

**ALFR-ALENTEJO: DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO ADVANCED LINEAR FRESNEL REFLECTOR EM ÉVORA****Canavarro D.\*, Collares-Pereira M. \*, Santos A.\*, Delgado G.\*, Horta P.\***

\* Universidade de Évora/Cátedra Energias Renováveis, Casa Cordovil, Rua D. Augusto Eduardo Nunes, n.7 7000-651 Évora, Portugal, [diogocvr@uevora.pt](mailto:diogocvr@uevora.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2018>

## RESUMO

Este artigo debruça-se sobre o projecto de demonstração ALFR-Alentejo: “Instalação, ensaio e análise de um concentrador do tipo *Advanced Linear Fresnel Reflector* para a produção de electricidade por via termosolar com armazenamento térmico”. Este projecto, iniciado em Dezembro de 2019, visa o desenho, construção e ensaio de um concentrador solar inovador do tipo *Advanced Linear Fresnel Reflector*. Neste artigo são apresentadas as características geométricas e ópticas do concentrador, uma estimativa do seu desempenho para diferentes localizações e valores de DNI (Radiação Normal Directa) e uma súmula dos trabalhos experimentais a decorrer no Pólo de Évora da INIESC – Infraestrutura Nacional de Investigação em Energia Solar de Concentração.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar, *Advanced Linear Fresnel Reflector*, ALFR-Alentejo, INIESC.

## ABSTRACT

This article focuses on the ALFR-Alentejo demonstration project: “Installation, testing and analysis of na *Advanced Linear Fresnel Reflector* concentrator for the production of electricity via thermosolar process with thermal storage”. This project, started on December 2019, aims at the design, construction and testing of an innovative *Advanced Linear Fresnel* solar concentrator. The present article presents the geometric and optical characteristics of this concentrator, its expected performance for different locations and values of DNI (Direct Normal Radiation) as well as a summary of the experimental work taking place at Herdade da Mitra of the University of Évora, at the Évora pole of INIESC – National Research Infrastructure in Solar Energy Concentration.

KEYWORDS: Solar Energy, *Advanced Linear Fresnel Reflector*, ALFR-Alentejo, INIESC.

## INTRODUÇÃO

Os concentradores solares do tipo *Linear Fresnel Reflector* (LFR) são uma potencial solução para a produção de electricidade termosolar a baixo custo. Contudo, para que estes possam ser competitivos face às outras tecnologias CSP (*Concentrated Solar Power*) a sua eficiência global solar-electricidade deverá ser superior aos valores actuais (Morin et al., 2012). Um possível caminho será aumentando o factor de concentração solar por forma a atingir temperaturas de operação mais altas e, dessa forma, rendimentos de conversão termodinâmicos superiores (mais energia colectada) em simultâneo com a redução do número de filas no campo solar (menores perdas parasíticas e redução de custos). Este artigo apresenta uma configuração denominada *Advanced Linear Fresnel Reflector* (ALFR), como se mostra na Fig. 1.

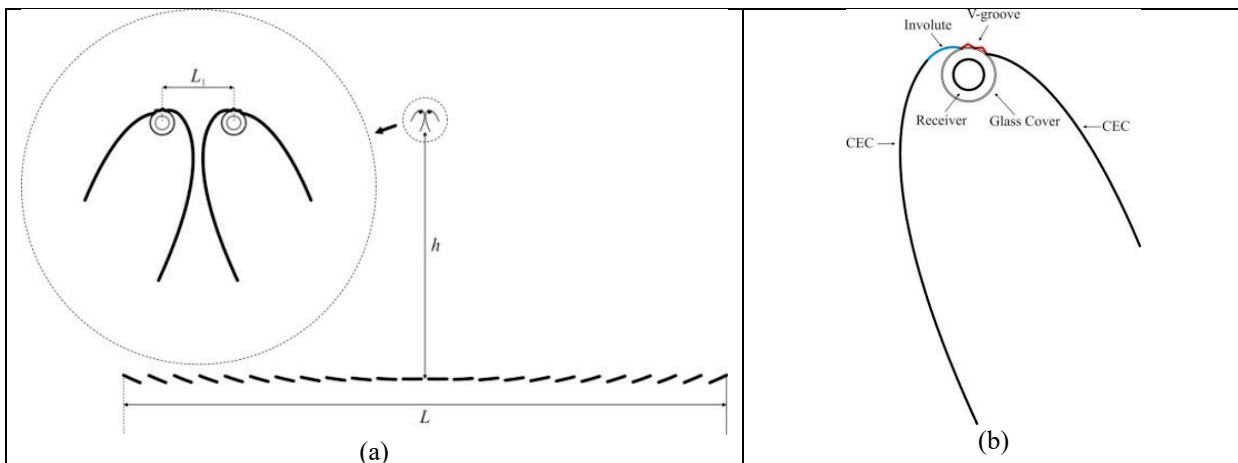


Fig. 1. O concentrador ALFR: (a) vista de corte do concentrador; (b) detalhe do concentrador secundário.

Este concentrador tem como principais características inovadoras:

- Solução compacta, permitindo colocar dois receptores na mesma estrutura a uma altura  $h > 7\text{m}$  (Fig. 1(a));
- Dois secundários do tipo CEC (Concentrador Elíptico Composto) (Chaves, 2016) assimétricos com optimização conjunta com o primário composto por heliostatos numa abertura  $L > 20\text{m}$ ;
- Os dois tubos de vácuo, distanciados por  $L_1 < 1\text{m}$ , podem ser alimentados por uma ligação e saída comuns ou como um deles como entrada e o outro como saída em ligação do tipo “U” à sua saída. Isto pode contribuir para a redução de comprimento de tubagem e de perdas térmicas associadas;
- O espelho secundário é composto por três partes: a porção CEC, a involuta e os espelhos V-grooves (Rabl, 1985) (Fig. 1(b)). Esta última porção permite controlar as perdas de luz pelo gap existente entre a cobertura de vidro (onde o secundário toca) e o tubo receptor, aumentando a eficiência do concentrador.

## ANÁLISE ÓPTICA E TÉRMICA

Por forma a testar os méritos do concentrador ALFR, foi realizada uma análise numérica da sua performance óptica e térmica. A Tabela 1 mostra os dados geométricos do concentrador considerado.

Tabela 1. Características geométricas do concentrador ALFR.

	Abertura (m)	Comprimento total de espelho (m)	Raio receptor (m)	Altura do receptor (m)	Número de espelhos	Comprimento espelho (m)	$C_g$ (X)	$\varphi$ (°)
ALFR	26	22	0.035	10.8	22	1	45	49.73

Onde  $C_g$  é a concentração geométrica e  $\varphi$  é o ângulo de borda (*rim angle*, em inglês).

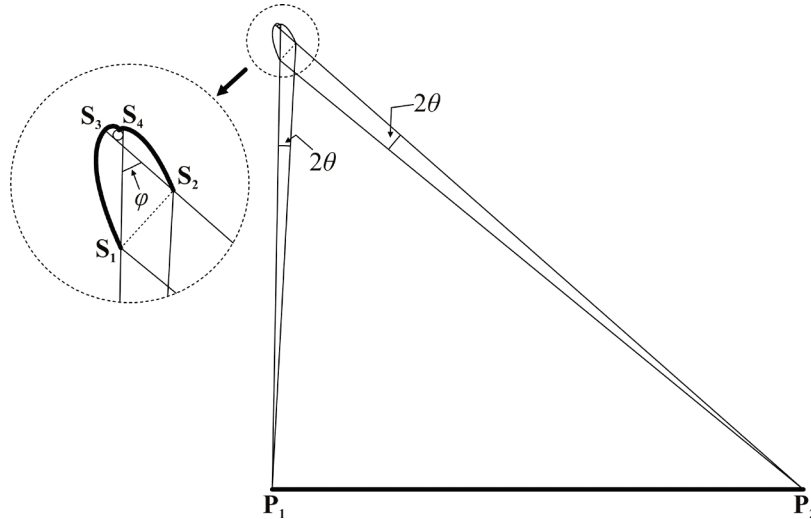


Fig. 2. Método de design do concentrador ALFR.

A Figura 2 mostra o método de desenho do concentrador, baseado no princípio de conservação da etendue (Winston et al., 2005). Os pontos  $P_1$  e  $P_2$  representam os extremos do primário e  $S_1S_2$  a entrada do secundário CEC. Os raios extremos vindos de  $P_1$  e  $P_2$  (fazendo um ângulo  $2\theta$  entre si, onde  $\theta = \text{ArcSin}(1/C_g)$  para um receptor imerso em ar ou vácuo) iluminam a entrada  $S_1S_2$ . Nesse sentido, de acordo com o método das cordas de Hottel, o etendue  $U$  trocado entre  $P_1P_2$  e  $S_1S_2$  é dado por (Chaves, 2016):

$$U = [P_1, S_2] + [P_2, S_1] - [P_1, S_1] - [P_2, S_2] \quad (1)$$

onde  $[A, B]$  é a distância euclidiana entre dois pontos  $A$  e  $B$ . A quantidade  $U$  pode ser usada para determinar as dimensões adequadas do concentrador. Com efeito, considerando as dimensões do receptor como um *input*, tendo um raio de 35mm (Schott, 2013), é possível otimizar as dimensões do primário  $P_1P_2$  para um ajuste de etendues. Considerando o etendue máximo que o receptor pode capturar,  $U_R = 4\pi r$  (sendo  $r$  o raio do receptor) pela conservação da etendue tem-se que:

$$r = \frac{U}{4\pi} \quad (2)$$

Nesse sentido, as dimensões do sistema são determinadas por forma a que  $r = 35\text{mm}$ . A extensão dos raios extremos, tangentes ao receptor, define a posição dos pontos  $S_3$  e  $S_4$  e as porções  $S_1S_3/S_2S_4$  são espelhos CEC. A restante parte do secundário é composto por uma involuta (Rabl, 1985) e espelhos *v-groove*, como se mostra na Figura 1b (adaptados ao tubo receptor evacuado).

A análise óptica foi realizada utilizando um método de traçado de raios (para um perfil solar de  $\approx 0.27^\circ$ ) e recorrendo a um método desenvolvido em outros trabalhos (Canavarro, 2014). Os parâmetros ópticos considerados foram a eficiência óptica à incidência normal ( $\eta_{\text{opt}}$ ), o semi-ângulo de aceitação ( $\theta$ ), o produto concentração-aceitação (CAP) (Canavarro et al., 2014) e o modificador de ângulo de incidência (IAM) (Canavarro et al., 2014). O valor de  $\theta$  é calculado à incidência normal e é definido como o ângulo para o qual o concentrador captura 90% da potência relativamente à posição original, mantendo os espelhos fixos (sem rotação). O CAP *Concentration-Acceptance Product*, em inglês) é dado pela expressão:

$$CAP = C_g \sin \theta \quad (3)$$

e expressa a proximidade de um concentrador do limite máximo termodinâmico. No caso ideal,  $CAP = 1$  (considerando um índice de refração  $n = 1$  - receptor imerso em ar ou vácuo).

A Tabela 2 mostra as propriedades de materiais consideradas e a Tabela 3 os resultados para os parâmetros mencionados.

Tabela 2. Propriedades dos materiais considerados.

	Reflectividade	Absorptividade	Transmissividade
Espelhos primários	92%	-	-
Espelho secundário	92%	-	-
Receptor	-	96%	-
Cobertura de vidro	-	-	97%

Tabela 3. Parâmetros ópticos do concentrador ALFR.

	$\eta_{opt}$	$\theta$ (°)	CAP
ALFR	0.70	0.75	0.59

A Figura 3 mostra as curvas de IAM para os planos transversal ( $K_T$ ) e longitudinal ( $K_L$ ).

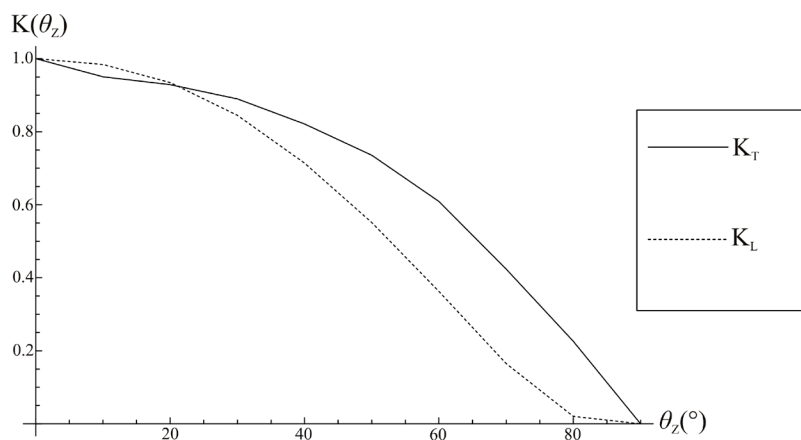


Fig. 3. Curvas de IAM para o concentrador ALFR.

As perdas térmicas num receptor tubular evacuado do tipo “Schott PTR70” (Schott, 2013), para a temperatura de trabalho  $T_R$ , podem ser estimadas pela equação (adaptação de (Burkholder and Kutscher, 2009)).

$$P_R(T_R) = 0.141T_R + 6.48 \times 10^{-9}T_R \quad (4)$$

De acordo com a Eq. (4) é possível estimar uma perda de 740W/m a 560°C. Seguindo a metodologia utilizada recentemente para esta estimativa realizadas simulações do desempenho anual de um campo solar com uma área  $A_{col} = 250.000 \text{ m}^2$  para as localidades de Faro (Portugal) e Hurgada (Egipto) (Canavarró et al., 2017). Sumariamente, esta estimativa assumiu:

- O campo solar é composto por um conjunto de 23 filas, cada uma com 500m de comprimento;
- As tubagens,  $P_T$ , têm 10cm de espessura e são revestidas por lã de rocha. Desse pressuposto, o modelo assumiu as perdas térmicas de  $P_{T_{in}} = 65\text{W/m}$  para o fluido de entrada (290 °C) e  $P_{T_{out}} = 130 \text{ W/m}$  o fluido à saída (565 °C).
- Temperaturas de operação nominais e constantes:  $T_{in} = 290 \text{ °C}$  à entrada e  $T_{out} = 565 \text{ °C}$  à saída;
- Rendimento de conversão DNI-calor anual de 0.35 e 0.39 para Évora e Hurgada, respectivamente.
- Rendimento de conversão calor-electricidade de 0.147 e 0.163 para Évora e Hurgada, respectivamente (valor nominal de rendimento da turbina de  $\eta_T = 0.42$  a  $T_{out} = 565 \text{ °C}$ ).

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4. Performance solar-electricidade do concentrador ALFR para as localidades de Faro e Hurghada.

Localidade	DNI (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	Energia Térmica Colectada (kWh)	Electricidade produzida (kWh)	Conversão solar-electricidade anual média
Faro, Portugal	2359	$2.11 \times 10^8$	$8.38 \times 10^7$	0.147
Hurghada, Egipto	3044	$3.02 \times 10^8$	$1.22 \times 10^8$	0.163

Estes valores demonstram que a tecnologia ALFR poderá estar mais próxima dos rendimentos de conversão 15-16% da tecnologia cilindro-parabólica (PTC) convencional a óleo térmico (nas regiões do sul da Europa) e simultaneamente acima dos rendimentos de 8-9% da tecnologia Linear Fresnel (LFR) convencional (Morin et al., 2012). Naturalmente, também é expectável um aumento do rendimento de conversão da tecnologia PTC quando operada com sais fundidos, de forma similar à tecnologia ALFR. De qualquer forma, o incremento esperado na tecnologia ALFR só é possível pelo recurso a geometrias inovadoras de elevada concentração e a sua adaptação a receptores tubulares evacuados. Por outro lado, as tecnologias do tipo Fresnel possuem um elevado potencial de redução de custos pela seu fabrico e manutenção mais simples quando comparados à tecnologia PTC, abrindo a forte possibilidade de redução de LCOE (*Levelized Cost of Electricity*, em inglês) e, portanto, à sua futura penetração no sector electroprodutor em larga escala.

#### PROJECTO DE DEMONSTRAÇÃO ALFR-ALENTEJO

Um projecto de demonstração denominado ALFR-Alentejo (ALFR-ALENTEJO, 2020) foi recentemente iniciado e permitirá a implementação de dois protótipos ALFR à escala industrial. O projecto, liderado pela Universidade de Évora/Cátedra Energias Renováveis, terá lugar na plataforma experimental Évora Molten Salt Platform (EMSP) e na Plataforma de Ensaio de Concentradores Solares (PECS) na Herdade da Mitra em Évora (ver Fig. 4).



Fig. 4. Plataformas de ensaio na Herdade da Mitra da Universidade de Évora. (a) Plataforma de sais fundidos (EMSP); (b) Plataforma de ensaio de concentradores solares (PECS).

O protótipo a ser instalado na PECS terá uma área reflectiva de 44 m<sup>2</sup>, com uma potência térmica pico estimada de 27kWh<sub>th</sub>. Esta instalação permitirá a caracterização óptica e térmica do protótipo, o qual funcionará com um circuito de óleo térmico até temperaturas de 400°C, num esquema semelhante ao que se apresenta na Figura 5 (que também já foi utilizado para ensaiar outros colectores como cilindro-parabólicos e concentradores parabólicos compostos quasi-estacionários (CPC-QS)(Osório et al., 2019)). Serão determinados vários os vários parâmetros ópticos já mencionados anteriormente o que permitirá não apenas a certificação do colector mas também uma comparação com os resultados dos modelos de simulação. Os ensaios serão realizados de acordo com a normal internacional ISO9806.



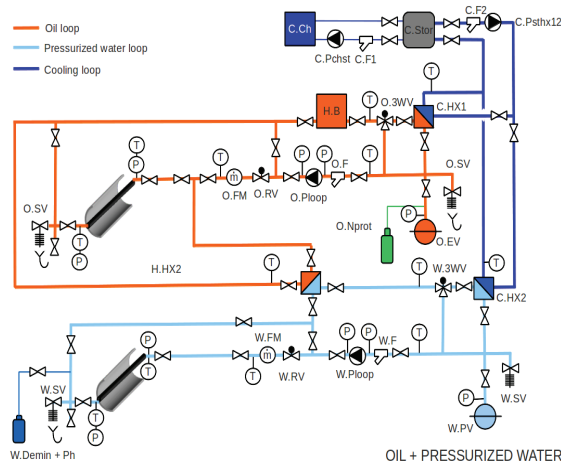


Fig. 5. Esquema de circuito e configurações possível na PECS.

O segundo protótipo será conectado a um *loop* de sais fundidos e será testado a temperaturas de operação até 560°C usando sais fundidos como fluido de transferência de calor e meio de armazenamento de energia. Os ensaios terão lugar na plataforma EMSP da Universidade de Évora. Este protótipo terá uma área de 440 m<sup>2</sup> (22m x 20m) e uma potência térmica na ordem de 270kW<sub>th</sub>. A Figura 6 mostra a futura adaptação do campo solar na actual EMSP.

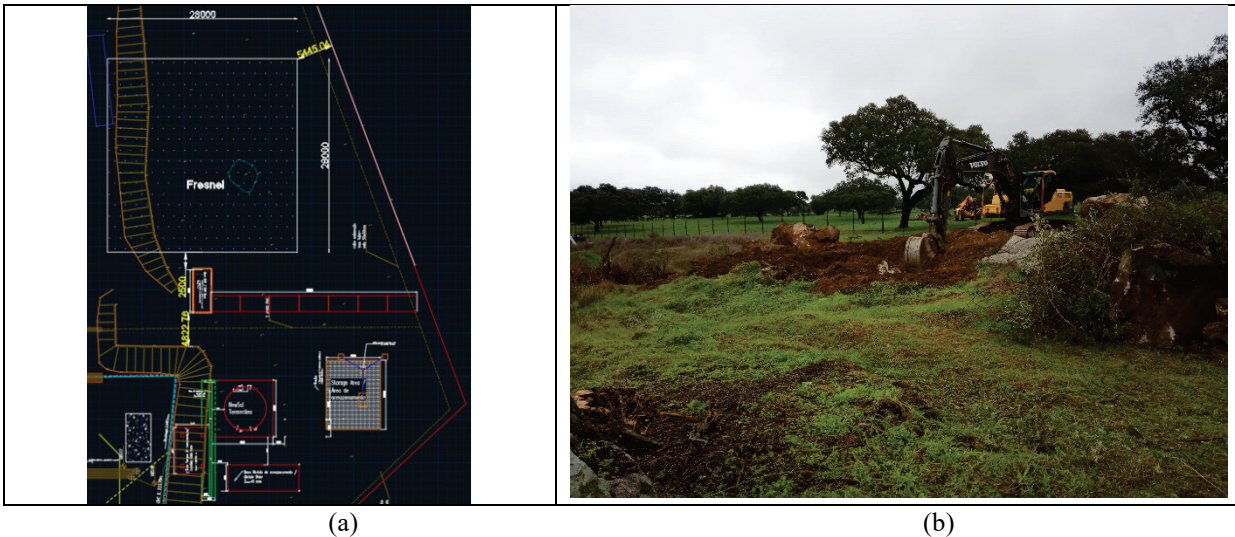


Fig. 6. Instalação de protótipo ALFR na EMSP. (a) Localização do campo solar; (b) Preparação dos terrenos.

Esta instalação permitirá o ensaio e medição do rendimento do colectador até temperaturas de 560°C. Em particular, realizados os seguintes ensaios:

- Teste do pré-aquecimento matinal e a drenagem vespertina como estratégia de reduzir as perdas térmicas nocturnas (aumento de eficiência) e superar a necessidade de traçagem eléctrica nos receptores e tubagem (por forma a evitar a solidificação dos sais fundidos), numa perspectiva de redução de custo.
- Ensaio de modos de operação inteligentes: *start-up/shut-down* diários, operação em modo não-solar e ainda modos de emergência ou falha crítica;
- Comparação de resultados com modelos numéricos e sua optimização;
- Análise económica, eco-design (estratégia de redução de custos) e exploração e disseminação de resultados.

#### COMENTÁRIOS FINAIS

O projecto ALFR-Alentejo irá permitir a validação de um concentrador inovador do tipo Fresnel Linear. Os resultados de simulação indicam uma estimativa de rendimento de conversão solar-electricidade na ordem de 14% para latitudes e valores de DNI similares às da região de Évora. A confirmar-se, este resultado é um avanço significativo no estado-da-arte desta tecnologia e um passo importante no seu reconhecimento como alternativa para a produção centralizada de electricidade por via térmica. A optimização da geometria concentrador através do recurso das ferramentas da

óptica não-produtora de imagem (*non-imaging optics*, em inglês) e a operação a temperaturas de 560°C parecem ser os pontos-chave para a obtenção deste resultado preliminar.

A natureza do presente projecto permitirá a validação em ambiente relevante da performance óptica e térmica do concentrador ALFR. Com efeito, o ensaio da tecnologia na plataforma PECS e EMSP reúnem condições únicas para o ensaio da tecnologia sob vários regimes importantes (ensaio em regime quasi-estacionário, arranque/paragem, emergência, dias sem radiação solar, etc.), permitindo dessa feita não só a certificação do concentrador mas também a elaboração de *guidelines* para a sua operação a escalas superiores. O projecto, que ainda se encontra numa fase inicial, irá também incidir sobre os tópicos relevantes como a validação/melhoria das ferramentas de simulação, optimização económica do sistema e abordagens para redução de custo por via de um eco-design com recurso a materiais mais baratos e de fácil fabrico.

#### AGRADECIMENTOS

O projecto ALFR-Alentejo é financiado pelo programa Alentejo2020 através da CCDR-Alentejo (ALT20-03-0145-FEDER-039487) e conta também com o suporte da Infraestrutura de Investigação em Energia Solar de Concentração (INIESC, AAC 01/SAICT/2016, n° 22113)

#### REFERÊNCIAS

ALFR-ALENTEJO, 2020. ALFR-ALENTEJO [WWW Document]. URL [www.alfr-alentejo.uevora.pt](http://www.alfr-alentejo.uevora.pt)

Burkholder, F., Kutscher, C.F., 2009. Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 parabolic trough receiver. NREL Tech. Rep. 58.

Canavaro, D., 2014. Advances in the design of solar concentrators for thermal applications. University of Évora.

Canavaro, D., Chaves, J., Collares-Pereira, M., 2017. New dual asymmetric CEC linear Fresnel concentrator for evacuated tubular receivers. p. 040001. <https://doi.org/10.1063/1.4984397>

Canavaro, D., Chaves, J., Collares-Pereira, M., 2014. Simultaneous Multiple Surface method for Linear Fresnel concentrators with tubular receiver. Sol. Energy 110, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.002>

Chaves, J., 2016. Introduction to nonimaging optics. CRC Press, New York, 2nd Edition.

Morin, G., Dersch, J., Platzer, W., Eck, M., Häberle, A., 2012. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. Sol. Energy 86, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.020>

Osório, T., Pereira, R., Coelho, A., Marchã, J., Pereira, J., Silva, R., Eusébio, T., Collares-Pereira, M., 2019. A novel quasi-stationary CPC-type solar collector for intermediate temperature range applications for process heat: Simulation and experimental results. p. 150006. <https://doi.org/10.1063/1.5117662>

Rabl, A., 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press, New York.

Schott, 2013. Schott PTR70 Datasheet [WWW Document]. URL [https://www.schott.com/d/csp/2ad9cb93-5b86-4a51-aead-a49b4e869ef8/1.0/schott\\_ptr70\\_4th\\_generation\\_datasheet.pdf](https://www.schott.com/d/csp/2ad9cb93-5b86-4a51-aead-a49b4e869ef8/1.0/schott_ptr70_4th_generation_datasheet.pdf)

Winston, R., Miñano, J.C., Benítez, P., 2005. Nonimaging Optics. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-759751-5.X5000-3>