

CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL COM GEOMETRIA APLANÁTICA

Leonardo Faustino Lacerda de Souza (UFPE) - leonardo.souza@ee.ufcg.edu.br

Naum Fraidenraich (UFPE) - naumfraiden2@gmail.com

Resumo:

Este documento apresenta uma revisão bibliográfica sobre concentração secundária em concentradores lineares Fresnel. Descreve, ainda, a geometria aplanática para concentração solar. Por fim, conceitua um novo concentrador, chamado concentrador linear Fresnel aplanático, que busca reunir as vantagens construtivas do concentrador linear Fresnel convencional apresentando boa concentração geométrica.

Palavras-chave: *Energia Solar Concentrada, Concentrador linear Fresnel aplanático*

Área temática: *Conversão Térmica com Concentradores*

Subárea temática: *Equipamentos e sistemas de conversão heliotérmica para eletricidade*

CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL COM GEOMETRIA APLANÁTICA

Leonardo Faustino Lacerda de Souza – leonardo.souza@ee.ufcg.edu.br
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Energia Nuclear (DEN)
Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Energia Nuclear (DEN)

Resumo. Este documento apresenta uma revisão bibliográfica sobre concentração secundária em concentradores lineares Fresnel. Descreve, ainda, a geometria aplanática para concentração solar. Por fim, conceitua um novo concentrador, chamado concentrador linear Fresnel aplanático, que busca reunir as vantagens construtivas do concentrador linear Fresnel convencional apresentando boa concentração geométrica.

Palavras-chave: Energia Solar Concentrada, Concentrador linear Fresnel aplanático.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia é crescente no mundo. As preocupações ambientais relacionadas a este crescimento são cada vez mais evidentes na comunidade acadêmica internacional. As fontes de hidrocarbonetos têm destaque na participação energética mundial: o planeta ainda depende fortemente da energia fóssil tradicional (carvão, gás natural e petróleo), que representaram 79,7 % do consumo global de energia em 2017 (REN21, 2019).

De acordo com o BEN (2019), no Brasil, em 2018, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética atingiu 416,1 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente, sendo a maior parte gerada no setor de transportes (EPE, 2019). Considerando a energia elétrica, verificou-se um avanço na oferta interna de 10,7 TWh (1,7%) em relação a 2017. Devido às condições hidrológicas favoráveis, houve aumento de 4,1 % da energia hidráulica disponibilizada em relação ao ano anterior. A participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 83,3 % em 2018 (EPE, 2019). Dessa porcentagem, 66,6 % diz respeito a energia hidráulica. Entre as renováveis, a energia solar teve crescimento significativo, superior a 316 % entre 2017 e 2018. Este crescimento está relacionado à expansão da geração solar fotovoltaica distribuída.

A energia solar destaca-se dentre as renováveis por ser inesgotável na escala de tempo terrestre, tanto como fonte de calor quanto de luz e pode ser convertida diretamente em eletricidade através de painéis fotovoltaicos (do inglês, *photovoltaic cell* - PV), ou convertida em calor através de tecnologias de concentração solar (do inglês, *concentration solar power* – CSP). A energia solar merece destaque no Brasil pelos altos índices de DNI observados no país e por apresentar forte crescimento, impulsionado pela popularização em curso da energia fotovoltaica. Estima-se que tal crescimento continue nos próximos anos, devido ao barateamento dessa tecnologia e ao bom recurso solar brasileiro.

Em contrapartida, observa-se pouca exploração da energia termossolar no Brasil. A mesma ainda não é competitiva diante da energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica. Tal fato fica evidente quando comparamos os preços de conversão solar/elétrica das duas tecnologias. Awan et al. (2019) fez um estudo comparativo para três diferentes localidades e o custo nivelado da eletricidade (do inglês, *levelized cost of electricity* – LCOE) encontrado foi, em média, de 0,105 US\$/kWh para CSP e 0,0369 US\$/kWh para PV, o que indica uma diferença de custo da ordem de 75 %. O aumento da eficiência de conversão termo solar pode ser um dos caminhos que resultarão no barateamento da tecnologia CSP.

A irradiação solar direta normal é o recurso necessário à geração solar termoelétrica a partir da utilização de concentradores solares, notadamente calha parabólica, Fresnel linear e torre central. Dessa forma, a região Nordeste é a ideal para implantação de empreendimentos CSP, tanto para geração de eletricidade como para calor de processo, por abranger áreas com DNI acima da mínima requerida para serem viáveis economicamente.

1.1 Tecnologias de concentração solar

Este trabalho está focado no estudo de dispositivos de concentração solar (CSP). As tecnologias CSP podem converter de 15 % a 21 % da radiação solar em eletricidade, enquanto que os PV possuem eficiência de 15 % a 20 % (Islam et al., 2017). Nelas, a radiação solar direta (DNI) é concentrada num fluido para gerar vapor diretamente, ou indiretamente através de fluidos de trabalho e trocadores de calor. Este vapor é convertido em energia elétrica numa turbina a vapor. Uma porção de calor pode ser armazenada em algum meio líquido ou sólido (sais fundidos), para uso noturno ou durante os períodos em que não há radiação solar, permitindo que a operação da turbina não seja interrompida (Islam et al., 2017). O fluxograma simplificado para plantas CSP pode ser visto na Fig. 1.

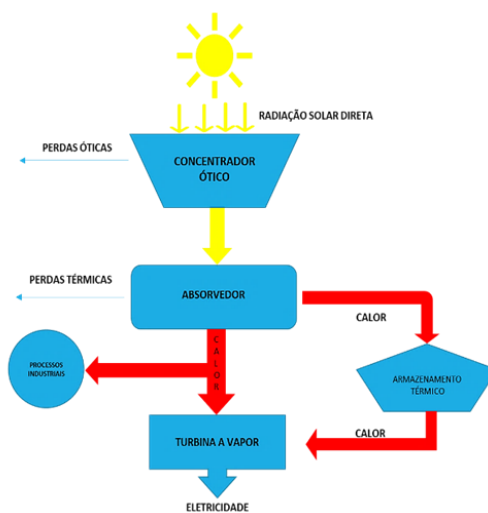
Com a crescente preocupação ambiental, busca-se cada vez mais a variação das tecnologias energéticas, havendo grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento no setor. Na área solar, a tecnologia CSP vem se desenvolvendo e desempenhando importante papel, principalmente pelo fato de poder armazenar energia térmica para que seja usada em momentos de menor irradiação solar direta, como quando ocorre a passagem de nuvens, ou mesmo à noite. Tal fato possibilita maior estabilidade e continuidade do fornecimento de energia, bem como flexibilidade para que se escolha

quando haverá geração elétrica dependendo da demanda (despachabilidade). A tecnologia solar heliotérmica pode ser usada tanto para geração de eletricidade como para processos industriais, e já conta com equipamentos comerciais, ou em fase de desenvolvimento muito próximos de se tornarem comerciais, para suprir a demanda de calor de processo industrial na faixa de 100 °C a 400 °C. Equipamentos solares para utilização em condicionamento de ar com fonte solar a temperaturas acima de 150°C estão próximos de serem competitivos, o que torna ainda mais atrativo o desenvolvimento de aplicações na faixa de 200 °C a 250 °C.

Existem diferentes tecnologias CSP, com mesmo princípio básico para geração de calor. O objetivo dessas é concentrar o máximo de radiação solar direta num foco geométrico. A estrutura e o foco desses sistemas variam, resultando em diferentes níveis de concentração. Os sistemas CSP são divididos em dois tipos: sistemas com foco pontual, também referenciados como concentradores tridimensionais (3D) e sistemas com foco linear, também referenciados como concentradores bidimensionais (2D). Nos sistemas com foco pontual, todos os concentradores devem concentrar a radiação solar num ponto focal. Torres Solares e Discos Parabólicos são exemplos de sistemas de foco pontual, e alcançam temperaturas de até 1300 °C (Islam et al., 2017).

Nos sistemas de foco linear, todos os refletores concentram a radiação solar num tubo absorvedor linear. Os refletores rastreiam o sol em torno de um único eixo, de modo a concentrar o máximo de radiação direta (DNI) no tubo absorvedor. O fluido de transferência de calor (do inglês, heat transfer fluid - HTF) fica dentro do tubo absorvedor, podendo ser água, vapor, sal fundido ou óleo térmico. O mesmo passa por um trocador de calor onde produz vapor que alimenta o ciclo termodinâmico da turbina a vapor. Sistemas desse tipo alcançam faixas de temperatura de operação de 350 °C a 550 °C, a depender do grau de concentração e do HTF (Machinda et al., 2011). Os sistemas de Calha Parabólica (do inglês, *parabolic trough collector* - PTC) e Linear Fresnel (do inglês, *linear Fresnel reflector* - LFR) são exemplos da tecnologia com foco linear. Este trabalho está focado na análise de usinas termoeletricas solares com tecnologia LFR.

Figura 1 – Fluxograma simplificado de uma usina CSP.



Fonte: o Autor.

Gharbi et al. (2011) enumeram algumas vantagens do uso de concentradores lineares sobre os pontuais: os lineares têm sistema de seguimento solar mais simples por necessitarem apenas de um eixo para seguir o sol; os coletores são alinhados na direção Norte-Sul e seguem o sol na direção Leste-Oeste. Concentradores lineares têm como desvantagem a menor concentração da radiação e conseqüentemente menores temperaturas atingidas.

A tecnologia mais madura e mais utilizada é a calha parabólica (PTC), que, considerando uma estimativa feita em 2016, conta com 4,16 GW em operação no mundo (Qader e Stückrad, 2016). Nessa tecnologia o tubo absorvedor se move juntamente com a calha durante o seguimento solar. A Fresnel linear é similar à de calha parabólica, mas utiliza-se de diversos espelhos móveis de menor largura com diferentes inclinações, dependendo da posição do sol, deixando fixo o absorvedor. A tecnologia LFR ainda não é bem aceita pelo mercado, com 0,2 GW em operação no mundo em 2016 (Qader e Stückrad, 2016). As torres solares são a segunda tecnologia em maturidade e utilização; sua operação mundial em 2016 era de 0,652 GW (Qader e Stückrad, 2016) e têm como grande vantagem poder atingir temperaturas muito altas, sendo assim a tecnologia CSP mais promissora. Os discos parabólicos são os que obtêm maior eficiência, porém são mais caros, têm maior dificuldade para integrar armazenamento e é a tecnologia menos utilizada. Utiliza discos para concentrar os raios solares no foco da parábola onde é posicionado um motor Stirling. Sem ter armazenamento, sua aplicação não se justifica.

Um conceito importante quando tratamos de dispositivos de concentração solar é o da concentração geométrica. A concentração geométrica pode ser obtida como a razão entre a área total de abertura do concentrador pela área do absorvedor,

$$C_{geom} = \frac{A_{abertura}}{A_{absorvedor}} \quad (1)$$

Um parâmetro intimamente relacionado à concentração geométrica é o ângulo de aceitação ($2\theta_a$). Conforme mostrado por Rabl (1985), a segunda lei da termodinâmica requer que a concentração máxima possível para metade de um dado ângulo de aceitação, considerando concentradores bidimensionais, seja:

$$C_{ideal,2D} = \frac{1}{\sin\theta_a} \quad (2)$$

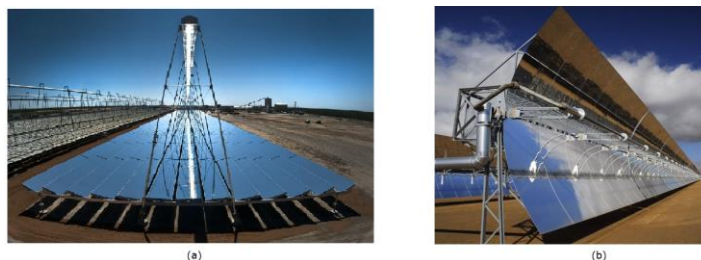
O ângulo do cone solar (θ_s), calculado a partir da distância terra-sol, e dos raios da terra e do sol, é definido como $\theta_s = 4,7$ mrad. Este seria o ângulo de aceitação ideal para projetos de concentração solar. Entretanto, em sistemas práticos, é preciso aumentar o ângulo de aceitação para além do ângulo do cone solar, o que leva a redução da concentração geométrica, pois, segundo Rabl (1985): os concentradores convencionais são baseados em projetos ópticos que ficam aquém do limite termodinâmico por um fator de 2-4; há erros de rastreamento, na superfície dos espelhos e no alinhamento do absorvedor; nenhum espelho é perfeitamente especular; em virtude da dispersão atmosférica, uma parcela significativa da radiação solar pode vir de outras direções além do cone solar.

Desta forma, é premissa básica para projetos de concentração solar a escolha da concentração ideal para uma determinada aplicação e a consequente definição de um ângulo de aceitação realístico, o que influencia diretamente na avaliação do dispositivo.

1.2 Comparação entre as tecnologias PTC e LFR

A tecnologia de concentração solar que compete diretamente com o LFR é o PTC (ver Fig. 2). Ambas são tecnologias de concentração linear. A comparação entre as duas dá-se, geralmente, através da energia gerada e do custo de implantação. As semelhanças desses coletores são baseadas na linearidade característica de seus concentradores. Seus absorvedores são lineares e, em muitos casos, os absorvedores do PTC (tubos evacuados) podem ser usados em configurações de LFR. O fator de concentração de ambas as tecnologias está na faixa de 10 a 50 e, geralmente, a temperatura de operação pode alcançar de 400 °C a 500 °C (Bellos, 2019). Os fluidos de trabalho são semelhantes e eles podem ser água/vapor, óleos térmicos e sais fundidos.

Figura 2 – Tecnologias CSP de foco linear: (a) LFR; (b) PTC.



Fonte: AREVA, 2015 e OORJA, 2017.

Contudo, há diferenças significativas entre as duas tecnologias. Em primeiro lugar, o concentrador primário do LFR é segmentado, enquanto o PTC concentrador primário contínuo. Desta forma, as cargas de vento são grandes no PTC e baixas no LFR (Morin, et al., 2015; Montes et al., 2017).

O sistema de rastreamento do LFR é mais simples porque os espelhos principais rotacionam próximo ao chão e não há grandes movimentos do sistema. Além disso, o receptor do PTC se move durante sua operação enquanto que o do LFR permanece estático. Essa situação simplifica as conexões no LFR; que podem ser estáveis, ao contrário do PTC, onde as conexões precisam ser flexíveis. Desta forma, os riscos de vazamento de fluido de trabalho são menores, o que reduz as medidas de segurança. Todos esses fatos fazem do LFR uma tecnologia de baixo custo comparado ao PTC.

Além disso, os espelhos segmentados no LFR dão a possibilidade de aumentar a taxa de concentração sem que isso represente em aumento da carga de vento, o que é diferente das calhas parabólicas e dos heliostatos usados nos sistemas de torre central. Isto porque o torque produzido pela carga de vento é aproximadamente proporcional ao quadrado da altura do espelho (Zhu et al., 2014).

Quando se compara a eficiência das tecnologias de concentração, o PTC leva vantagem. O LFR apresenta altas perdas ópticas. Os espelhos primários segmentados introduzem importantes perdas ópticas ao sistema devido ao bloqueio e sombreamento entre eles (Nixon et al., 2013; Hongn et al., 2015).

A Fig. 3, apresentada por Bellos e Tzivanidis (2018), mostra que o PTC possibilita uma maior produção de energia térmica útil ao longo de um ano quando comparado ao LFR, considerando sistemas instalados na cidade de Atenas, Grécia. O resultado mostra que o PTC permitiu uma produção de energia térmica útil 47% maior quando comparada ao LFR durante um ano.

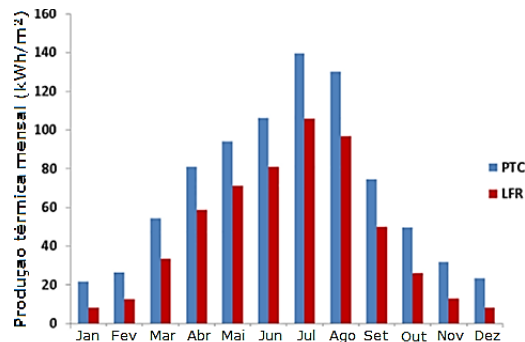
Sobre o custo, a LFR é uma tecnologia mais barata comparado ao PTC. O custo de investimento do PTC é estimado em 275 €/m², enquanto o custo do LFR é algo em torno de 200 €/m² (28 % menor com produção energética 47

% menor), segundo os estudos feitos por Morin et al. (2012), Sharma et al. (2015) e Cocco et al. (2015). O custo do LFR pode ser encontrado em valores mais baixos na literatura. Em todos os estudos comparativos da literatura entre LFR e PTC, o custo do LFR é menor. O PTC apresenta poucas alternativas para redução de custos de implantação, manutenção e operação. Além disso, os custos de operação e manutenção são mais baixos para o LFR devido ao menor movimento do concentrador primário e o absorvedor estático.

Além do que fora dito anteriormente, é importante afirmar que ambas as tecnologias precisam de um mecanismo de rastreamento de eixo único para acompanhar adequadamente a posição do sol. O LFR está sempre localizado com o eixo linear na direção Norte-Sul, enquanto segue o sol na direção Leste-Oeste. Esta estratégia também é comum nos sistemas PTC, mas ele também pode operar com seu eixo na direção Leste-Oeste e rastrear o sol na direção Norte-Sul. A vantagem do LFR no que se refere ao rastreamento solar está no fato de que a estrutura segmentada dos espelhos primários possibilita a utilização de motores de menor potência e tamanho como atuadores.

Tendo em vista que a grande dificuldade da popularização da tecnologia LFR é devido a sua baixa eficiência de concentração quando comparada a tecnologia PTC, esforços devem ser direcionados para o melhoramento deste dispositivo, o que passa por projetos inovadores que possibilitem o aumento da concentração efetiva do LFR.

Figura 3 – Comparação entre LFR e PTC sobre a produção energética mensal por área.



Fonte: (Bellos e Tzivanidis, 2018).

O uso do LFR para produção de energia tem sido observado em muitos países pelo mundo. Como mostrado por Bellos (2019), de acordo com as estatísticas do laboratório nacional de energias renováveis dos Estados Unidos da América (*National Renewable Energy Laboratory - NREL*), existem 18 plantas de centrais termoeletricas com concentração solar a partir da tecnologia LFR no mundo. Algumas já construídas, em operação ou não, e outras em fase de construção. Os países com plantas CSP baseados no LFR são China, Estados Unidos, Espanha, Itália, Marrocos, França e Índia. Este cenário demonstra um interesse mundial sobre a tecnologia LFR. Entretanto, também é notório que a mesma ainda não está bem estabelecida e muitas etapas precisam ser executadas no futuro.

As vantagens da implantação de usinas solares com LFR são evidentes quando são considerados fatores como construção, custo e manutenção. Todavia, observa-se uma maior quantidade de sistemas de concentração solar utilizando PTC instalados pelo mundo. Este cenário deve-se, principalmente, à baixa eficiência óptica quando comparado ao PTC (por volta de 50 % menor) observada na tecnologia LFR, que leva a uma perda de produção térmica. O PTC habitualmente utilizado em aplicações de energia solar apresenta concentração efetiva de 23 sois, enquanto que no LFR é de 15 sois. As perdas ópticas do LFR devem-se, em suma, ao espaçamento, ao sombreamento e ao bloqueio entre os espelhos segmentados do concentrador primário. Dito isto, observa-se que o melhoramento da eficiência desta tecnologia é um objetivo atualmente perseguido pela comunidade acadêmica internacional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Concentrador Linear Fresnel: principais características.

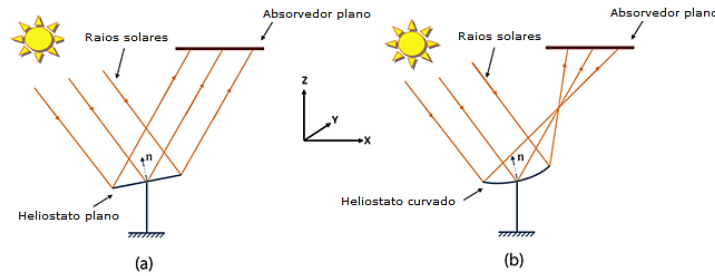
O concentrador linear Fresnel tem seu primário composto por espelhos planos segmentados localizados próximos ao chão. Este aspecto construtivo reduz dificuldades mecânicas relacionadas à carga de vento sobre o concentrador e implica em menor área utilizada (Baharoon et al., 2015).

O concentrador primário é composto por refletores segmentados que podem ser curvados ou não. Os espelhos planos são mais fáceis de construir e manter, e, portanto, de menor custo. Os refletores curvados possibilitam ganho de eficiência óptica, entretanto apresentam dificuldades construtivas que elevam seu custo de fabricação (Benyakhlef et al., 2016). A Fig. 4 mostra as duas estruturas de espelhos primários usados no LFR.

Na literatura existem vários projetos para o absorvedor do LFR. Absorvedores tubulares, absorvedor plano, de cavidade trapezoidal e de tubo evacuado são as escolhas mais comuns e buscam o melhor aproveitamento da irradiação solar refletida dos espelhos primários. Para obter ganho de eficiência, o absorvedor nesse concentrador, quando de tubo evacuado, fica acoplado a um concentrador secundário. O concentrador secundário usualmente apresenta um formato parabólico e caracteriza-se, na maioria dos casos, por um concentrador parabólico composto (do inglês, *compound parabolic concentrator - CPC*), como mostrado na Fig. 5b. Um outro tipo de absorvedor é o de cavidade trapezoidal.

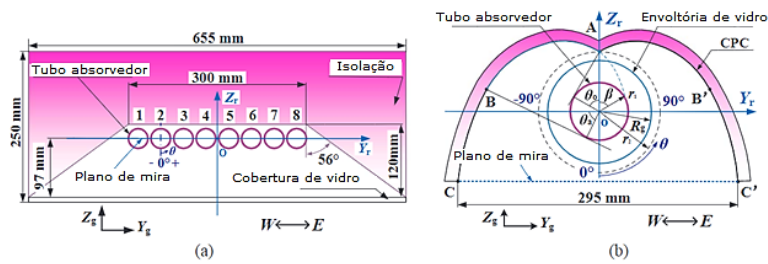
Nesse, uma estrutura trapezoidal isolada termicamente comporta uma série de tubos absorvedores, como mostrado na Fig. 5a. O foco deste trabalho é em projetos de LFR com dupla reflexão e absorvedor de tubo evacuado.

Figura 4 – Diferentes estruturas para os espelhos primários do concentrador linear Fresnel.



Fonte: (Benyakhle *et al.*, 2016).

Figura 5 - Absorvedores típicos para LFR: (a) conjunto de tubos e cavidade trapezoidal isolada; (b) tubo único com concentrador secundário do tipo CPC.

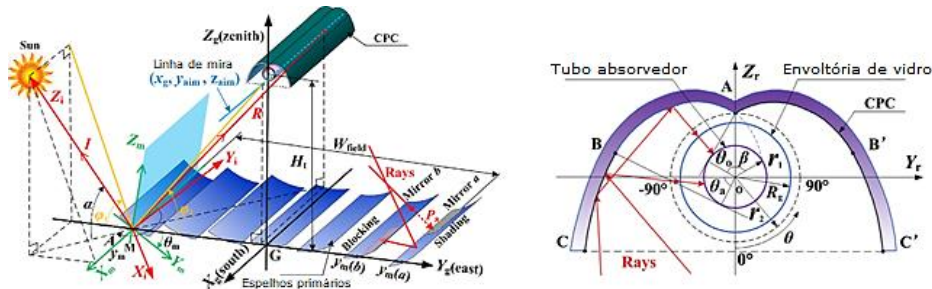


Fonte: (Qiu *et al.*, 2017).

2.2 Concentrador linear Fresnel com dupla reflexão

O estudo sobre o uso de tubos evacuados como absorvedores em dispositivos de concentração solar para operações em alta temperatura (na faixa de 400 °C a 500 °C) foi uma etapa importante no desenvolvimento da tecnologia CSP. O uso de tubos absorvedores evacuados simples reduz as perdas do sistema quando comparados com absorvedores sem envoltória evacuada. Entretanto a inclusão de concentradores secundários é necessária para ganho de desempenho. Feuermann e Gordon (1991) foram os primeiros a explorarem esta ideia. O uso de tubos evacuados acoplados a um concentrador secundário é uma forma eficiente de melhorar o desempenho do LFR e vem sendo estudado por muitos pesquisadores. A maioria dos estudos são sobre a inclusão de concentradores parabólicos compostos (CPC) como secundários. A Fig. 6 mostra um projeto onde um absorvedor de tubo evacuado é inserido num concentrador secundário do tipo CPC. A existência do envelope de vácuo envolvendo o tubo absorvedor reduz significativamente as perdas térmicas por convecção. Qiu *et al.* (2015) mostra que, para o projeto ilustrado na Figura 6, a máxima eficiência óptica alcançada é 65 % e a média anual é na faixa de 34,8 % a 55,2% para diferentes latitudes. Balaji *et al.* (2018a; 2018b) e Cagnoli *et al.* (2018) conduziram estudos detalhados sobre as perdas térmicas em absorvedores de tubo evacuado e dupla reflexão.

Figura 6 – Projeto de concentrador linear Fresnel com secundário do tipo CPC.

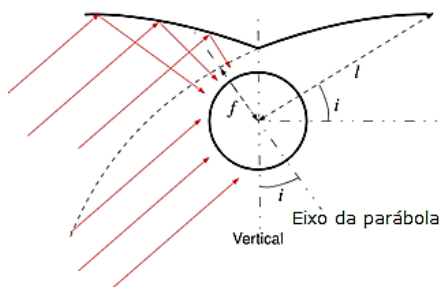


Fonte: (Qiu *et al.*, 2015).

Outra linha de estudos que ganha cada vez mais destaque é aquela que se propõe a obter uma otimização do secundário com geometria CPC ou secundários com formas alternativas. Bellos *et al.* (2018) estudaram a otimização de um secundário com geometria parabólica simples e obteve uma eficiência óptica máxima de 61%. Grená e Tarquini (2011) projetaram um secundário com geometria chamada “asa dupla”, mostrado na Fig. 7. Os autores concluíram que

o projeto alcança altas faixas de concentração com uma distribuição de fluxo de calor uniforme, dois fatores cruciais para operações em altas temperaturas (~550 °C).

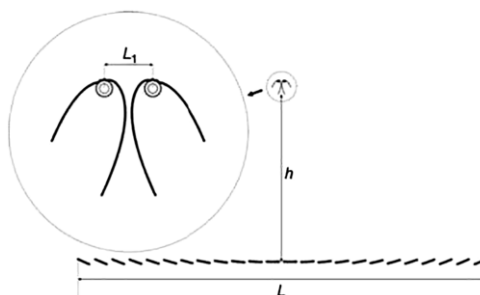
Figura 7 – Proposta de secundário do tipo “asa dupla” para concentrador linear Fresnel.



Fonte: (Grena e Tarquini, 2011).

Outra ideia é o projeto de um absorvedor com CPC duplo, que foi desenvolvido por Collares-Pereira et al. (2016) e mostrado na Fig. 8. Trata-se de um projeto de um secundário assimétrico e compacto que possui alta performance e, como os autores sugerem, é promissor tendo em vista o futuro da tecnologia LFR.

Figura 8 – Proposta de um secundário com CPC duplo.



Fonte: (Collares-Pereira et al., 2016).

Por último, podemos destacar os estudos sobre a obtenção de concentradores secundários otimizados. Canavarro et al. (2014) apresenta um novo concentrador Fresnel projetado com o método de superfície múltipla simultânea (do inglês, *Simultaneous Multiple Surface - SMS*) para duas superfícies refletivas (Fresnel XX SMS) e com um absorvedor tubular, como ilustrado na Fig. 9. Tal método alcançou 70 % de eficiência óptica do projeto otimizado e os autores afirmam que a performance é melhor do que aquela obtida nos projetos de secundário com CPC.

Zhu (2017) desenvolveu um método de otimização para a geometria do concentrador secundário. O método captura corretamente e com precisão os aspectos geométricos e ópticos de um coletor linear Fresnel para o projeto do secundário. Trata-se de uma abordagem onde o secundário não assume uma forma específica, mas começa em um único ponto de extremidade e constrói, de forma adaptativa, o próximo ponto de superfície para maximizar a quantidade de raios refletidos no absorvedor (Fig. 10). Os resultados mostram que o concentrador otimizado alcança 90 % de eficiência óptica.

Prasad e Rao (2017) otimizaram o CPC secundário do campo solar instalado em Vallipuram, Índia. Buscando uma otimização, os autores aplicaram um novo concentrador secundário parabólico segmentado (Fig. 11). Também usaram o que chamam de “conceito de linhas de mira variáveis” nos espelhos primários para obter um fluxo de calor mais uniforme sobre o absorvedor. Finalmente, eles encontraram uma eficiência óptica máxima de 76,2% com o parabólico segmentado, enquanto que o CPC e os concentradores trapezoidais têm 74,9 % e 70,9 %, respectivamente.

Bellos et al. (2018) propõem uma parametrização polinomial de Bezier para o secundário. A metodologia examinada é baseada no movimento de pontos de controle e é apresentado na Figura 12. Os autores encontraram 72,84 % de eficiência óptica para o projeto ideal, enquanto o inicial teve 61,01 % de eficiência óptica.

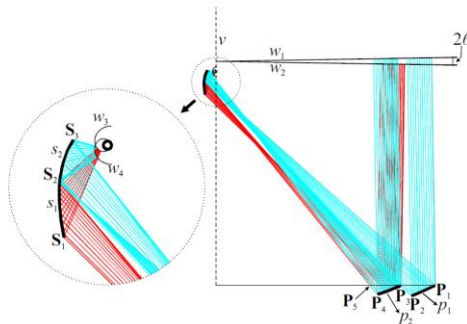
Esses estudos comparativos são importantes e indicam que o projeto do CPC é uma escolha eficiente e os projetos de secundários adaptativos pode ser uma solução promissora para um desempenho um pouco maior.

Além da eficiência óptica, a concentração geométrica é importante pois permite reduzir perdas na razão de 1/C, como simplificado na Eq. 3. O que se deve cuidar é que o benefício na redução das perdas não reduza a eficiência óptica em tal magnitude que a eficiência térmica acabe sendo menor.

$$\eta_{th} = \eta_{op} - \frac{perdas_{th}}{C_{geom}} \quad (3)$$

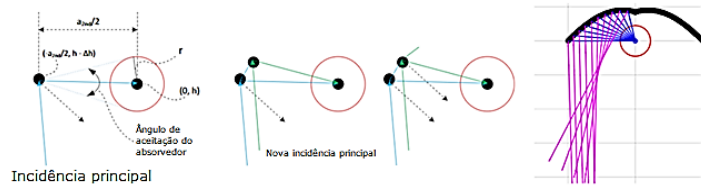
Todavia, os projetos em curso apresentam dificuldades relacionadas a aspectos construtivos ou grande esforço computacional. Tendo em vista isso, Gomes *et al.* (2019) apresenta uma proposta inovadora para o uso da geometria Aplanática como concentrador solar que é descrita na seção seguinte.

Figura 9 – Proposta do Fresnel XX SMS.



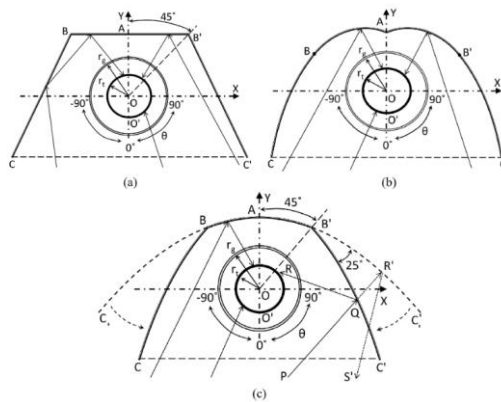
Fonte: (Canavaro *et al.*, 2014).

Figura 10 – Projeto de construção adaptativa do concentrador secundário.



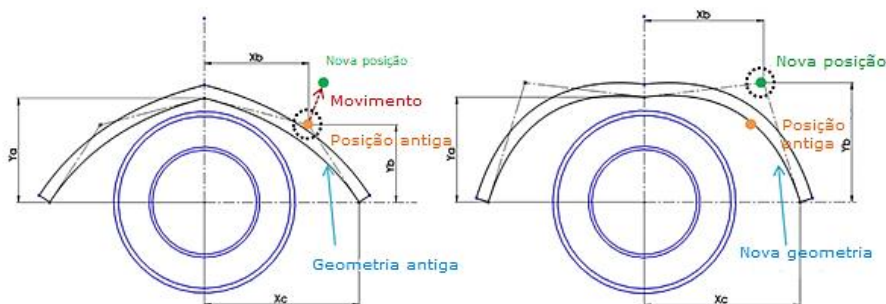
Fonte: (Zhu, 2017).

Figura 11 – Proposta de secundário parabólico segmentado.



Fonte: (Prasad e Rao, 2017).

Figura 12 – Proposta de parametrização do secundário usando polinômio de Bezier.



Fonte: (Bellos *et al.*, 2018).

2.2 Concentrador solar Aplanático

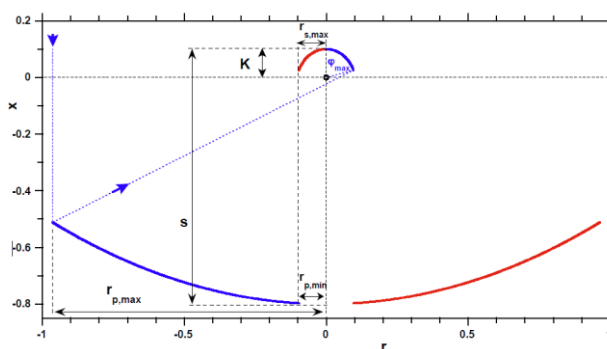
A concentração termossolar tem como objetivo elevar ao máximo a temperatura do fluido de trabalho que circula nos tubos absorvedores, a fim de aumentar a eficiência de conversão termo mecânica e limitar as perdas térmicas na relação de 1/C. Como resultado líquido se pretende produzir energia elétrica com maior eficiência.

Como mostrado na seção anterior, vários são os projetos que buscam o aumento da concentração, quase todos envolvendo dupla reflexão e óptica não formadora de imagem. Como alternativa aos projetos mostrados na seção anterior, podemos considerar a proposta de Gordon (2010), que estuda a aplicação da geometria aplanática formadora de imagem na área de concentração solar. Seguindo essa linha, Gomes et al., 2019 estudou a ideia de um concentrador solar térmico de dupla reflexão e absorvedor cilíndrico com geometria aplanática (ver Fig. 13), e obteve resultados de concentração efetiva de 66 sois para um fator de interceptação total de 0,72. Adotando um fator de interceptação total de 0,98, similar ao PTC, o autor obteve uma concentração efetiva de 36 sois, o que representa uma concentração 50 % maior do que a observada no PTC.

Gomes et al. (2019) explora aplanáticos de dupla reflexão como alternativas que superam desvantagens, oferecendo aumentos significativos na concentração e fatores de interceptação quando comparados ao PTC. Além disso, foi proposto um modelo analítico para avaliar o fator de interceptação, tornando desnecessário o traçado de raios (do inglês, *ray tracing*). O autor afirma que é a primeira vez que esse método analítico é derivado para um sistema de dupla reflexão. O método analítico equaciona ambos os raios de reflexão única e dupla, ou seja, os raios que atingem o tubo absorvedor diretamente após a reflexão do espelho primário, bem como os raios que atingem o absorvedor após a reflexão dos espelhos primário e secundário. Os resultados são validados através de uma simulação usando ray tracing.

Outra vantagem do concentrador aplanático estudado são as significativas reduções no tempo de computação do projeto em relação ao projeto do Fresnel XX SMS mostrado na seção anterior, ou outros projetos SMS com primários parabólicos, para os quais os contornos do espelho não podem ser descritos analiticamente, e requerem um método numérico ponto a ponto, procedimento que necessita de uma tentativa inicial para o ponto final do refletor que pode ou não produzir uma solução consistente (Goldstein e Gordon, 2010; Goldstein e Gordon, 2011). Os autores afirmam que para a computação de um concentrador SMS individual é necessário um tempo estimado em algo em torno de 10 minutos, de modo que a variação nos parâmetros do concentrador para obtenção de um projeto otimizado com alto desempenho óptico requer vários dias de computação.

Figura 13 – Proposta de um concentrador linear com geometria aplanática.



Fonte: (Gomes *et al.*, 2019).

As equações analíticas que definem o aplanático são dadas em função dos parâmetros s e K mostrados na Fig. 13, que relacionam a posição dos vértices do primário e do secundário, e são apresentadas por Gomes (2019, p. 29-30). O aplanático elimina a aberração esférica, que é uma imperfeição da imagem devido à curvatura esférica da lente ou do espelho (Marshall et al., 2015). Devido à aberração esférica, a distância focal é diferente para raios que atravessam a lente em diferentes distâncias do eixo óptico. Para aplicações de concentração solar é importante que os raios converjam para o foco onde se quer obter ganhos térmicos. O aplanático também elimina a aberração coma, que é quando o dispositivo óptico forma imagem fora do eixo óptico. A medida em que os raios passam através da região mais externa da lente ou do espelho, eles são focalizados em diferentes pontos (Gomes, 2019, p. 26, apud Courrol e Preto, 2011). Essas duas aberrações ópticas se traduzem em perdas ópticas em sistemas de concentração solar, obrigando a utilização de tubos absorvedores com maiores dimensões, o que reduz a concentração geométrica do conjunto óptico (Gomes, 2019, p. 27, apud Fraidenaich e Lyra, 1995). Além de todas estas considerações, para ser considerada uma geometria aplanática, o sistema óptico deve satisfazer o princípio de Fermat, a lei de Snell e a condição do seno de Abbe, todos descritos por Gomes (2019, p. 26-27).

3. CONCLUSÃO

Dentre as propostas de melhoramento existentes à tecnologia LFR, aquelas que propõe a inclusão de um concentrador secundário merecem destaque, pois possibilitam um ganho na eficiência do sistema. Pode-se constatar,

através da literatura, que muitos projetos de concentradores com dupla reflexão estão sendo propostos. A maioria baseia-se no PTC com secundário otimizado e óptica não formadora de imagem (Manikandan et al., 2019; Collares-Pereira et al., 1991; Mills, 1995; Benítez et al., 1997; Canavarró et al., 2013; Canavarró et al., 2016). A limitação destes projetos é de ordem prática e pode ser resumida em duas características: não são capazes de acomodar as distâncias necessárias entre o espelho secundário e o tubo absorvedor sem que isto represente perdas ópticas significativas ou sem reduzir consideravelmente a concentração geométrica; apresentam características geométricas que dificultam sua construção em larga escala.

O SMS (do inglês, *simultaneous multiple surface*) otimiza o refletor primário e secundário e ajuda a superar as limitações citadas anteriormente (Benítez et al., 1997a, 1997b), mas requer um grande esforço de programação computacional iterativa. Sendo assim, surge a necessidade do projeto de um concentrador solar com dupla reflexão que apresente viabilidade construtiva, modelo analítico de possível implementação e que alcance bons valores de concentração geométrica e fator de interceptação. A proposta de um LFR com dupla reflexão é alvissareira neste contexto.

O uso de um concentrador com dupla reflexão e geometria aplanática apresentado por Gomes et al. (2019) ganha destaque pois, como mostrado pelo autor, apresenta bons resultados de concentração geométrica e fator de interceptação. Foram exemplificados no referido trabalho diversos casos de raio de absorvedor para futuras implantações práticas desse concentrador, de acordo com as dimensões e concentrações requeridas em projetos de concentração heliotérmica. Dentre os concentradores propostos e estudados, o aplanático elíptico com raio do absorvedor de 0,0075m se destacou: alcançou 37,13 sois de concentração geométrica, com um fator de interceptação total de 98,22%, que é bem superior àquela observada no PTC.

Podemos citar como vantagens do concentrador solar aplanático: (a) seu dimensionamento pode ser feito considerando absorvedores com dimensões comerciais; (b) é possível alterar o raio do absorvedor mantendo o primário e secundário inalterados; (c) trata-se de uma geometria com óptica formadora de imagem, entretanto, aceita raios com amplitude angular adequada às dimensões do Sol; (d) a superfície do primário aplanático é menor que a superfície da parábola de mesma abertura; sua conversão para o plano ocupa uma superfície menor que a parábola; (e) o concentrador solar aplanático possui a extensão do primário mais próximo ao chão quando comparada ao PTC, o que facilitaria a substituição deste por um concentrador linear Fresnel.

Como perspectivas, e considerando o que fora exposto até aqui, observa-se a necessidade de melhorar a relação de concentração do LFR, a fim de obter um dispositivo de concentração solar com foco linear de alta concentração, com vantagens em relação a calha parabólica no que diz respeito à construção, manutenção e custo final. Para tal, surge a ideia e a consequente necessidade de estudos sobre os resultados da substituição do primário do aplanático por um Fresnel, o que provavelmente reduziria um pouco a concentração solar, mas facilitaria sua construção por tratarem-se de espelhos primários planos ou semiplanos. Já que o secundário tem dimensões bem menores que as do primário, ele seria mantido, substituindo-se apenas o primário do aplanático.

REFERÊNCIAS

- Awan, A. B., Zubair, M., Praveen, R. P., & Bhatti, A. R. (2019). **Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants**. *Solar Energy*, v. 183, p. 551-565.
- Baharoon, D. A., Rahman, H. A., Omar, W. Z. W., & Fadhl, S. O. (2015). **Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 996-1027.
- Balaji, S., K.S. Reddy, K.S., T. Sundarajan, T. (2018). **Performance investigation of linear evacuated absorber of 2-stage solar Linear Fresnel Reflector module under non-uniform flux distribution**. *Int. J. Low-Carbon Technol*, v. 13, p. 92-101.
- Balaji, S., Reddy, K. S., & Sundararajan, T. (2018). **Heat loss investigation of 125kWth solar LFR pilot plant with parabolic secondary evacuated receiver for performance improvement**. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 125, p. 324-341.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., & Papadopoulos, A. (2018). **Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium**. *Applied Thermal Engineering*, v. 133, p. 70-80.
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018). **Assessment of linear solar concentrating technologies for Greek climate**. *Energy Conversion and Management*, v. 171, p. 1502-1513.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., & Papadopoulos, A. (2018). **Secondary concentrator optimization of a linear Fresnel reflector using Bezier polynomial parametrization**. *Solar Energy*, v. 171, p. 716-727.
- Benítez, P., Garcia, R., Miñano, J.C. (1997). **Contactless efficient two-stage solar concentrators for tubular absorber**. *Appl. Opt.*, v. 36, p. 7119-7124.
- Benítez, P., Miñano, J.C., Garcia, R., Arroyo, R.M. (1997). **Contactless two-stage solar concentrators for tubular absorber**. *SPIE Proc.*, v. 3139, p. 205-216.
- Benyakhlef, S., Al Mers, A., Merroun, O., Bouatem, A., Boutammachte, N., El Alj, S., Zemmouri, E. (2016). **Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators**. *Renewable Energy*, v. 89, p. 463-474.
- Canavarró, D., Chaves, J., & Collares-Pereira, M. (2013). **Infinitesimal etendue and Simultaneous Multiple Surface (SMS) concentrators for fixed receiver troughs**. *Sol. Energy*, v. 97, p. 493-503.
- Canavarró, D., Chaves, J., Collares-Pereira, M. (2016). **A novel compound elliptical-type concentrator for parabolic primaries with tubular receiver**. *Sol. Energy*, v. 134, p. 383-391.
- Canavarró, D., Chaves, J., & Collares-Pereira, M. (2014). **Simultaneous Multiple Surface method for Linear Fresnel concentrators with tubular receiver**. *Solar Energy*, v. 110, p. 105-116.
- Cagnoli, M., Mazzei, D., Procopio, M., Russo, V., Savoldi, L., & Zanino, R. (2018). **Analysis of the performance of linear Fresnel collectors: Encapsulated vs. evacuated tubes**. *Solar Energy*, v. 164, p. 119-138.
- Cocco, D., & Cau, G. (2015). **Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors**. *Journal of Power and Energy*, v. 229, n. 6, p. 677-688.
- Collares-Pereira, M., Gordon, J.M., Rabl, A., Winston, R. (1991). **High concentration twostage optics for parabolic trough solar collectors with tubular absorber and large rim angle**. *Sol. Energy*, v. 47, p. 457-466.

- Collares-Pereira, M., Canavarro, D., & Chaves, J. (2016). **Improved design for linear Fresnel reflector systems**. In *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, p. 45-55.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019). **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso 22/11/2019.
- Feuermann, D., & Gordon, J. M. (1991). **Analysis of a two-stage linear fresnel reflector solar concentrator**. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, v. 113, n. 4, p. 272-279.
- Gharbi, N. E. et al. (2011). **A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies**. *Energy Procedia*, Amsterdam, v. 6, p. 566-572.
- Goldstein, A., Gordon, J.M. (2010). **Double-tailored nonimaging reflector optics for maximum- performance solar concentration**. *J. Opt. Soc. Am*, v. 27, 1977–1984.
- Goldstein, A.; Gordon, J. M. (2011). **Tailored solar optics for maximal optical tolerance and concentration**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 95, p. 624-629.
- Gomes, E. T. A., Fraidenraich, N., Vilela, O. C., Oliveira, C. A. A., Gordon, J. M. (2019). **Aplanats and analytic modeling of their optical properties for linear solar concentrators with tubular receivers**. *Solar Energy*, v. 191, p. 697-706
- Gomes, A. T. A. (2019). **Modelo e desempenho de concentrador solar aplanático com absorvedor cilíndrico – aplicação em sistemas solares térmicos**. Tese de Doutorado, PROTEN, UFPE, Recife.
- Gordon, J. M. (2010). **Aplanatic optics for solar concentration**. *Optics express*, Vol. 18, p. A41-A52.
- Grena, R., & Tarquini, P. (2011). **Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid**. *Energy*, v. 36, n. 2, p. 1048-1056.
- Hongn, M., Larsen, S. F., Gea, M., & Altamirano, M. (2015). **Least square based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators**. *Solar Energy*, v. 111, p. 264-276.
- Internacional Energy Agency (IEA) (2017). **Key World Energy Statistics 2017**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em 22/11/2019.
- Islam, R.; Bhuiyan A. B. M. N.; Ullah, M. W. (2017). **An overview of Concentrated Solar Power (CSP) technologies and its opportunities in Bangladesh. International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)**, Cox's Bazar, p. 844-849.
- Lodi, C. (2011). **Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada**. Dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Machinda, G. T.; Chowdhury, S.; Arscott, R.; Chowdhury, S. P.; Kibaara, S. (2011). **Concentrating Solar Thermal Power Technologies: A review**. *Annual IEEE India Conference*, p. 1-6.
- Manikandan, G.K., Iniyan, S., Ranko, G. (2019). **Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – a review**. *Appl. Energy*, v. 235, p. 1524–1540.
- Marshall, H.; Feuermann D.; Gordon J. M. (2015). **New types of refractive-reflective aplanats for maximal flux concentration and collimation**. *Optics Express*, v. 23, n. 24, p. 1541-1548.
- Montes, M. J., Abbas, R., Muñoz, M., Muñoz-Antón, J., & Martínez-Val, J. M. (2017). **Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: Hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers**. *Energy Conversion and Management*, v. 149, p. 318-333.
- Morin, G., Karl, M., Mertins, M., & Selig, M. (2015). **Molten Salt as a Heat Transfer Fluid in a Linear Fresnel Collector - Commercial Application Backed by Demonstration**. *Energy Procedia*.
- Morin, G., Dersch, J., Platzer, W., Eck, M., & Häberle, A. (2012). **Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants**. *Solar Energy*, v. 69, p. 689-698.
- Mills, D. R. (2012). **Linear Fresnel reflector (LFR) technology**. In *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*, p. 153-196.
- Mills, D.R. (1995). **Two-stage solar collectors approaching maximal concentration**. *Sol. Energy*, v. 54, p. 41–47.
- Nixon, J. D., Dey, P. K., & Davies, P. A. (2013). **Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology**. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 150-159.
- Oliveira, J. A. (2014). **Análise Óptica E Geométrica De Configurações Dos Concentradores Fresnel De Coluna Única**. Orientador: Naum Fraidenraich. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Siva Prasad, P. V. S., & Mohan Rao, D. S. K. (2017). **HIASA: Hybrid Improved Artificial Bee Colony and Simulated Annealing based Attack Detection Algorithm in Mobile Ad-hoc Networks (MANETs)**. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*.
- Qader, M.; Stückrad, S. (2016). **Concentrated Solar Power**. IASS fact sheet. Potsdam.
- RABL, A. (1985). **Active solar collectors and their applications**. New York: Oxford University Press, 503p.
- REN21 (2019). **Global Status Report**. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/>. Acesso em: 22/11/2019.
- Qiu, Y., Li, M. J., Wang, K., Liu, Z. Bin, & Xue, X. D. (2017). **Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear Fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm**. *Applied Energy*, v. 205, p. 1394-1407.
- Qiu, Y., He, Y. L., Cheng, Z. D., & Wang, K. (2015). **Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods**. *Applied Energy*, v. 146, p. 162-173.
- Sharma, V., Nayak, J. K., & Kedare, S. B. (2015). **Comparison of line focusing solar concentrator fields considering shading and blocking**. *Solar Energy*, v. 122, p. 924-939.
- Zolfaghari, M. et al. (2015). **Comparative costs analysis for the selected innovative solar technologies**. Barcelona: UAB – BEG/INCERS Research Group.
- Zhu, G., Wendelin, T., Wagner, M. J., & Kutscher, C. (2014). **History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors**. *Solar Energy*, v. 103, p. 639-652.
- Zhu, G. (2017). **New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors**. *Solar Energy*, v. 144, p. 117-126.

FRESNEL LINEAR CONCENTRATOR WITH APLANATIC GEOMETRY

Abstract. *This paper presents a literature review on secondary concentration in Fresnel linear collectors. Also describe a geometry applied for solar concentration. Finally, to design a new concentrator, called applied Fresnel linear concentrator, that seeks to gather as constructive advantages of conventional Fresnel linear concentrator that shows good geometric concentration.*

Key words: *Concentrating solar power, linear aplanatic Fresnel reflector.*