

Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica da aplicação de chapas de alumínio anodizado no campo solar de Usinas Heliotérmicas

 <https://doi.org/10.56238/sevned2024.018-054>

Vanderlei Affonso Martins

Doutor em Planejamento Energético –
PPE/COPPE/UFRJ
Instituição: FGV Energia
E-mail: professor.vamartins@gmail.com

Mariana Weiss

Doutora em Planejamento Energético –
PPE/COPPE/UFRJ
Instituição: FGV Energia
E-mail: mariweiss@uol.com.br

Rafael Soria

Doutor em Planejamento Energético –
PPE/COPPE/UFRJ
Instituição: FGV Energia
E-mail: rsoriap@usfq.edu.ec

Caio Porciúncula

Mestre em Engenharia Ambiental – COPPE/UFRJ

Instituição: FGV Energia
E-mail: cpcosta@firjan.com.br

Ricardo Bicudo

Mestre em Ciências Engenharia pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA)
Instituição: FGV Energia
E-mail: rbicudo@firjan.com.br

Paulo Cunha

Mestre em Regulação da Indústria da Energia pela UNIFACS
Instituição: FGV Energia
E-mail: paulocesar.cunha@fgv.br

Felipe Gonçalves

Mestre em Engenharia de Produção - PEP/COPPE/UFRJ
Instituição: FGV Energia
E-mail: felipe.goncalves@fgv.br

RESUMO

O trabalho analisa a viabilidade técnica econômica da aplicação de chapas de alumínio anodizado, no lugar de espelhos de vidro, no campo solar de plantas heliotérmicas de cilindro parabólico. Avalia-se a adaptação desta tecnologia para o caso brasileiro. A partir da análise qualitativa das especificações técnicas dos dois tipos de refletores, e das simulações realizadas no SAM, é possível concluir que os sistemas com refletores de vidro têm melhores propriedades do que os espelhos de alumínio, porém, desde o ponto de vista Econômico, os espelhos de alumínio permitiriam atingir viabilidade econômica a projetos que operam em faixas de temperatura média.

Palavras-chave: Heliotérmica, Concentração solar, Cilindro parabólico, Refletor de alumínio anodizado, Refletor de espelho de vidro.



1 INTRODUÇÃO

A tecnologia heliotérmica é capaz de gerar energia na forma de calor e de eletricidade através da transformação da irradiação solar direta (DNI). Apresentando vantagens sobre outras fontes de energia renovável, como a eólica e a solar fotovoltaica, a geração heliotérmica se mostra flexível e passível de ser despachada (13).

Devido à sua capacidade de armazenar energia na forma de calor, de gerar eletricidade e calor de processo, inclusive para cogeração, e de ser hibridizada com diversas outras fontes energéticas, as plantas heliotérmicas normalmente apresentam um fator de capacidade superior ao das outras renováveis, podendo tanto operar na base com energia firme, como atender as cargas no pico e à demanda por serviços auxiliares em qualquer período do dia (1); (4); (12).

Como foi ressaltado no Plano de Expansão do Setor Elétrico do Brasil (8), vem sendo buscadas alternativas para o atendimento ao pico e às oscilações de demanda que garantam a segurança e a estabilidade do sistema, mas que também contribuam para a modicidade tarifária e para redução de emissões de gases de efeito estufa. Tais características, somadas ao fato de o Brasil apresentar um grande potencial para geração heliotérmica devido à grande incidência de DNI, vem tornando a tecnologia heliotérmica muito atrativa para o setor elétrico brasileiro.

Contudo, ainda há alguns desafios com relação a esta fonte, principalmente no que tange à sua viabilidade econômica. Segundo o estudo Renewable Cost Database (6) os projetos de CSP vêm apresentando trajetória decrescente de custos nivelado de energia. Porém, esta tecnologia ainda se mostra significativamente mais cara do que as demais fontes renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica onshore, e longe de ser considerada comercial. Com esse objetivo, diversos países vêm buscando novos conceitos de geração heliotérmica que possibilitem o barateamento do processo produtivo de seus componentes e aumentar a sua produtividade.

Neste âmbito, em 2015, a ANEEL realizou a Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 019/2015 "Desenvolvimento de Tecnologia Nacional de Geração Heliotérmica de Energia Elétrica" com o objetivo de estudar a possibilidade de produzir componentes de plantas heliotérmicas no Brasil e estimular o desenvolvimento científico e tecnológico desta fonte energética no Brasil, no qual os autores do artigo participam.

Conforme dados da NREL (10), o campo solar era o componente com maior participação (31%) no custo de investimento numa planta CSP de cilindro parabólico com armazenamento de calor. Uma alternativa para o barateamento do custo do campo solar é a substituição dos espelhos de vidro borossilicato por placas de alumínio anodizado. Apesar de resultar em uma ligeira queda de eficiência e uma menor durabilidade devido às intempéries atmosféricas, a utilização de refletores de alumínio em plantas heliotérmicas se mostra significativamente mais barata, menos complexa de ser produzida e mais fácil de ser transportada.

Além disso, a produção de campos solares para a geração heliotérmica no Brasil poderia ser uma forma de promover a abertura de um novo mercado para a indústria nacional de alumínio, que vêm sofrendo com o alto preço da energia elétrica e com a concorrência com produtos chineses.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo fazer uma análise qualitativa de parâmetros que pode impactar na viabilidade técnica econômica da aplicação de chapas de alumínio anodizado, no lugar de espelhos de vidro borossilicato, no campo solar de plantas heliotérmicas e avaliar a adaptação desta tecnologia para o caso brasileiro, principalmente para as instalações de menor porte que se adequam também às aplicações de cogeração em processos industriais.

2 MATERIAIS DE REFLETORES E SUAS CONFIGURAÇÕES

Neste tópico, serão abordados os referenciais teóricos para materiais de refletores heliotérmicos e suas configurações, de forma a apoiar a metodologia do trabalho. Os coletores para concentração solar requerem o uso de superfícies seletivas com alta refletância especular do espectro solar. Metais reflexivos tipicamente usados em refletores solares são prata e alumínio, devido às boas propriedades reflexivas na faixa espectral da luz solar incidente na Terra. A refletância da prata é consideravelmente maior do que a do alumínio para a maior parte das longitudes de onda (>500 nm). A reflexão hemisférica solar de superfícies prateadas pode atingir no vácuo um máximo de 98%, enquanto para o alumínio o máximo é 92% (3).

As configurações de um refletor solar são usualmente baseadas em metais altamente brilhantes ou revestimentos metálicos colocados sobre substratos como vidro, polímeros ou metais. Quando o substrato é opaco, a capa reflexiva sempre deve ser a superfície de frente, por exemplo, com alumínio polido. Neste caso, o refletor é conhecido como “superfície de frente” ou “primeira superfície”. Estes refletores, para melhorar a durabilidade, podem ter um revestimento frontal muito fino e transparente (<5 μm de espessura). Por outro lado, se um substrato transparente (vidro, metacrilato, policarbonato) é usado, o revestimento reflexivo deve estar na superfície de trás do substrato, sendo conhecido como refletor de “segunda superfície”. Os dois metais requerem revestimentos protetores de alta qualidade para se proteger contra a corrosão. Espelhos de primeira superfície requerem revestimentos transparentes na parte superior. Refletores de segunda superfície sempre contam também com revestimentos protetores por trás (verniz), ou são colados a substratos adicionais.

A caracterização feita na sequência é uma síntese do Capítulo 3 do livro de Heller (3), sobre materiais e configurações de refletores para concentração solar.

2.1 REFLETORES DE SEGUNDA SUPERFÍCIE

2.1.1 Espelhos prateados de vidro grosso

Está composto por uma camada de prata reflexiva revestida pela superfície frontal por uma

camada grossa (3-4 mm) de vidro monolítico. Dado que o vidro pode ter um baixo conteúdo (0,02%) de Fe_2O_3 , que absorve uma parte da irradiação solar, o tipo de vidro usado para a indústria solar é chamado “branco claro” ou vidro de baixo conteúdo de ferro. A camada de prata (com uma densidade média de 0,8 -1,2 g/m²) é extremamente vulnerável aos contaminantes ambiente, humidade ou atmosfera salgada. Por tanto, além da proteção frontal, a proteção por trás também é importante. Esta proteção é conseguida com uma camada de cobre, e dois ou três camadas de tinta de revestimento protetor que contém algo de chumbo (0,5% a 2,5% por peso).

No processo de manufatura do espelho com vidro grosso curvo, o vidro plano é aquecido em fornos sobre um molde parabólico; depois, o vidro é prateado na superfície de trás. Finalmente, a superfície prateada de trás é recoberta com os revestimentos.

Uma refletância elevada é conseguida devido às propriedades intrínsecas da prata, e pode ter pouco de espalhamento devido a que o vidro é um substrato muito liso.

2.1.2 Espelhos prateados de vidro fino

A configuração é muito similar ao espelho de vidro grosso, a principal diferença é a espessura da camada de vidro, de menos de 1 mm. Para obter a forma do coletor e dar robustez ao coletor, os refletores são colados nas estruturas de metal, polímero ou material composto. A refletância é inclusive maior ao refletor de vidro grosso porque a camada de vidro superior é mais fina, e como consequência, a trajetória ótica dos raios solares é menor. Estes refletores são mais leves e mais baratos que os de vidro grosso, mas o custo da estrutura posterior deve ser adicionado.

2.1.3 Espelhos prateados de vidro laminado

Estes refletores usam prata como camada refletiva, protegida por uma camada de vidro pelos dois lados, frontal e posterior, similar aos para-brisas dos autos. A refletância é similar ao refletor de vidro fino, porque a camada frontal de vidro tipicamente tem entre 1 a 2 mm de espessura. A espessura total do refletor é similar ao do refletor de vidro grosso. A forma é dada durante o processo térmico de manufatura. A resistência e durabilidade deste espelho são maiores aos dos anteriores, porém o custo de produção é maior.

2.2 REFLETORES DE PRIMEIRA SUPERFÍCIE

2.2.1 Espelho de alumínio anodizado

Dependendo do revestimento superior, vários refletores de alumínio estão disponíveis. O mais conhecido é construído com deposição de alumínio puro sobre um substrato de alumínio polido com uma camada de óxido de alumínio entre as duas (anodizado) e alguns revestimentos transparentes na parte superior. Por exemplo, com uma camada de alumina (SiO_2), que é útil para proteger contra a

abrasão e corrosão. Outros refletores usam como camada superior revestimentos orgânicos ou alumínio anodizado.

Refletores de alumínio são cada vez mais usados para aplicações de concentração solar devido ao baixo peso, alta ductilidade (eles suportam as cargas de vento sem sofrer danos), e pela flexibilidade no design, construção e montagem. Também o processo de manufatura permite produção massiva: processo de bobinado. Em consequência, estes refletores apresentam um potencial para a redução de custos em comparação aos espelhos de vidro.

Por outro lado, além da baixa refletância do alumínio, a marca do processo de bobinado gera uma superfície mais rugosa que a dos espelhos de vidro, o que conduz a maior espalhamento da irradiação solar. A menor refletância do alumínio em comparação à prata faz com que os refletores de alumínio sejam mais apropriados para aplicações de geração de calor para processos industriais (SHIP), e não tão apropriados para geração elétrica (CSP). Adicionalmente, o tempo de duração destes refletores em ambientes urbanos, industriais e poluídos é menor aos de prata. Para incrementar a duração, coberturas de vidro plano podem ser adicionadas no plano de abertura em cilindros parabólicos de pequeno porte.

2.2.2 Espelhos de filme de polímero prateado

Estes espelhos usam uma capa reflexiva de prata protegida na parte frontal por várias camadas de polímeros, e depositada sobre um substrato (geralmente também é um polímero). O substrato de polímero limita a temperatura (60-80°C) durante a deposição da prata. Este material é de peso leve e flexível, por tanto é fácil adaptá-lo ao coletor parabólico. O processo de colado do filme prateado ao substrato (vidro, metacrilato, policarbonato) deve ser feito com grande cuidado para evitar que bolhas fiquem presas, o que pode desviar os raios refletidos.

3 METODOLOGIA

A comparação entre os dois tipos de campo solar (espelho de vidro e espelho de alumínio) será feita, num primeiro momento, através da análise qualitativa das especificações técnicas de dois tipos de coletores de cilindro parabólico comerciais. Foram escolhidos dois tipos de coletores de cilindro parabólico (tabela 1 e figura 1):

- a) coletores de grande porte com superfície refletiva de espelho de vidro, marca Solargenix, e receptor Schott PTR-70;
- b) coletores de pequeno porte, de superfície de alumínio anodizado, e receptor, os dois de marca mexicana Inventive Power.

Num segundo momento, o software System Advisor Model (SAM) foi usado para simular a operação de projetos de concentração solar no Brasil, em Bom Jesús de Lapa –NE, usando os dois tipos de sistemas antes descritos (usando as propriedades apresentadas na tabela 1).

Para a segunda parte, da simulação de projetos usando os dois tipos de coletores, foi usado o software System Advisor Model (SAM). O SAM é um software de uso livre, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL). O SAM foi escolhido devido à versatilidade que ele apresenta através do seu módulo para avaliar projetos de geração de calor de processo com concentradores solares. Destaca-se que para atender aos objetivos do trabalho, de analisar a viabilidade técnica e econômica de projetos com espelho de vidro ou de alumínio, simulou-se unicamente a geração de calor no campo solar. Não foi simulada a geração elétrica, que seria possível ao aproveitar o calor gerado no campo solar num bloco de potência, após a troca de calor entre o fluido térmico circulando pelo campo solar e o fluido de trabalho. Vários autores já usaram o modelo SAM, para diversos trabalhos de pesquisa na área de CSP no Brasil, por exemplo: na avaliação de plantas CSP hibridizadas com biomassa no Nordeste brasileiro (14).

FIGURA 1 - Coletores de cilindro parabólico comerciais.



(a) coletores de grande porte com superfície refletiva de espelho de vidro Solargenix e receptor Schott PTR-70. (b) coletores de superfície de alumínio anodizado e receptor, marca Inventive Power.

O modelo SAM é capaz de integrar o financiamento, os incentivos, os custos e o desempenho de uma planta de concentração solar dentro de um modelo único, possibilitando uma análise consistente para uma boa tomada de decisão, olhando tanto questões tecnológicas quanto financeiras (15); (9).

Adicionalmente, o SAM tem a capacidade de usar uma variedade de dados climatológicos em diversos formatos (TMY3, TMY2, EPW), que reúnem as informações necessárias (DNI, velocidade do vento e temperatura ambiente) para o desenho do campo solar e para o cálculo da energia gerada ao longo de um ano típico em intervalos de uma hora (11).

Os dados apresentados na Tabela 1 foram usados para configurar os dois sistemas de concentração solar simulados: a) de grande escala, com coletores que tem refletores de espelho de vidro, e, b) de pequena escala, com coletores que tem refletores de alumínio. Também foram considerados os custos de capital, de O&M fixo e variável, apresentados na Tabela 2.

Soria et al. (14) comunicaram-se diretamente com a empresa canadense Naanovo Company, que manifestou interesse em participar do mercado brasileiro para desenvolver projetos CSP. A companhia indicou que usando coletores de alumínio anodizado SolarMaax e receptores Schott, de menor porte, e instalando uma planta de montagem na região do Nordeste, seria possível atingir um custo de capital de 10% a 20% menor do que em projetos típicos baseados em refletores de espelho de vidro. Esta hipótese é justificada pelo aprendizado tecnológico no nível mundial no período 2020 – 2025 (2); (5); (7), mas também à redução de custos de importação e de transporte até os lugares de projeto.

Tabela 1. Comparação das especificações técnicas de coletores de cilindro parabólico com espelho de vidro e com espelho de alumínio.

Características gerais e especificações técnicas de coletores cilindro parabólicos		Unidade	Projetos de grande escala, coletores de vidro	Projetos de pequena escala, coletores de alumínio	
Caraterísticas gerais	Faixa de temperatura - calor solar para processos industriais	°C	90-260	45-130	
	Tempo de vida	anos	40	>20	
Coletor	Geometria do coletor	Coletor	Solargenix SGX-1	Inventive Power - PT 110 ®	
		Superfície reflexiva	Espelho de vidro	Alumínio anodizado - lâminarefletiva ALANOD Miro Sun	
		Área de abertura da superfície reflexiva	m ²	470,3	3,09
		Largura total da superfície reflexiva com estrutura	m	5	1,21
		Comprimento de um coletor	m	8,33	3,05
		Distância média entre a superfície reflexiva e o foco	m	1,8	0,341
		Distância média de tubulação entre montagens	m	1	1
	Parâmetros ópticos	Erro de rastreamento		0,994	0,988
	Efeitos da geometria		0,98	0,952	

		Refletância da superfície reflexiva		0,935	0,90
		Sujeira da superfície reflexiva		0,97	0,97
		Erro óptico geral		0,99	1
	Cálculos ópticos do coletor	IAM no solstício de verão		1,00361	0,999903
		Perda final no solstício de verão		0,999752	0,994658
		Eficiência óptica no design		0,874643	0,821123
Receptor	Geometria do receptor	Receptor		Schott PTR70	Inventive Power -PT 110
		Diâmetro interior do tubo absorvedor	m	0,066	0,030
		Diâmetro exterior do tubo absorvedor	m	0,07	0,033
		Diâmetro interior do envelope de vidro	m	0,115	0,0656
		Diâmetro exterior do envelope de vidro	m	0,125	0,07
		Tipo de material do envelope de vidro		Borossilicato	Borossilicato
		Diâmetro do bujão de fluxo do absorvedor	m	0	0
		Rugosidade da superfície interna		$4,5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
		Tipo de material absorvedor		AISI 304L	AISI 304
	Receptor: parâmetros e variações	Absortividade do absorvedor, com revestimento seletivo		0,96	0,87 (revestimento Solkote)
		Emitância do absorvedor, com revestimento seletivo		0,095	0,35 (revestimento Solkote)
		Emitância do envelope de vidro		0,86	0,85
		Transmitância do envelope de vidro		0,97	0,92
		Revestimento do vidro		Antirreflexo	n.a.
	Receptor: Perdas ponderadas totais	Redução óptica		0,869751	0,733407
Perda de calor no ponto de design		W/m	190	n.d.	

Fonte: elaboração própria a partir de (13), (14) e (15).

Tabela 2. Custos de capital, custo de O&M fixo e variável, para os sistemas simulados.

Material	Custo de capital (USD/kW-t)	O&M fixo (USD/kW)	O&M variável (USD/kWh-t)
Com espelho de vidro	560	8	0,001
Com alumínio anodizado	500-400	7	0,001

Fonte: elaboração própria a partir de (13), (14) e (15).

Tabela 3. Resultados para comparação entre espelho de vidro e de alumínio.

Material	Eficiência Média (%)	Relação superfíciepotência instalada (Wt/m ²)	Redução no LCOH	Conteúdo local no projeto (%)
Com espelho de vidro	61	150	Referência	Médio
Com alumínio anodizado	48	90	7% a 12%	Alto

Fonte: elaboração própria a partir de (13), (14) e (15).

O System Advisor Model (SAM) integra financiamento, incentivos, custos e desempenho de uma planta de concentração solar em um único modelo, permitindo uma análise consistente para a tomada de decisão, abordando aspectos tecnológicos e financeiros.

Adicionalmente, o SAM pode utilizar diversos dados climatológicos em formatos variados (TMY3, TMY2, EPW), que incluem informações essenciais como DNI, velocidade do vento e temperatura ambiente. Esses dados são cruciais para o design do campo solar e para calcular a energia gerada ao longo de um ano típico em intervalos horários.

Assim, os dados na Tabela 1 foram usados para configurar dois sistemas de concentração solar simulados em refletores de espelho de vidro e alumínio anodizado. Também foram considerados os custos de capital e de O&M fixo e variável, conforme apresentados na Tabela 2. E a partir dessas construções, foi possível estabelecer as comparações de projetos entre as duas tecnologias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise qualitativa das especificações técnicas dos dois tipos de refletores, e das simulações realizadas no SAM, é evidente que os sistemas com refletores de vidro têm melhores propriedades do que os espelhos de alumínio. Porém, do ponto de vista econômico, os espelhos de alumínio permitiriam atingir viabilidade econômica em alguns projetos, como mostra a Tabela 3.

O espelho de vidro devido a melhor refletância, menor erro óptico, melhor eficiência óptica, maior tamanho de cada unidade coletora e maior tempo de vida, é apropriado para projetos de grande escala de geração elétrica ou de calor de processo industrial de alta temperatura (90 – 260°C). Por outro lado, os coletores com espelho de vidro apresentam um maior custo de capital, o que dificulta o acesso ao financiamento, assim como a despesa com o pagamento de juros será maior, e finalmente, conduz a uma energia final mais cara. Assim, recomenda-se usar esta tecnologia para grandes projetos que demandam maiores temperaturas de trabalho, e onde o valor do terreno é alto e faz sentido instalar sistemas de alta eficiência, dado que estes requerem uma área instalada menor para gerar a mesma quantidade de energia.

Os coletores com espelho de vidro apresentam também uma maior vida útil. Muitas pesquisas, no entanto, vêm focando em técnicas para melhorar o design e as características técnicas de refletores de alumínio. Por exemplo, o desenvolvimento de revestimentos mais sofisticados para o alumínio permitiria estender a vida útil do sistema.

Dado que têm menor superfície de captação solar e conseqüentemente maior modularidade, os projetos que consideram espelhos de alumínio são apropriados para projetos menores que operam numa faixa de temperatura média (45–130°C), sendo ideais para geração de calor para processos industriais, por exemplo.

Por outro lado, os sistemas com espelhos de alumínio precisam de maior área de captação por

unidade de capacidade instalada para compensar a sua menor eficiência óptica e de conversão de energia. Entretanto, apesar de sua menor eficiência, devido ao baixo custo de capital, o custo nivelado do calor em projetos baseados em refletores de alumínio tende a ser de 7 a 12% menor em comparação a projetos que usam espelho de vidro (tabela 3).

Vale, no entanto, lembrar que esta diferença de custo nivelado pode ser alterada caso seja considerado financiamento para o projeto. Devido ao menor custo de capital de plantas heliotérmicas com espelhos de alumínio, estas apresentam um acesso facilitado a linhas de financiamento. As plantas com espelho de alumínio devido ao seu porte podem se adequar a linhas de financiamento estratégicas com taxas mais atrativas.

No caso simulado, a menor eficiência do coletor com superfície refletiva de alumínio também deve ser explicada pelas propriedades térmicas do receptor: menor absortividade do tubo receptor, menor transmitância do envelope de vidro, menor eficiência óptica etc.

5 CONCLUSÃO

A análise qualitativa e quantitativa das especificações técnicas dos coletores de cilindro parabólico com refletores de vidro e alumínio, complementada pelas simulações no System Advisor Model (SAM), revelou importantes visões sobre a viabilidade técnica e econômica de cada sistema. Os refletores de vidro se destacam por suas melhores propriedades ópticas, menor erro óptico, maior eficiência e durabilidade, sendo mais indicados para grandes projetos que demandam altas temperaturas de operação. Em contraste, os refletores de alumínio, apesar de apresentarem menor eficiência e maior necessidade de área de captação, mostram-se economicamente viáveis em certos projetos devido ao menor custo de capital.

Os coletores de vidro, com sua alta refletância e eficiência óptica, são ideais para projetos de grande escala voltados para a geração de eletricidade ou calor de processo industrial de alta temperatura (90 – 260°C). No entanto, o alto custo de capital e as dificuldades associadas ao financiamento tornam esses sistemas menos acessíveis, aumentando o custo final da energia gerada. A maior vida útil dos coletores de vidro também justifica seu uso em projetos onde a durabilidade e a eficiência a longo prazo são cruciais.

Por outro lado, os coletores de alumínio, com custos iniciais mais baixos e maior modularidade, são mais adequados para projetos menores e de temperatura média (45 – 130°C), como a geração de calor para processos industriais. Apesar de sua menor eficiência, o custo nivelado do calor em projetos com refletores de alumínio tende a ser de 7 a 12% menor em comparação aos projetos com espelho de vidro. Esse fator, aliado ao acesso facilitado a linhas de financiamento devido ao menor custo de capital, torna os coletores de alumínio uma opção atraente para certos projetos.

A menor eficiência dos coletores de alumínio pode ser atribuída não apenas às suas



características ópticas, mas também às propriedades térmicas do receptor, como menor absortividade do tubo receptor e menor transmitância do envelope de vidro. Isso ressalta a necessidade de melhorias no design e na tecnologia desses sistemas para aumentar sua competitividade.

Como recomendação de estudos futuros, podem ser citados investimentos em diversas partes e componentes da planta heliotérmica. Como exemplo, podem ser citados seguintes desenvolvimentos:

- Revestimentos Avançados para Refletores de Alumínio, no qual as pesquisas devem focar no desenvolvimento de revestimentos que aumentem a durabilidade e a eficiência dos refletores de alumínio, possibilitando uma maior competitividade frente aos espelhos de vidro.
- Otimização de Receptores Térmicos: melhorias nas propriedades térmicas dos receptores, como maior absortividade e transmitância, podem aumentar a eficiência geral dos sistemas com refletores de alumínio.
- Análise de Custo-Benefício com Diferentes Cenários de Financiamento: estudar o impacto de diferentes condições de financiamento sobre a viabilidade econômica dos projetos pode fornecer insights valiosos para investidores e formuladores de políticas.

Assim, encorajam-se o investimento em pesquisa e desenvolvimento por meio de estudos de caso reais, com a implementação e monitoramento dos projetos pilotos, utilizando ambos os tipos de coletores, o que pode fornecer dados empíricos essenciais para validar as conclusões teóricas e da simulação deste trabalho.

Dessa forma, espera-se não apenas aprimorar a tecnologia existente, mas também expandir o uso eficiente de energia solar concentrada em diferentes contextos e escalas, contribuindo assim para a sustentabilidade energética global.



REFERÊNCIAS

ARCE, P.; MEDRANO, M.; GIL, A.; ORÓ, E.; CABEZA, L. F. Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Applied Energy*, v. 88, n. 8, p. 2764–2774, 2011.

ARVIZU, D.; BALAYA, P.; CABEZA, L.; et al. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation SRREN. Special Report of IPCC, Cambridge e New York: IPCC, 2011.

HELLER, P. The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems: Analysis, Measurement and Assessment. Woodhead Publishing, 2017.

IEA. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. Paris: International Energy Agency, 2008.

IEA. Technology Roadmap - Solar Thermal Electricity. Paris: IEA, 2014.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dhabi: IRENA, 2018.

KEARNEY, A. T. Solar Thermal Electricity 2025--Clean Electricity On Demand: Attractive STE Cost Stabilize Energy Production. Consultance for ESTELA, Duesseldorf, Germany: A.T. Kearney GmbH, 2010.

MME/EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. , 2017. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>. Acesso em: 29/4/2019.

NREL. Solar Advisor Model Reference Manual for CSP Trough Systems. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.

NREL. Templates para análises de custos da versão SAM 2011., 2010. NREL. Disponível em: <www.nrel.gov/analysis/sam/templates.html>. Acesso em: 22/3/2014. (11) NREL. Help do SAM 2011.6.30. , 2011. Acesso em: 20/10/2011.

SKUMANICH, A. CSP at a crossroads: The first solar electric power plants are still proving their worth after three decades, so why aren't we seeing more CSP reach the development stage? *Renewable Energy Focus*, v. 12, n. 1, p.52–55, 2011.

SORIA, R.; LUCENA, A. F. P.; TOMASCHEK, J.; et al. Modelling concentrated solar power (CSP) in the Brazilian energy system: A soft-linked model coupling approach. *Energy*, v. 116, Part 1, p. 265–280, 2016.

SORIA, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; SZKLO, A.; MILANI, R.; SCHAEFFER, R. Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. *Energy Policy*, v. 86, p. 57–72, 2015.

WAGNER, M.; GILMAN, P. System Advisor Model Documentarion. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2011.