

ESTUDO SOBRE PLANTAS DE CONCENTRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

SILVA, Abner Roberto Araújo

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA.
abnerroberto.uli@gmail.com

LEITE, Pedro Ricardo Rodrigues

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA.
pr6710@gmail.com

MARÇAL, Roberto Capparelli

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA.
roberto.marcal@docente.unievangelica.edu.br

PIRES, Rodrigo Moraes

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA.
ro.moraSPIRES@gmail.com

Resumo

O uso de concentração de energia solar para cogeração recebeu atenção significativa entre pesquisadores, empresas produtoras de energia e, também, os legisladores de políticas estaduais. O coletor parabólico e a torre de energia solar são os dois sistemas dominantes de concentração de energia que estão operando ou estão em fase de construção. Os Estados Unidos e a Espanha são líderes globais na geração de eletricidade de Concentração de Energia Solar (CSP), enquanto países em desenvolvimento, como China e Índia, emergem por investimentos agressivos. A cada ano, centenas de artigos relacionados a este tema são publicados. No entanto, é necessário observar o desenvolvimento geral da pesquisa neste cenário, que está faltando no corpo atual da literatura. Para preencher essa lacuna, este estudo fornece uma visão geral mais atualizada das tecnologias de CSP implementadas em todo o mundo; analisa artigos de revisão publicados anteriormente sobre este assunto, para destacar os principais encontrados e, também, as tendências futuras de pesquisas no setor. O armazenamento de energia térmica, o coletor solar e os principais tipos de plantas solares são encontrados como tópicos principais de discussão neste estudo. Com uma busca integral, verifica-se que a geração direta de vapor é uma inovação promissora, revisada neste estudo. Este artigo fornece uma visão abrangente sobre as tecnologias de CSP e suas pesquisas.

Palavras-Chave: Energia Solar; Concentração de energia Solar; Inovação; Tecnologia.

1. Introdução

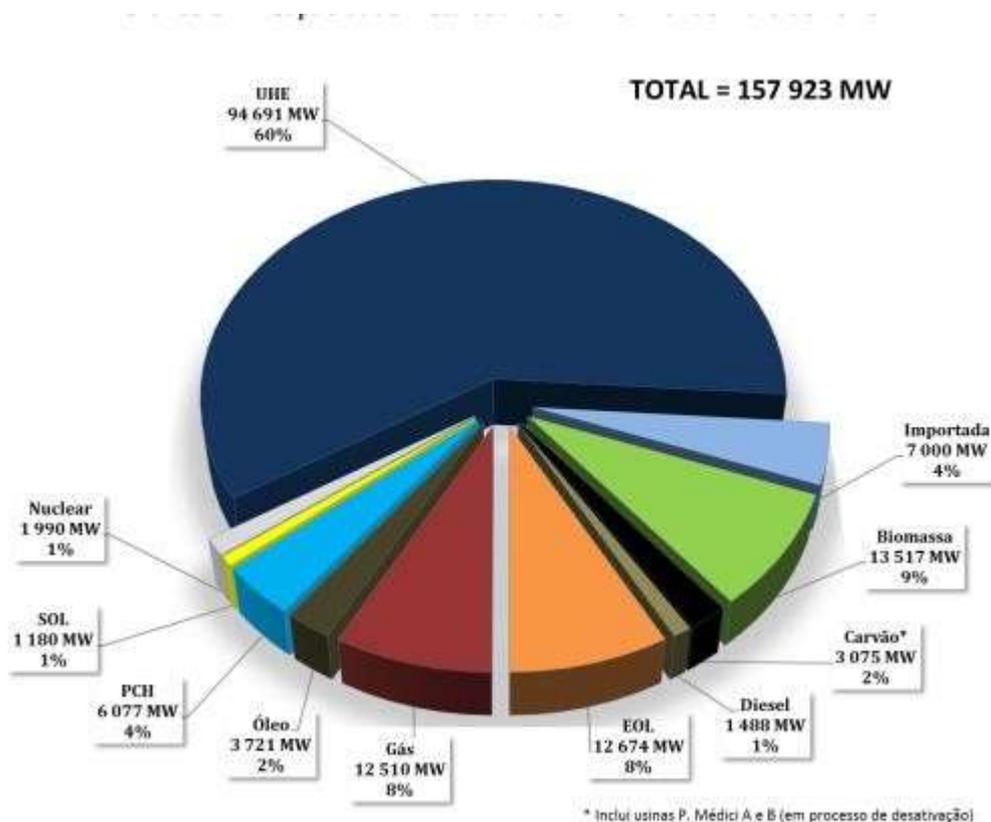
O consumo global de energia aumenta rapidamente devido ao crescimento da população, industrialização, urbanização e à agricultura. Estima-se que, com esse crescimento acelerado, dentro dos próximos 15 a 20 anos, o consumo de eletricidade deverá dobrar [1,2].

O padrão de consumo de energia de várias fontes, convencionais e renováveis, é um dos indicadores críticos do uso de recursos e do impacto ambiental ocasionado pelo uso de recursos [3,4], logo é um fator imprescindível para alcançar um desenvolvimento sustentável. Por exemplo, atualmente, 80% do suprimento global de energia primária provém de combustíveis fósseis (como exemplo: carvão, petróleo líquido e gás natural), e são responsáveis por emitir grandes quantidades de gases que colaboram com o Efeito Estufa (GEEs) [5,6].

Além disso, as fontes de energia de combustíveis fósseis são responsáveis por um ritmo crescente de mudanças climáticas, devido às emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE's); tratados internacionais, como, por exemplo, o Acordo de Paris, cujos países participantes assinaram um termo de compromisso, em que metas de redução de GEE's, de 37% até 2025 e de 43% até 2030 [7], foram propostos para diminuir o ritmo de suas emissões. Como a população cresce rapidamente e assim as emissões de gases, os países enfrentarão grande dificuldade para obter recursos, por isso buscam fontes energéticas alternativas, a fim de aliviar as emissões de carbono [8]. Para erradicar esse cenário catastrófico, as iniciativas globais de energias renováveis mostram que, com o desenvolvimento existente da infraestrutura de energia renovável, as fontes renováveis contribuirão para a redução geral de CO₂ de 30%, até 2050, em comparação com o ano de 2012 [9]. Sob estas perspectivas, o desenvolvimento, a adoção e a disseminação de tecnologias de baixo carbono, particularmente de tecnologias de captação de energia renovável, tornaram-se a maior prioridade, para satisfazer as necessidades de energia da sociedade e para contribuir a um maior esforço de redução de CO₂ [10].

No Brasil, até o final de maio de 2018, produzia-se 157923KW [11] – dentre essas fontes, as energias renováveis ocupavam um pequeno espaço, pois, ainda não é tão explorada. Podemos ver na figura 1.

Figura 1: Capacidade instalada no SIN no final de maio de 2018.



Fonte: [11]

A energia solar é amplamente reconhecida como uma das alternativas mais competitivas, devido às características de ser "verde", de baixo custo e renovável, entre todas as energias renováveis [12]. Usando a fonte de energia, a CSP é uma tecnologia capaz de produzir eletricidade em escala de utilidade pública, oferecendo capacidade empresarial e energia disponível sob demanda, integrando armazenamento de energia térmica [13]. Considerando a alta economia de energia e alta eficiência energética, as usinas de CSP tendem a contribuir com a eletricidade global de 7%, até 2030, e 25%, até 2050 [14]. Prevê-se que, com altos níveis de eficiência energética e o desenvolvimento avançado da indústria, o CSP possa atender 6% da demanda mundial de energia até 2030 e 12%, até 2050 [15].

Em março de 2014, a Comissão de Energia da Califórnia aprovou licenças para cinco usinas de CSP com uma capacidade instalada total de 2284 MW [16]. Nos Estados Unidos, foi avaliado que as usinas de CSP com capacidade total de 118 GW poderiam ser instaladas até 2030 e, em 2050, a capacidade poderia ser

aumentada ainda mais para 1504 GW [17]. Em 2015, a capacidade total instalada de plantas de CSP na Europa atingiu 5GW, de 0,5 GW no ano de 2006 [13]. Com a atual política de desenvolvimento de tecnologia de CSP, seis países da União Europeia (UE), Chipre, França, Grécia, Itália, Portugal e Espanha, preveem produzir eletricidade de 20 TWh até 2020 [18]. Até 2030, um total de 83 GW poderá ser instalado nas áreas mais ensolaradas, tendências na pesquisa sobre CSP.

Nas usinas de CSP, a energia elétrica é gerada pela concentração da radiação solar. Geralmente, as plantas de CSP consistem em vários componentes, como concentradores solares, receptores, turbinas a vapor e geradores elétricos. Até hoje, são encontrados quatro tipos diferentes de usinas de geração de energia CSP; esses são: parabólicas solares (SPD), coletoras de calhas parabólicas (PTC), torre de energia solar (SPT) e refletores lineares Fresnel (LFR) [1,19,20]. Os sistemas de geração de energia CSP usam concentradores para focalizar a luz do sol em um receptor que transporta um fluido de trabalho, que é aquecido a uma temperatura alta; e esse fluido aquecido vai para uma turbina a vapor convencional que é conectada a um gerador, portanto, a energia térmica é transformada em energia elétrica [1,21]. O armazenamento de energia térmica é uma parte integrada de uma usina de CSP, onde o calor armazenado pode ser usado para operação contínua da usina de CSP, durante a noite e em dias nublados. No entanto, os recursos de armazenamento podem não estar presentes em todas as plantas CSP. Por exemplo, apenas 50 plantas (cerca de 40% de todas as plantas) têm capacidade de armazenamento na Espanha [22]. Além disso, outros combustíveis convencionais, como gás/petróleo, são usados enquanto fontes suplementares de energia [1,10,23]. Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão sistemática de artigos relacionados à CSP.

2. Metodologia

Para este estudo, o banco de dados bibliográficos da Periodicos.Capes.gov.br, na Base SCOPUS, foi selecionado para extrair informações de publicação sobre estudos de CSP. Os seguintes termos da pesquisa foram utilizados para selecionar o número máximo de artigos relacionados às CSP's. Essas escolhas foram realizadas por meio do título, resumo, ano de publicação, fonte dos periódicos, aplicação direta das plantas solares e relevância dos trabalhos publicados no meio científico. Os documentos foram analisados de acordo com seu padrão geral e com a frequência das publicações ao longo dos anos, fonte do periódico, distribuição geográfica e, também, por uma análise aprofundada da publicação por *strings*, que fornece uma compreensão abrangente do processo, tendências passadas, novos desenvolvimentos e perspectivas futuras da área de pesquisa em CSP.

Duas técnicas de análise foram empregadas para gerar um resultado preliminar sobre o progresso e a tendência futura da pesquisa em CSP no âmbito do campo de energia solar e renovável. O primeiro método é uma análise de *strings*, na qual a plataforma buscada considera que geralmente estão localizadas no título e no resumo. No segundo método, analisamos citações de artigos altamente referenciados que funcionam como base de conhecimento no campo da pesquisa em CSP. Esses métodos são descritos abaixo.

Para a seleção de *strings* em um cenário científico, todas foram extraídas usando o título e o resumo das publicações selecionadas. Inicialmente, foram encontrados 18.288 termos nas coleções de publicações extraídas do título e do resumo e, posteriormente, foram filtradas com um número mínimo de ocorrências, 10. As palavras utilizadas para as buscas foram: "concentração solar de energia"; "tecnologias"; "inovação"; "plantas solares".

3. Resultados e discussão

Ao implementar a metodologia descrita na seção anterior, identificamos um total de 976 artigos para CSP. Em 2017, o maior número de artigos (157 artigos) foi publicado. No total, foram identificadas 114 principais fontes de publicação (incluindo os dois periódicos e conferências). Verifica-se que a pesquisa relacionada ao CSP é principalmente realizada em periódicos e que as 15 principais fontes são responsáveis por cerca de 55% de todos os artigos, enquanto as 99 fontes restantes são responsáveis por 36% das publicações. O restante, 9%, é de outras 104 fontes. ENERGIA SOLAR e PROCEDIA DE ENERGIA são os dois periódicos em que a maioria dos artigos foi publicada nos últimos tempos, enquanto REVISÕES RENOVÁVEIS DE ENERGIA SUSTENTÁVEL é a revista que mais contribuiu de forma progressiva e promissora em publicações, a partir do ano de 2009. Após a apuração dos trabalhos, foram divididos em 5 tópicos pelos assuntos mais falados entre eles. Seguem abaixo os tópicos.

3.1 Sistema Parabólico Solar (SPD)

No sistema SPD-CSP, um concentrador de foco pontual parabólico na forma de um “prato” é usado sistema que reflete a radiação solar em um receptor no ponto focal. Os concentradores são colocados em uma montagem com um sistema de rastreamento de dois eixos que segue o Sol. No ponto focal, para uma conversão eficiente de energia, um motor Stirling/Brayton é colocado com um gerador elétrico para utilizar o calor concentrado no receptor [24]. Com uma taxa de concentração de aproximadamente 2000 no ponto focal do SPD, a temperatura e a pressão do fluido de trabalho geralmente atingem cerca de 700-750 ° C e 200bar, respectivamente [5,10,23,25-26]. Geralmente, o diâmetro do SPD varia de 5 a 10m e a área de superfície é de 40-120m². A superfície brilhante do SPD é construída em prata ou alumínio, revestida em vidro ou plástico. No entanto, é possível obter um desempenho mais alto quando o vidro é usado com uma superfície de prata com uma espessura de 1 µm. Além disso, para melhorar a reflexão da superfície, obtém-se uma porcentagem de ferro usada no vidro. Nessa combinação, a reflexão solar pode chegar a 90-94%. Um único sistema CSP de parabólica pode ter uma capacidade de geração de energia variando de 0,01 a 0,5 MW [27,28]. Para operar um motor de rotação, a energia solar é coletada na forma de calor que, por sua vez, flui de uma fonte quente para uma pia fria. A saída do ciclo Stirling é usada para acionar o gerador; o que gera energia elétrica. A eficiência do sistema SPD com o motor Stirling varia entre 25% e 30% [25,27,28], que é uma das mais altas fontes de energia solar.

A razão por trás dessa eficiência é que os espelhos curvos usados no sistema sempre apontam diretamente para o Sol, enquanto outras tecnologias, como o PTC e o SPT, sofrem perdas de cosseno (a área projetada sofrerá uma redução) [5,29,30]. O SPD possui eficiência solar elétrica de 50 a 100% mais altas do que os SPT's e PTC's, respectivamente, em bases equivalentes a esses sistemas [31]. Para fornecer uma fonte de energia mais confiável, os sistemas SPD também podem ser combinados com uma usina movida a combustível fóssil. De acordo com os sistemas de energia solar e de energia química (SolarPACES) [32], até agora foram construídas duas usinas de CSP de parabólica, uma sendo operacional e, a outra, interrompendo sua produção de eletricidade. Atualmente, a única planta comercial e operacional de SPD está no Tooele Army Depot, localizado em Tooele, Utah, nos Estados Unidos. A planta tem uma capacidade de 1,5 MW e consiste em 429 pratos solares com um motor Stirling. O fluido de trabalho da planta é o hélio com um sistema de refrigeração em circuito fechado. O objetivo principal da usina é fornecer 30% dos requisitos de eletricidade das instalações do Exército de Tooele nos EUA. Por outro lado, a usina parabólica atualmente não operacional, o Maricopa Solar Project (Maricopa), tinha capacidade de 1,5 MW e está localizada em Peoria, Arizona, Estados Unidos. A figura 2 apresenta um SPD.

Figura 2: Sistema Parabólico Solar de Toole Army Depot.



Fonte: [35]

3.2 Coletor Parabólico-Vale (PTC)

No sistema PTC-CSP, grandes espelhos em forma de U gigante são usados para refletir a radiação solar em um receptor. O campo coletor compreende várias centenas de valas que são colocadas em linhas paralelas alinhadas no eixo Norte-Sul. Essa configuração permite que as cavidades de um único eixo acompanhem o sol de Leste a Oeste ao longo do dia, garantindo que a radiação seja continuamente focada nos tubos do receptor [32]. Quando o calor do sol é refletido no espelho, as formas curvas enviam a maior parte desse calor refletido para um receptor. O receptor, ou o tubo de absorção, é colorido para alcançar a absorção máxima da radiação solar e uma redução nas perdas de calor. O tubo receptor está cheio com o líquido; pode ser óleo, sal fundido ou algo que retenha bem o calor. Diferentes porcentagens de nitrato de sódio, potássio e nitrato de potássio são usadas para o sal fundido. Um alto coeficiente de absorção do tubo e sua posição no ponto focal da calha são as duas questões importantes que precisam ser garantidas para o aquecimento eficiente do líquido de trabalho. Dependendo da taxa de concentração, intensidade solar, taxa de vazão do fluido de trabalho e outros parâmetros, a temperatura do fluido de trabalho pode chegar a 400 °C [33]. A energia anestésica é concentrada em 70 a 100 vezes no sistema, e a temperatura operacional atinge 350 a 550 ° C.

A eficiência solar-elétrica é de 15% para o sistema [34]. Se um sistema de calha parabólica estiver integrado a uma usina de turbina a vapor, então, ele projeta a tecnologia de geração de energia. O líquido superaquecido aquece a água através de um trocador de calor; a água se transforma em vapor; esse vapor é usado para girar uma turbina e, a partir daí, funciona como uma usina convencional, onde uma turbina a vapor liga o gerador e a eletricidade é cogenerada. Depois que o fluido transfere seu calor para a água, ele é reciclado e utilizado novamente no processo, e o vapor também é resfriado, condensado e reciclado para repetir o processo [25,36]. Uma das grandes vantagens do sistema de calha é que o líquido aquecido pode ser armazenado e usado, posteriormente, para gerar eletricidade quando a luz solar estiver ausente. Entre as várias tecnologias de colheita solar, esse sistema garante o melhor uso da terra [1,5,10,25–27,37]. Algumas plantas de valas parabólicas usam combustível fóssil para suplementar a produção de energia durante baixa radiação solar e, muitas vezes, o sistema de valas pode ser integrado às usinas convencionais a gás natural ou a carvão [32]. Comparado a outras tecnologias de CSP, o sistema parabólico-vale é mais avançado [27]. O sistema parabólico-vale é a tecnologia CSP mais amplamente usada. O primeiro sistema de valas parabólicas foi desenvolvido em 1912, no Cairo, Egito [5]. Atualmente, globalmente, existem 77 usinas parabólicas operacionais, e a maioria delas está localizada na Espanha e nos Estados Unidos. Duas plantas estão localizadas em Marrocos, duas na Itália, duas na África do Sul, uma no Canadá, três plantas na Índia, uma na Argélia, uma no Egito, uma nos Emirados Árabes Unidos e uma na Tailândia. Na Espanha, existem 39 usinas parabólicas, nas quais a capacidade líquida de cada turbina varia de 22,5 MW a 50 MW. O primeiro sistema de coletor parabólico foi instalado em 2008 perto de Granada, chamado Andasol-1 (AS-1) e com uma capacidade de 49,9 MW. A geração planejada de eletricidade é de 158.000MWh/ano [32]. Hélios I e Hélios II são as duas maiores plantas de valas parabólicas da Espanha, representando a maior área de terra usada, 2.600.000m² cada. A capacidade instalada total das usinas parabólicas operacionais em Espanha atingiu 1871,9MW até 2016. Por outro lado, nos Estados Unidos, até 2016, a capacidade instalada total de usinas de CSP parabólico atingiu uma capacidade de 1255,8 MW. no mundo. A Estação Geradora Elétrica Solar I (SEGS I), criada em 1984 com uma eficiência de 13,8 MW, é a primeira planta de CSP da PTC na região dos EUA.

Instalada no ano de 2013, a Estação Geradora de Solana foi o projeto mais caro até agora realizado nos Estados Unidos, com base nessa tecnologia, com um custo de US \$ 2 bilhões. A geração planejada de eletricidade é estimada em 944.000MWh/ano. Para a usina de Saguaro, a área líquida específica de 64.7497m²/kW é a mais alta entre todas as atuais plantas operacionais nos Estados Unidos. A China está investindo alto nessa tecnologia e agora estão em desenvolvimento 6 usinas parabólicas, com capacidade de 414MW. De acordo com o presente plano de desenvolvimento, o Chile construirá a maior planta de via parabólica, em Maria Elena, na região de Antofagasta, com capacidade de 360 MW. O custo estimado do projeto será de US \$ 2610 milhões. Alguns outros países, como Israel, África do Sul e Kuwait, também planejam construir usinas parabólicas com capacidades que variam de 50 MW a 110 MW.

Figura 3: Primeira usina PTC instalada em 2008, Andasol-1.



Fonte: [38]

3.3 Torre de Energia Solar (SPT) / Receptor Central

Os SPT's são sistemas de geração de energia CSP que empregam grandes espelhos planos para refletir a luz do sol em um receptor solar na parte superior da tela. Os materiais para o receptor, geralmente cerâmicos ou metálicos, são estáveis a temperaturas relativamente elevadas. O fluxo solar médio que atinge o receptor varia de 200kW/m² a 1000kW/m², oferecendo uma oportunidade para atingir uma temperatura de trabalho alta [30]. No receptor, a temperatura do líquido de trabalho é reduzida até a metade da equipe de produção, o que normalmente gira uma turbina convencional para gerar eletricidade. Água/vapor, sal fundido, sódio líquido ou ar podem ser utilizados como fluido de trabalho no sistema para grandes plantas com capacidade de 100 a 200 MW [38,39]. Nas décadas de 1980 e 1990, o Departamento de Projetos de Energia dos Estados Unidos, na Califórnia, demonstrou que um SPT poderia coletar e armazenar calor, para gerar eletricidade em escala de utilidade durante todo o dia, 24 horas por dia. Hoje, os SPTs continuam a ajudar a construir uma economia de energia limpa. Em 2009, a Sierra Sun Tower, um sistema modular de duas torres no deserto de Mojave, alimentou mais de 5000 residências e, em 2010, começou a construção do sistema de três torres, localizado na Califórnia, EUA. Nessa planta existem cerca de 175.000 espelhos. Essa fábrica, na Califórnia, criou mais de 1000 empregos e alimenta mais de 350.000 casas [40]. Milhares de espelhos, chamados heliostáticos, refletem a luz do sol em um receptor no topo de uma torre. Os heliostáticos são o principal investimento de capital em uma usina de CSP de torre de poder [41]. Esses espelhos controlados por computador se movem para manter o foco do amanhecer ao anoitecer. Na usina Sierra Sun Tower, a água é usada como fluido de trabalho, enquanto, atualmente, o nitrato de sal derretido é amplamente usado em usinas de energia nos Estados Unidos, pois o fluido não é inflamável, não é tóxico e tem melhor capacidade de armazenamento de calor do que água. Na planta da Torre Solar de Jülich, na Alemanha, o fluido de trabalho usado na planta é o ar.

No SPT's, a água é isolada para outro receptor com radiação solar concentrada e aquece a água a mais de 537 °C. Uma fração do vapor superaquecido é armazenada (em um tanque de armazenamento de calor) enquanto a maior parte do vapor é enviada para o bloco de energia para uso posterior, com um sistema de calha parabólica. Depois disso, o vapor de alta pressão gira a turbina para produzir eletricidade. Se a nuvem

cobre a luz do sol, o vapor que foi armazenado anteriormente no tanque é usado para produzir eletricidade por até uma hora. Por outro lado, em um SPT em que o sal fundido é usado como fluido de trabalho, o sal fundido relativamente frio a 290 ° C é bombeado para o receptor, onde é aquecido até 565 ° C e, depois, flui para o tanque de armazenamento de água quente. O sal quente flui através de um trocador de calor de onde a energia térmica é transferida para a água, produzindo vapor que gira um sistema convencional de turbina/gerador de ciclo Rankine. O vapor exaurido derivado da turbina é condensado e, depois do condensado, é bombeado para o sistema do trocador de calor. Aqui o sal fundido que foi resfriado novamente é aquecido pelo receptor solar e o processo se repete continuamente [1,5,10,41,26,42-43]. Finalmente, o sal derretido volta para o tanque de armazenamento a frio. O sal quente armazenado pode produzir vapor e gerar eletricidade eficientemente por horas. Para saída contínua de uma turbina, os tanques de armazenamento podem ser projetados de maneira a fornecer calor suficiente como fonte de energia por até 13h [44]. Atualmente, a inovação continua reduzindo custos e aumentando a eficiência, de modo que um SPT pode fornecer energia em escala de utilidade pública (variando de 30 a 400MWe), fornecendo eletricidade limpa e confiável para residências, empresas e comunidades. A eficiência anual solar-elétrica para esse tipo de usina varia de 20% a 35% [38,39].

Ao contrário de outras usinas de CSP, as usinas de torre exigem um suprimento considerável de água e a maior área terrestre. A eficiência da planta varia a depender do número de critérios, como as características ópticas dos heliostatos, a precisão do sistema de rastreamento do espelho e a limpeza do espelho. Os SPT's devem ser usados economicamente viáveis e lucrativos. Geralmente, a viabilidade econômica e a lucratividade podem ser alcançadas quando a planta é capaz de produzir energia de 50 a 100 MW [1,44]. Para reduzir o risco financeiro e reduzir o custo de produção de eletricidade, as usinas de CSP de torre de energia (ou seja, usinas comerciais com capacidade > 30MW) são aconselhadas a hibridar com o Rankine de ciclo combinado de gás natural, óleo de carvão ou óleo de Rankine orgânico [44,45]. Devido ao baixo custo de energia solar fotovoltaica, muitos dos investidores em tecnologia CSP estavam se movendo em direção à tecnologia. No entanto, existe um potencial para integrar um CSP SPT com energia solar fotovoltaica. Atualmente, a capacidade instalada operacional total das usinas SPT-CSP atingiu 618,42MW em todo o mundo e está se expandindo rapidamente.

Em 2007, a primeira usina comercial de torre de força foi estabelecida na Espanha, denominada Planta Solar 10, com capacidade de 11,02MW. A área total da planta é de 55ha e a geração planejada de eletricidade é avaliada em 23.400MWh/ano. Conforme mencionado anteriormente, a maior usina que utiliza essa tecnologia foi criada em 2014 e está localizada nos Estados Unidos, denominada Ivanpah Solar Electric Generating System, com uma capacidade bruta de turbina de 392MW. Essa planta comercial se espalha por uma das maiores áreas terrestres, de 3500 hectares, e a geração de eletricidade a partir da planta é projetada em 1.079.232MWh / ano. Entre as plantas em operação, a usina Greenway CSP Mersin Tower, na Turquia, e a usina de Dahan, na China, são as duas menores, com uma capacidade de 1 MW cada; estabelecidos para fins de demonstração e experimentais. A radiação solar média diária em um ano na cidade/região na China e na Turquia onde as usinas foram instaladas é de 3,73kWh/m²/dia e 4,78kWh/m²/dia, respectivamente.

A mais recente planta operacional de torre de energia, chamada Khi Solar One, e localizada na África do Sul, foi estabelecida em 2016; tem capacidade para 50 MW e a geração esperada de eletricidade será de 180.000 MW/ano [32]. O SPT é uma das tecnologias CSP de crescimento mais rápido. Atualmente, existem 6 usinas em construção, com uma capacidade instalada total de 632,5 MW e das quais o projeto Golmud, localizado na China, deverá contribuir com 200 MW a partir de 2018. O recurso solar calculado para o projeto é 2158kWh/m²/ano e a geração estimada de eletricidade será de 1.120.000MWh/ano. Em futuro próximo, as usinas em desenvolvimento baseadas na tecnologia de torre de energia atingirão cerca de 995MW e a maior parte da usina estará localizada na China [32].

Figura 4: Greenway CSP Mersin Tower, na Turquia.



Fonte: [46]

3.4 Refletor Fresnel Linear (LFR)

As plantas LFR-CSP consistem em uma série de tiras lineares de espelho como refletores, com receptores, sistema de rastreamento, sistema de processo e instrumentação, turbina a vapor e gerador. Os refletores são os componentes mais importantes no sistema e o mecanismo dos refletores é o mesmo das lentes de Fresnel. Os raios de solares são refletidos pelas lentes de Fresnel e focados em um ponto, geralmente em um receptor permanente em uma torre linear. Durante o dia, os refletores de Fresnel são direcionados automaticamente para o sol e, a partir daí, a irradiação solar refletida segue para a torre linear, onde um receptor em forma de cilindro longo contém vários tubos cheios de água. Com a alta radiação solar, a água evapora e, sob pressão, entra na turbina a vapor que gira um gerador que gera eletricidade [1,46-47]. A Fig. 5 mostra os principais componentes de uma usina LFR e a usina termo solar Puerto Errado 2, de 1,4 MW. Um LFR é composto de várias tiras de espelho lineares. Esse tipo de refletor também pode assemelhar-se ao desmontado de um sistema de valas parabólicas. Usando o design do refletor Fresnel, o custo de capital dos refletores se torna mais baixo, porém, a eficiência é menor do que com os refletores de calha parabólica [30,36]. As capacidades das usinas LFR CSP variam de 10 a 200MW e a eficiência solar-elétrica anual é estimada em 8 a 10% [38]. Em 1999, a maior planta de LFR CSP foi construída pela empresa belga Solarmundo em uma base de protótipo, com uma largura de coletor de 24m e área de refletor de 2500m² [39]. Em 2014, a maior planta operacional de CSP linear de Fresnel-refletor foi instalada na Índia, com uma capacidade de 125MW e uma geração planejada de eletricidade de 280.000MWh/ano.

Além disso, a Usina Termelétrica Solar Kimberlina nos Estados Unidos (5MW) e a Usina Rende-CSP, Itália (1MW) são as duas usinas lineares de CSP lineares baseadas em refletores de Fresnel que foram construídas para demonstração, enquanto a Usina Liddell, A Austrália (9 MW) e a Usina Termo solar Puerto Errado 2, Espanha (30 MW) foram construídas para produção comercial em 2012. Alba Nova 1, França (12MW) e IRESEN, um projeto piloto de 1MWe CSP-ORC, Marrocos (1 MW) são usinas atualmente em construção. Na China, existem quatro plantas lineares de Fresnel CSP em desenvolvimento cuja capacidade será de 50 MW cada [32].

Figura 5: Usina Termosolar Puerto Errado2, Espanha [48].



Fonte:[48]

3.5 Status dos Projetos de CSP

Identificou-se que, embora a primeira planta de CSP tenha sido instalada nos EUA em 1982, essa tecnologia está se expandindo rapidamente em todo o mundo e, como resultado, existem atualmente 98 plantas de CSP ativas, enquanto 18 estão em construção e 24 estão em desenvolvimento. A Tabela 1 mostra o número total de plantas de CSP que estão instaladas, em construção e em desenvolvimento, em todo o mundo.

Tabela 1: Número de plantas CSP no mundo.

Tipos de plantas CSP	Em operação	Em Construção	Em desenvolvimento
PTC's	77	10	10
SPT	13	6	10
SPD's	1	0	0
LFR's	7	2	4
Total	98	18	24

Fonte: [32]

Espera-se que a tecnologia CSP cresça rapidamente em todo o mundo, especialmente na Ásia, nos países MENA e na América do Sul. A disponibilidade solar diária, uma fonte suficiente de água para o resfriamento e a limpeza dos refletores são cruciais para o desenvolvimento das plantas de CSP [49]. Uma variedade de custos, incluindo custo de capital, custo básico e de operação e manutenção, eficiência, requisitos de terra e água e outros são comparados.

Para todas as tecnologias, os requisitos de radiação solar, terra e água foram de 1800kWh/m², 5–7acres/MW e 4m³/MWh, respectivamente. Outra pesquisa de PitzPaal [50] indicou que a área de assistência médica e de assistência médica é uma área desprezível do que as outras duas tecnologias de CSP, especialmente um SPD com a mesma capacidade. No entanto, a partir da experiência instalada da planta CSP, verifica-se que os SPT's exigem a maior área. Mas, novamente, a área depende da presença de instalações de armazenamento de calor. Se o armazenamento de calor não estiver sendo considerado, o requisito de área terrestre será de 25m² / kW para o PTC e 45m²/kW para o SPT [51].

Os sistemas PTC e LFR são adequados para capacidades de geração de energia de 10MW a 200MW, para SPT 10–150MW e, finalmente, a capacidade do SPD varia de 0,01MW a 0,4MW, o que é adequado para geração pequena e fora de rede. No entanto, a tecnologia parabólica-vala é a mais comprovada, o SPT está maduro e os SPDs e os LFRs estão na fase de demonstração. Diferentemente da baixa capacidade, os SPD's

têm a maior taxa de concentração, variando de 1000 a 3000, uma das mais altas entre todas as outras tecnologias de CSP; o PTC e LFR estão baixos e o SPT na faixa intermediária. Devido à alta taxa de concentração, o sistema SPD pode atingir temperaturas muito altas (800 ° C) e, assim, alcançar alta eficiência. SPT's e SPD's são considerados as plantas de CSP mais eficientes, com uma eficiência 50% melhor do que as plantas de calha e Fresnel. A eficiência anual de conversão solar em elétrica é maior para SPD's e LFR's do que para PTC e SPT. Como demonstrado, SPD's e LFR's têm eficiência de 29% e 21%, respectivamente. Por outro lado, pesquisas de Ummadisingu e Soni [5] descobriram que SPD's e LFR's têm eficiência solar-elétrica de 25 a 30%. Embora os SPD's possuam a maior eficiência, o custo básico da planta, de operação e manutenção e os de capital são os mais altos entre as plantas, com a LFRs sendo a mais baixa. Para o SPD e o SPT, o uso da terra é de 8 a 12 m²/MWh/ano, com 6 a 8 m²/MWh/ano para o PTC e 4 a 6 m²/MWh/ano para o LFR [41].

Esse desenvolvimento histórico holístico e o progresso atual na tecnologia CSP foram alcançados através de intensa pesquisa e desenvolvimento por organizações e universidades globais de pesquisa. Embora os artigos de revisão anteriores produzidos sobre o tema discutissem muitos avanços tecnológicos e questões relacionadas ao CSP, é necessário entender o progresso geral da pesquisa, analisando-os.

4. Conclusão

A cogeração de eletricidade a partir de fontes de energia convencionais cria vários gargalos, como o risco de uma queda repentina na quantidade de suprimento, a emissão de grandes GEE como CO₂ e uma ameaça à sustentabilidade ambiental geral. Por outro lado, as fontes de energia renovável fornecem carga abundante, limpa e sustentável que estará claramente na vanguarda em termos de fornecimento inesgotável de energia. O CSP é capaz de cogerar eletricidade a granel e muitas das nações industrializadas estão investindo pesadamente em tecnologia de CSP.

Entre os quatro tipos diferentes de tecnologias de CSP, o coletor de valas parabólicas (PTC) e a torre de energia solar (SPT) são as duas tecnologias populares atualmente instaladas em muitos países, como Espanha, EUA, China e Índia. Pesquisas e publicações sobre CSP estão se expandindo em um ritmo tremendo. Com as pesquisas feitas na base de dados SCOPUS, uma análise bibliométrica da pesquisa sobre CSP foi realizada e o cenário científico dos tópicos mais amplamente pesquisados e emergentes e dos artigos mais influentes foram identificados e revisados.

A tecnologia de geração direta de vapor (DSG) do coletor PTC é um tópico de pesquisa em evolução comparativa que possui oportunidade de hibridar com outras tecnologias de CSP para produção de eletricidade e calor térmico. Outros tópicos de pesquisa em potencial sobre CSP são: otimização de campos solares (solar múltiplo); estimativa de custo nivelado de eletricidade com análise de sensibilidade; aplicação de modelo de sistema consultivo (SAM) no desenvolvimento de instalações de CSP; implementação de mecanismo de ciclo orgânico para produção de calor e energia; investigação sobre o ciclo de potência de CO₂ supercrítico em plantas de CSP; análise de desempenho do ciclo de cálcio e armazenamento de energia termoquímica nos sistemas de CSP.

5. Referências

- [1] Pavlović TM, Radonjić IS, Milosavljević DD, Pantić LS. A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia. *Renew Sustain Energy Rev* 2012; 16:3891–902.
- [2] Hasan M, Mahlia T, Nur H. A review on energy scenario and sustainable energy in Indonesia. *Renew Sustain Energy Rev* 2012; 16:2316–28.
- [3] WPB. World population balance population and energy consumption. Available from <http://www.worldpopulationbalance.org/population_energy>; 2015 [Last accessed on 10 October 2016].
- [4] ZhangZ, YuanY, ZhangN, SunQ, CaoX, SunL. Thermal properti esen for cement of carbonate ternary via lithium fluoride: a heat transfer fluid for concentrating solar power systems. *Renew Energy* 2017; 111:523–31.
- [5] Ummadisingu A, Soni M. Concentrating solar power–technology, potential and policy in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:5169–75.
- [6] Ahmed S, Islam MT, Karim MA, Karim NM. Exploitation of renewable energy for sustainable development and overcoming power crisis in Bangladesh. *Renew Energy* 2014; 72:223–35.
- [7] Acordo De Paris, Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 25 de novembro

de 2019.

- [8] Sims RE, Rogner H-H, Gregory K. Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation. *Energy Policy* 2003; 31:1315–26.
- [9] IEA. *Energy Technology Perspectives 2015: Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. Paris: IEA. Available from https://www.iea.org/newsroomandevents/speeches/150504_ETP_slides.pdf; 2015 [Last accessed on 17 November 2015].
- [10] Sharma A. A comprehensive study of solar power in India and World. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:1767–76.
- [11] Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf>. Acesso em: 25 de novembro de 2019.
- [12] Sun J, Liu Q, Hong H. Numerical study of parabolic-trough direct steam generation loop in recirculation mode: characteristics, performance and general operation strategy. *Energy Convers Manag* 2015; 96:287–302.
- [13] SolarPACES. Solar thermal electricity global outlook 2016. Available from http://www.solarpaces.org/images/GP-ESTELA-SolarPACES_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016_Executive-Summary.pdf; 2016 [Last accessed on 07 May 2016].
- [14] Izquierdo S, Montanes C, Dopazo C, Fueyo N. Analysis of CSP plants for the definition of energy policies: the influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage. *Energy Policy* 2010; 38:6215–21.
- [15] Teske S, Leung J, Crespo L, Bial M, Dufour E, Richter C, et al. *Solar thermal electricity: Global outlook 2016*. Eur Sol Therm Electr Assoc 2016. [20] Philibert C. *Technology roadmap: concentrating solar power: OECD/IEA; 2010*.
- [16] CEC. California Energy Commission solar power plant licensing projects. Available from http://www.energy.ca.gov/maps/renewable/Solar_Power_Plant_Licensing_Projects.pdf; 2014 [Last accessed on 04 May 2017].
- [17] Richter C, Teske S, Nebreira J. *Concentrating solar power global outlook 09*. Greenpeace International/European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA)/IEA SolarPACES, Report; 2009.
- [18] EU. European Commission, Energy Research Knowledge Centre (ERKC). Thematic research summary – concentrating solar power. Available from https://setis.ec.europa.eu/energy-research/sites/default/files/library/ERKC_TRS_Concentrating_solar_power.pdf; 2013 [Last accessed on 04 May 2017].
- [19] Pitz-Paal R. *Encyclopedia of life support system (EOLSS) high temperature solar concentrators*. Available from [http://www.eolss.net/ebooks/Sample %20Chapters/C08/E6-106-06-00.pdf](http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C08/E6-106-06-00.pdf); 2007 [Last accessed on 04 May 2017].
- [20] Crane K, Curtright AE, Ortiz DS, Samaras C, Burger N. The economic costs of reducing greenhouse gas emissions under a US national renewable electricity mandate. *Energy Policy* 2011; 39:2730–9.
- [21] Peters M, Schmidt TS, Wiederkehr D, Schneider M. Shedding light on solar technologies—a techno-economic assessment and its policy implications. *Energy Policy* 2011; 39:6422–39.
- [22] Santos-Alamillos FJ, Pozo-Vázquez D, Ruiz-Arias JA, Von Bremen L, Tovar Pescador J. Combining wind farms with concentrating solar plants to provide stable renewable power. *Renew Energy* 2015; 76:539–50.
- [23] Kaygusuz K. Prospect of concentrating solar power in Turkey: the sustainable future. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:808–14.
- [24] SolarPACES. SolarPACES technology characterizations solar dish systems. Available from http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solar_dish.pdf; 2016 [Last accessed on 10 October 2016].
- [25] Ab Kadir MZA, Rafeeu Y, Adam NM. Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:3023–31.
- [26] Braun FG, Hooper E, Wand R, Zloczysti P. Holding a candle to innovation in concentrating solar power technologies: a study drawing on patent data. *Energy Policy* 2011; 39:2441–56.
- [27] Cavallaro F. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renew Energy* 2009; 34:1678–85.
- [28] Poullikkas A, Kourtis G, Hadjipaschalis I. Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in Mediterranean regions. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:2772–83.
- [29] El-Tous Y. Assessment of one-axis concentrating solar power technologies in Jordan using fuzzy logic. *Int J Energy Convers (IRECON)* 2013; 1:238–42.

- [30] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. *Progress Energy Combust Sci* 2004; 30:231–95.
- [31] Lovegrove K, Taumoefolau T, Paitoonsurikarn S, Siangsukone P, Burgess G, Luzzi A, et al. Paraboloidal dish solar concentrators for multi-megawatt power generation. In: *Proceedings of the ISES*; 2003. p. 14–9.
- [32] SolarPACES. CSP projects around the world. Available from (<http://www.solarpaces.org/csp-technology/csp-projects-around-the-world>); 2016 [Last accessed on 07 May 2016].
- [33] Mohamad A, Orfi J, Alansary H. Heat losses from parabolic trough solar collectors. *Int J Energy Res* 2014; 38:20–8.
- [34] Fernández-García A, Zarza E, Valenzuela L, Pérez M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:1695–721.
- [35] CRESESB. Centro de Referência para as energias solar e eólica Sergio de S. Brito, 2016. Coletores Solares (Concentradores cilíndricos-parabólicos). Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=561. Acesso em: 25, novembro de 2019
- [36] IEA. International Energy Agency Technology Roadmap – concentrating solar power. Available from (https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf); 2010 [Last accessed on 12 October 2016].
- [37] Manzolini G, Giostri A, Saccilotto C, Silva P, Macchi E. Development of an innovative code for the design of thermodynamic solar power plants part A: code description and test case. *Renew Energy* 2011; 36:1993–2003.
- [38] Müller-Steinhagen H, Trieb F, Trieb F. Concentrating solar power: a review of the technology. Available from (http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Concentrating_Solar_Power_Part_1.pdf); 2004 [Last accessed on 16 October 2016].
- [39] Brakmann G, Aringhoff R, Geyer M. ESTIA, Brussels: Greenpeace International, Amsterdam, IEA SolarPACES Implementing Agreement. Concentrated solar thermal power – now! Available from (<http://www.preppers.info/uploads/Concentrated-Solar-Thermal-Power.pdf>); 2005 [Last accessed on 04 May 2017].
- [40] USDOE. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy concentrating solar power. Available from (<http://energy.gov/eere/sunshot/concentrating-solarpower>); 2016 [Last accessed on 16 October 2016].
- [41] Nixon J, Dey P, Davies P. Which is the best solar thermal collection technology for electricity generation in north-west India? Evaluation of options using the analytical hierarchy process. *Energy* 2010; 35:5230–40.
- [42] Sharma C, Sharma AK, Mullick SC, Kandpal TC. Assessment of solar thermal power generation potential in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2015; 42:902–12.
- [43] Alexopoulos S, Hoffschmidt B. Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus. *Renew Energy* 2010; 35:1352–6.
- [44] SolarPACES. Technology characterization solar power towers. Available from (http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solar_tower.pdf); 2016 [Last accessed on 16 October 2016].
- [45] Manente G, Rech S, Lazzaretto A. Optimum choice and placement of concentrating solar power technologies in integrated solar combined cycle systems. *Renew Energy* 2016; 96:172–89.
- [46] El Gharbi N, Derbal H, Bouaichaoui S, Said N. A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies. *Energy Procedia* 2011; 6:565–72.
- [47] Zhang H, Baeyens J, Degrève J, Cacères G. Concentrated solar power plants: review and design methodology. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 22:466–81.
- [48] Halil Berberoglu. Fuel Production Using Concentrated Solar Energy, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258912027_Fuel_Production_Using_Concentrated_Solar_Energy. Acesso em: 25, novembro de 2019
- [49] Charabi Y, Gastli A. GIS assessment of large CSP plant in Duqum, Oman. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:835–41.
- [50] Pitz-Paal R, Dersch J, Milow B. German Aerospace Center European concentrated solar thermal road-mapping. Available from (<http://www.promes.cnrs.fr/uploads/pdfs/ecostar/ECOSTAR.Roadmap.pdf>); 2004 [Last accessed on 04 May 2017].
- [51] Poullikkas A. Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region— a case study for the island of Cyprus. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13:2474–84.