₂O de água, ativada por energia solar, permitindo fornecimento de água potável e gelada à população com baixo impacto ao meio ambiente.

Uma revisão bibliográfica de Beltrán; Rey (2017) demonstra os principais aspectos de um processo de oxidação, a ozonização fotocatalítica solar, para purificação de água para consumo.

Sistemas de aquecimento de ar podem ser implementados a partir da energia solar. Cuzminschi et al. (2018) apresentaram o projeto e a simulação em CFD de um aquecedor de ar solar que pode ser utilizado em ambientes fechados, estufas e manutenção da temperatura em edifícios, por exemplo.

Visando reduzir a emissão de gases de efeito estufa oriundo da queima de combustíveis fósseis em processos de calcinação de minerais, Haneklaus et al. (2017) desenvolveram um sistema helicoidal tubo-a-tubo que utiliza o FTT de plantas termosolares.

4 Conclusão

A energia do calor solar concentrado encerra um campo de pesquisa em franco desenvolvimento. A utilização desta fonte de energia ainda está muito aquém do seu potencial, tendo menor utilização que a energia fotovoltaica e de calor para aquecimento de água (REN21, 2019).

Cabem ainda melhorias em todos os sistemas das plantas termosolares, de maneira que possam se tornar mais eficientes. A utilização de modelos matemáticos termodinâmicos para realização de análise de viabilidade sócio-econômica-ambiental pode nortear políticas públicas e contribuir para melhorar a eficiência de plantas de geração.

A utilização de sistemas híbridos de geração, seja para redução do consumo de combustíveis fósseis ou para manutenção da operação da planta de geração em momentos de variação negativa ou falta de INSD pela combinação com outras energias renováveis também se mostra como forte tendência. O desenvolvimento de plantas que operem a temperaturas mais altas, da ordem de 1000°C, aumenta a eficiência da conversão eletromecânica da planta, aumentando a produção de energia elétrica.

A análise de falhas é útil para melhoria dos procedimentos de fabricação, construção & montagem e especificação de materiais, mas notam-se poucos trabalhos nessa área. Uma possível explicação para a baixa publicidade é a classificação deste tipo de ocorrência como assunto sigiloso. Cuidados com a fundação das instalações e com a corrosão mostram-se como as principais preocupações.

A absorção, transferência e armazenamento da energia térmica, seja em tanques ou no FTT, são etapas críticas em uma planta de geração termosolar. Desenvolver fluidos estáveis a altas temperaturas e de menor custo são imperativos para maior disseminação desta energia.

Revestimentos solar seletivos e não-seletivos mais eficientes, com pigmentos estáveis a altas temperaturas e com propriedades de emissividade e absorvidade adequadas, podem contribuir decisivamente para melhoria do processo de transferência de energia entre os coletores e o FTT.

O fato de a energia solar ser renovável não significa a ausência de impactos ambientais negativos. Impactos a pessoas, flora e fauna, sobretudo aves, deve ser levado em consideração. O vazamento de FTT e efluentes e consequente contaminação do solo e águas subterrâneas devem ser levados em consideração, sendo necessária a implementação de medidas mitigatórias.

Apesar de não ser o foco principal deste trabalho, foram destacados os artigos relativos ao aquecimento de água, dada a sua importância e escala de uso no mundo, de cerca de 480GW_{th} de capacidade instalada no mundo (REN, 2019). Sistemas mais eficientes ou de menores custos, devido à escala, geram grandes resultados absolutos.

Outros usos da energia solar excedente, tais como a dessalinização de água, que pode ser muito útil no sertão nordestino brasileiro, por exemplo, ou o resfriamento de água e o aquecimento de ar, por exemplo, pode aumentar a qualidade de vida da população a um menor custo e ainda reduzir a demanda de energia elétrica. A pirólise de biomassa, por exemplo, pode levar a um maior aproveitamento da energia deste, contribuindo mesmo para um sistema termosolar híbrido. A redução de consumo de energia e emissão de CO₂ em processos de calcinação é outro ganho esperado com a utilização da energia solar.

Por fim, o desenvolvimento de pesquisas para utilização da energia termosolar concentrada, seja em grandes plantas de geração ou com fins de geração descentralizada (distribuída), além de aumentar a confiabilidade do sistema de geração de energia elétrica ao diversificar as fontes de origem, pode fomentar o desenvolvimento de empregos e consequente aumento da renda *per capita* na região mais pobre do Brasil, melhorando a vida das pessoas que ali vivem.

Referências

AGUILAR-JIMÉNEZ, J. A.; VELÁZQUEZ, N.; ACUÑA, A.; et al. Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids. **Solar Energy**, v. 174, p. 55–65, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18308478>>. Acesso em: 25/7/2019.

ÁLVAREZ, J. D.; PASAMONTES, M.; GUZMÁN, J. L.; CAMACHO, E. F. A practical hybrid predictive control algorithm for a low-temperature thermosolar plant. **Optimal Control Applications and Methods**, v. 37, n. 3, p. 508–520, 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/oca.2139>>. Acesso em: 25/7/2019.

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 3/8/2019.

ARAÚJO, A. K. A.; MEDINA, T. G. I. Analysis of the effects of climatic conditions, loading level and operating temperature on the heat losses of two-tank thermal storage systems in CSP. **Solar Energy**, v. 176, p. 358–369, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18310004>>. Acesso em: 25/7/2019.

AUDIGIÉ, P.; ENCINAS-SÁNCHEZ, V.; JUEZ-LORENZO, M.; et al. High temperature molten salt corrosion behavior of aluminide and nickel-aluminide coatings for heat storage in concentrated solar power plants. **Surface and Coatings Technology**, v. 349, p. 1148–1157, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218306522>>. Acesso em: 25/7/2019.

BACHILLER, R. **El sol: nuestra estrella, nuestra energía**, p. 12, 2009. Disponível em: <<http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/elsolnuestraestrella.pdf>>.

BELTRÁN, F. J.; REY, A. Solar or UVA-Visible Photocatalytic Ozonation of Water Contaminants. **Molecules**, v. 22, n. 7, p. 1177, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1420-3049/22/7/1177>>. Acesso em: 25/7/2019.

BLANCO-MORENO, R.; SÁEZ, L. P.; LUQUE-ALMAGRO, V. M.; ROLDÁN, M. D.; MORENO-VIVIÁN, C. Isolation of bacterial strains able to degrade biphenyl, diphenyl ether and the heat transfer fluid used in thermo-solar plants. **New Biotechnology**, v. 35, p. 35–41, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678416325730>>. Acesso em: 25/7/2019.

BONILLA, J.; ROCA, L. Model validation and control strategy of a heat recovery system integrated in a renewable hybrid power plant demonstrator. **Solar Energy**, v. 176, p. 698–708, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18310557>>. Acesso em: 25/7/2019.

COCO-ENRÍQUEZ, L.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. New text comparison between CO₂ and other supercritical working fluids (ethane, Xe, CH₄ and N₂) in line- focusing solar power plants coupled to supercritical Brayton power cycles. **International Journal of Hydrogen Energy**, Special Issue on The 4th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2016), 28-31 August 2016, Istanbul, Turkey., v. 42, n. 28, p. 17611–17631, 2017a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917305463>>. Acesso em: 25/7/2019.

COCO-ENRÍQUEZ, L.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. Dual Loop line-focusing solar power plants with supercritical Brayton power cycles. **International Journal of Hydrogen Energy**, Special

Issue on The 4th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2016), 28-31 August 2016, Istanbul, Turkey., v. 42, n. 28, p. 17664–17680, 2017b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916336758>>. Acesso em: 25/7/2019.

COLMENAR-SANTOS, A.; BONILLA-GÓMEZ, J.-L.; BORGE-DIEZ, D.; CASTRO-GIL, M. Hybridization of concentrated solar power plants with biogas production systems as an alternative to premiums: The case of Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 186–197, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002142>>. Acesso em: 25/7/2019.

CUZMINSCHI, M.; GHERASIM, R.; GIRLEANU, V.; ZUBAREV, A.; STAMATIN, I. Innovative thermo-solar air heater. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 964–970, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816318497>>. Acesso em: 25/7/2019.

DABWAN, Y. N.; MOKHEIMER, E. M. A. Optimal integration of linear Fresnel reflector with gas turbine cogeneration power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 148, p. 830–843, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417306052>>. Acesso em: 25/7/2019.

DIEGO-AYALA, U.; CARRILLO, J. G. Evaluation of temperature and efficiency in relation to mass flow on a solar flat plate collector in Mexico. **Renewable Energy**, v. 96, p. 756–764, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116304384>>. Acesso em: 25/7/2019.

DURANTE, A.; PENA-VERGARA, G.; CURTO-RISSO, P. L.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic simulation of a multi-step externally fired gas turbine powered by biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 140, p. 182–191, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417301553>>. Acesso em: 25/7/2019.

ECHÁNIZ, T.; PÉREZ-SÁEZ, R. B.; RISUEÑO, E.; et al. Thermal emissivity spectra and structural phase transitions of the eutectic Mg-51%Zn alloy: A candidate for thermal energy storage. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 684, p. 62–67, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838816314827>>. Acesso em: 25/7/2019.

ESCOBAR-GALINDO, R.; GUILLÉN, E.; HERAS, I.; et al. Design of high-temperature solar-selective coatings based on aluminium titanium oxynitrides $\text{Al}_y\text{Ti}_{1-y}(\text{O}_x\text{N}_{1-x})$. Part 2: Experimental validation and durability tests at high temperature. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 185, p. 183–191, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818302034>>. Acesso em: 25/7/2019.

FERNÁNDEZ, Á. G.; VELIZ, S.; FUENTEALBA, E.; GALLEGUILLOS, H. Thermal characterization of solar salts from north of Chile and variations of their properties over time at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 128, n. 3, p. 1241–1249, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-016-6037-y>>. Acesso em: 25/7/2019.

FERNÁNDEZ-LEÓN, M.; PACHECO, G.; BOLINAGA, B.; et al. Solar thermal energy predictability for the grid (STEP4Grid). **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 080001, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949181>>. Acesso em: 25/7/2019.

GIGLIO, T.; LAMBERTS, R. Savings related to solar water heating system: A case study of low-income families in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 434–442, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816307836>>. Acesso em: 25/7/2019.

GONZÁLEZ, I.; PÉREZ-SEGARRA, C. D.; LEHMKUHL, O.; TORRAS, S.; OLIVA, A. Thermo-mechanical parametric analysis of packed-bed thermocline energy storage tanks. **Applied Energy**, v. 179, p. 1106–1122, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308996>>. Acesso em: 25/7/2019.

GONZÁLEZ-NICIEZA, C.; ORDIALES-MARTÍNEZ, V.; LAÍN-HUERTA, R.; LAÍN-HUERTA, C.; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, M. I. Failure analysis of a cracked concrete pipe in a 50MW thermosolar power plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, p. 656–671, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630716306343>>. Acesso em: 25/7/2019.

HANEKLAUS, N.; ZHENG, Y.; ALLELEIN, H.-J. Stop Smoking—Tube-In-Tube Helical System for Flameless Calcination of Minerals. **Processes**, v. 5, n. 4, p. 67, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/5/4/67>>. Acesso em: 25/7/2019.

HERAS, I.; GUILLÉN, E.; LUNGWITZ, F.; et al. Design of high-temperature solar-selective coatings based on aluminium titanium oxynitrides $\text{Al}_y\text{Ti}_{1-y}\text{(OxN)}_x$. Part 1: Advanced microstructural characterization and optical simulation. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 176, p. 81–92, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817305858>>. Acesso em: 25/7/2019.

HO, C. K. Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 070017, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949164>>. Acesso em: 25/7/2019.

HO, C. K.; WENDELIN, T.; HORSTMAN, L.; YELLOWHAIR, J. A method to assess flux hazards at CSP plants to reduce avian mortality. **AIP Conference Proceedings**, v. 1850, n. 1, p. 030026, 2017. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4984369>>. Acesso em: 26/7/2019.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2ª Edição, 2017. *E-book*. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>. Acesso em: 25/07/2019.

JOBBÁGY, J.; KRIŠTOF, K.; FINDURA, P.; URBANOVIČOVÁ, O.; KRIŽAN, M. The Utilisation of Solar System in Combined Heating System of Water. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 65, n. 1, p. 41–50, 2017. Disponível em: <<https://acta.mendelu.cz/65/1/41/>>. Acesso em: 25/7/2019.

KASSEM, A.; AL-HADDAD, K.; KOMLJENOVIC, D. Concentrated solar thermal power in Saudi Arabia: Definition and simulation of alternative scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 75–91, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211730802X>>. Acesso em: 25/7/2019.

KRISTIAWAN, B.; SANTOSO, B.; WIJAYANTA, A. T.; AZIZ, M.; MIYAZAKI, T. Heat Transfer Enhancement of TiO₂/Water Nanofluid at Laminar and Turbulent Flows: A Numerical Approach for Evaluating the Effect of Nanoparticle Loadings. **Energies**, v. 11, n. 6, p. 1584, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1584>>. Acesso em: 25/7/2019.

LENZ, A. M.; COLLE, G.; DE SOUZA, S. N. M.; et al. Evaluation of three systems of solar thermal panel using low cost material, tested in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 201–207, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617318784>>. Acesso em: 25/7/2019.

LI, Z.; WU, Z.-G. Analysis of HTFs, PCMs and fins effects on the thermal performance of shell–tube thermal energy storage units. **Solar Energy**, v. 122, p. 382–395, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005034>>. Acesso em: 25/7/2019.

LÓPEZ-HERRAIZ, M.; FERNÁNDEZ, A. B.; MARTINEZ, N.; GALLAS, M. Effect of the optical properties of the coating of a concentrated solar power central receiver on its thermal efficiency. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 159, p. 66–72, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816303221>>. Acesso em: 25/7/2019.

LÓPEZ-ZAVALA, R.; VELÁZQUEZ-LIMÓN, N.; GONZÁLEZ-URIBE, L. A.; et al. A novel LiBr/H₂O absorption cooling and desalination system with three pressure levels. **International Journal of Refrigeration**, v. 99, p. 469–478, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700719300039>>. Acesso em: 25/7/2019.

MARUGÁN-CRUZ, C.; SÁNCHEZ-DELGADO, S.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, M. R.; VENEGAS, M.; SANTANA, D. District cooling network connected to a solar power tower. **Applied Thermal Engineering**, v. 79, p. 174–183, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111500037X>>. Acesso em: 25/7/2019.

MERCHÁN, R. P.; SANTOS, M. J.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic model of a hybrid Brayton thermosolar plant. **Renewable Energy**, Exergy analysis of renewable energy systems., v. 128, p. 473–483, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304755>>. Acesso em: 25/7/2019.

MERCHÁN, R. P.; SANTOS, M. J.; REYES-RAMÍREZ, I.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Modeling hybrid solar gas-turbine power plants: Thermodynamic projection of annual performance and

emissions. **Energy Conversion and Management**, v. 134, p. 314–326, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416311372>>. Acesso em: 25/7/2019.

MICÓ-VICENT, B.; LÓPEZ, M.; BELLO, A.; MARTÍNEZ, N.; MARTÍNEZ-VERDÚ, F. Optimum Multilayer-Graphene-Montmorillonite Composites From Sugar for Thermosolar Coatings Formulations. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 139, n. 3, p. 031005-031005–7, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.4035757>>. Acesso em: 25/7/2019.

MICÓ-VICENT, B.; LÓPEZ-HERRAIZ, M.; BELLO, A.; MARTÍNEZ, N.; MARTÍNEZ-VERDÚ, F. M. Synthesis of pillared clays from metallic salts as pigments for thermosolar absorptive coatings. **Solar Energy**, v. 155, p. 314–322, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1730539X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLIVENZA-LEÓN, D.; MEDINA, A.; CALVO HERNÁNDEZ, A. Thermodynamic modeling of a hybrid solar gas-turbine power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 435–447, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041500031X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLMEDO-TORRE, N.; CANALS CASALS, L.; AMANTE GARCÍA, B. Sustainable design of a thermosolar electricity generation power plant in Burkina Faso. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 428–436, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718309149>>. Acesso em: 25/7/2019.

OLSEN, M. L.; REA, J.; GLATZMAIER, G. C.; et al. Solar thermoelectricity via advanced latent heat storage. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 050035, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949133>>. Acesso em: 25/7/2019.

ORDIALES MARTINEZ, V.; ALVAREZ FERNÁNDEZ, M. I.; GONZÁLEZ NICIEZA, C. Failure analysis of subsidence in an effluent treatment plant in a thermosolar power plant. **Engineering Failure Analysis**, v. 91, p. 419–432, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135063071731378X>>. Acesso em: 25/7/2019.

OTIENO, G. A.; LOOSEN, A. E. An analysis of key environmental and social risks in the development of concentrated solar power projects. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 160012, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4949253>>. Acesso em: 25/7/2019.

PARRADO, C.; MARZO, A.; FUENTEALBA, E.; FERNÁNDEZ, A. G. 2050 LCOE improvement using new molten salts for thermal energy storage in CSP plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 505–514, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015312>>. Acesso em: 25/7/2019.

PEREJÓN, A.; SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, P. E.; CRIADO, J. M.; PÉREZ-MAQUEDA, L. A. Magnesium hydride for energy storage applications: The kinetics of dehydrogenation under different working conditions.

Journal of Alloys and Compounds, v. 681, p. 571–579, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838816310519>>. Acesso em: 25/7/2019.

PETERSEIM, J. H.; VISCUSO, L.; HELLWIG, U.; MCINTYRE, P. Large capacity, multi-fuel, and high temperature working fluid heaters to optimize CSP plant cost, complexity and annual generation. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 060003, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949145>>. Acesso em: 25/7/2019.

PIÑA-ORTIZ, A.; HINOJOSA, J. F.; PÉREZ-ENCISO, R. A.; et al. Thermal analysis of a finned receiver for a central tower solar system. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1002–1012, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118309200>>. Acesso em: 25/7/2019.

PRIETO, C.; GALLARDO-GONZÁLEZ, J.; RUIZ-CABAÑAS, F. J.; et al. Study of corrosion by Dynamic Gravimetric Analysis (DGA) methodology. Influence of chloride content in solar salt. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 157, p. 526–532, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816302628>>. Acesso em: 25/7/2019.

RECH, S.; LAZZARETTO, A.; GRIGOLON, E. Optimum integration of concentrating solar technologies in a real coal-fired power plant for fuel saving. **Energy Conversion and Management**, v. 178, p. 299–310, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418311257>>. Acesso em: 25/7/2019.

REN21. Renewables Energy: Global Status Report. , 2019. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21/7/2019.

ROGADA, J. R.; BARCIA, L. A.; MARTINEZ, J. A.; MENENDEZ, M.; DE COS JUEZ, F. J. Comparative Modeling of a Parabolic Trough Collectors Solar Power Plant with MARS Models. **Energies**, v. 11, n. 1, p. 37, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/37>>. Acesso em: 25/7/2019.

RUDMAN, J.; GAUCHÉ, P.; ESLER, K. J. Initial review and analysis of the direct environmental impacts of CSP in the northern Cape, South Africa. **AIP Conference Proceedings**, v. 1734, n. 1, p. 160015, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4949256>>. Acesso em: 26/7/2019.

RUIZ-CABAÑAS, F. J.; JOVÉ, A.; PRIETO, C.; et al. Materials selection of steam-phase change material (PCM) heat exchanger for thermal energy storage systems in direct steam generation facilities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 159, p. 526–535, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816304202>>. Acesso em: 25/7/2019.

SAHOO, U.; KUMAR, R.; PANT, P. C.; CHAUDHARY, R. Resource assessment for hybrid solar-biomass power plant and its thermodynamic evaluation in India. **Solar Energy**, v. 139, p. 47–57, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16304315>>. Acesso em: 25/7/2019.

SÁNCHEZ-ORGAS, S.; PEDEMONTE, M.; EZZATTI, P.; et al. Multi-objective optimization of a multi-step solar-driven Brayton plant. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 346–358, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415004410>>. Acesso em: 25/7/2019.

SERRANO, D.; HORVAT, A.; SOBRINO, C.; SÁNCHEZ-DELGADO, S. Thermochemical conversion of *C. cardunculus* L. in nitrate molten salts. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, p. 136–146, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118347069>>. Acesso em: 25/7/2019.

SILVA, V. O.; LIMA, T. B. S.; AQUINO, K. A. S.; et al. Improving Thermosolar Energy Storage with Biodegradable Polyester Nanocomposite Phase Change Materials. **Macromolecular Symposia**, v. 383, n. 1, p. 1800047, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/masy.201800047>>. Acesso em: 25/7/2019.

STRAUSS, J. A.; SOAVE, P. A.; RIBEIRO, R. S.; HOROWITZ, F. Absorber and self-cleaning surfaces on modified polymer plates for solar harvesting in the humid (sub)tropics. **Solar Energy**, v. 122, p. 579–586, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005046>>. Acesso em: 25/7/2019.

SUN, K.; KOU, Y.; ZHENG, H.; et al. Using silicagel industrial wastes to synthesize polyethylene glycol/silica-hydroxyl form-stable phase change materials for thermal energy storage applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 178, p. 139–145, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024818300163>>. Acesso em: 25/7/2019.

TORRES-ROLDÁN, M.; LÓPEZ-LUQUE, R.; VARO-MARTÍNEZ, M. Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments. **Solar Energy**, v. 119, p. 159–168, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15003497>>. Acesso em: 25/7/2019.

VENTAS, R.; LECUONA, A.; VEREDA, C.; RODRIGUEZ-HIDALGO, M. C. Performance analysis of an absorption double-effect cycle for power and cold generation using ammonia/lithium nitrate. **Applied Thermal Engineering**, v. 115, p. 256–266, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116343460>>. Acesso em: 25/7/2019.

VISCONTI, P.; PRIMICERI, P.; CONSTANTINI, P. C.; COLANGELO, G.; CAVALERA, G. Measurement and control system for thermosolar plant and performance comparison between traditional and nanofluid solar thermal collectors. **INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS**, v. 9, n. 3, p. 1220–1242, 2016. Disponível em: <<https://s2is.org/Issues/v9/n3/papers/paper3.pdf>>.

WANG, T.; BAI, F.; CHU, S.; ZHANG, X.; WANG, Z. Experiment study of a quartz tube falling particle receiver. **Frontiers in Energy**, v. 11, n. 4, p. 472–479, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11708-017-0502-6>>. Acesso em: 25/7/2019.

ZEMAN, M. SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR SOLAR CELLS. **SOLAR CELLS**. p.3.1-3.27, 2016. Delft University of Technology. Disponível em: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R3-CH3_Solar_cell_materials.pdf>. Acesso em: 21/7/2019.

ZENG, K.; GAUTHIER, D.; SORIA, J.; MAZZA, G.; FLAMANT, G. Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review. **Solar Energy**, Advances in Solar Thermochemistry., v. 156, p. 73–92, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17304103>>. Acesso em: 25/7/2019.