

# PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTES DE UM PROTÓTIPO CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR PARA GERAÇÃO DIRETA DE VAPOR PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS

**Victor César Pigozzo Filho** – victorpigozzo@gmail.com

**Alexandre Bittencourt de Sá** – alexandre.sa@lepten.ufsc.br

**Selen Soares Sousa** – selen.sousa@lepten.ufsc.br

**Julio César Passos** – julio.passos@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** Concentradores solares do tipo Fresnel linear (CFL) possuem grande potencial para se estabelecerem no mercado de concentradores solares de média temperatura. Entretanto, por ser uma tecnologia relativamente nova, existe muito a ser estudado tanto em termos técnicos quanto em viabilidade econômica e aplicação a diferentes mercados. Este trabalho apresenta os resultados preliminares de um projeto que teve como escopo a concepção, construção e teste de um CFL. Tal protótipo possui uma área total de espelhos de 54m<sup>2</sup> e um absorvedor multi-tubos de cavidade trapezoidal de 12m de comprimento. Os métodos de projeto e fabricação utilizados nas partes principais do CFL, assim como os procedimentos para caracterização óptica, geométrica e térmica são aqui descritos. Mesmo sendo um projeto em andamento, a viabilidade técnica do uso da tecnologia de concentração Fresnel linear para a geração direta de vapor foi comprovada em uma configuração multi-tubos.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Concentrador Fresnel Linear, Geração Direta de Vapor

## 1. INTRODUÇÃO

Os concentradores solares são equipamentos que utilizam lentes ou espelhos para concentrar a radiação solar, possibilitando assim o atingimento de temperaturas elevadas em um fluido de trabalho. Essa abordagem da energia solar tem grande aplicabilidade para geração de calor para processos industriais, tais como secagem, destilação, cozimento, entre outros (Sharma *et al.*, 2017). Apesar de a maior parte das plantas de concentração solar operarem com óleo térmico, é possível trabalhar com água diretamente no campo solar, em um processo chamado de geração direta de vapor. Embora a contribuição do aquecimento solar para o setor industrial ainda seja pequena, espera-se que se eleve nos anos seguintes. Além disso, os custos de implementação para concentradores solares diminuiu 50% nos últimos 20 anos (U.S. Energy Information Administration, 2017).

Apesar de a calha parabólica ser a tecnologia de concentração solar mais desenvolvida e utilizada até o momento, o concentrador Fresnel linear (CFL) é uma tecnologia crescente que apresenta diversas vantagens (Barlev *et al.*, 2011; Morin *et al.*, 2012), tais como custos mais baixos e simplicidade construtiva.

O CFL consiste em linhas de espelho paralelas que refletem a radiação do Sol para o absorvedor. O absorvedor é fixado acima do campo de espelhos, que rastreiam a posição do Sol garantindo o foco no absorvedor durante o transito solar diário. O CFL pode possuir um dispositivo de rastreamento para cada linha ou um dispositivo de rastreamento único comum para todas as linhas de espelhos. O primeiro fornece uma melhor capacidade de controle e otimização e o último fornece uma opção muito mais simples e econômica e é mais comum em CFL de pequenas dimensões (Zhu *et al.*, 2014). O CFL também aparece como a melhor tecnologia de concentração para geração de vapor até 200°C, que inclui a maioria das aplicações de calor de processos industriais (Morin *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2017). A viabilidade do processo de geração direta de vapor nos concentradores de calha parabólica já foi bem verificada no projeto DISS (Zarza *et al.*, 2004).

Com base nesse contexto, pesquisadores do laboratório LEPTEN estão desenvolvendo um concentrador solar do tipo Fresnel linear junto ao projeto Heliotérmica CNPq (Proc. 406357/2013-7). As principais etapas deste projeto estão descritas neste trabalho e incluem a concepção e o projeto do concentrador; desenvolvimento de um sistema de rastreamento; manufatura de espelhos ligeiramente curvos com foco diferente para cada linha; projeto e fabricação de um separador de vapor; instrumentação para aquisição de dados; construção e funcionamento do concentrador como um todo, entre outras etapas.

O projeto tem como objetivo a concepção e desenvolvimento de um concentrador de baixo custo do tipo Fresnel linear funcional operando em geração direta de vapor. Será verificada a viabilidade de geração direta de vapor para um absorvedor multi-tubos não evacuado, com limite de operação para geração de vapor a 220°C. Espera-se que este projeto contribua para que futuramente concentradores deste tipo possam ser viáveis de serem utilizados pela indústria local para a geração de vapor de processo.

## 2. METODOLOGIA DE ANÁLISE DO CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR

### 2.1 Simulação por *Monte Carlo Ray-Tracing*

O design de um CFL envolve vários parâmetros que se alterados individualmente ou em conjunto alteram o rendimento óptico do sistema. Tais parâmetros podem ser vistos na Figura 1, e são a largura e comprimento totais do coletor ( $L_{col}$  e  $W_{col}$ ); o número de fileira de espelhos ( $n$ ); a largura dos espelhos ( $W_m$ ); a curvatura dos espelhos ( $C_m$ ) e a largura e altura do absorvedor ( $W_r$  e  $h_r$ ). Para avaliar como tais parâmetros influenciam na eficiência óptica do concentrador foi desenvolvido uma rotina de *Monte Carlo Ray-Tracing* (MCRT) em Matlab.

A técnica de MCRT consiste em gerar um grande número de raios solares aleatórios em uma dada direção, e rastrear seu caminho e interações com os elementos óticos do concentrador respeitando suas propriedades de reflexão, absorção e transmissão (Delatorre *et al.*, 2014), até que tais raios se foquem no elemento absorvedor, ou sejam perdidos para o ambiente ou outro componente do sistema. Este método utiliza relações geométricas e propriedades óticas para obter eficiências óticas e geométricas do coletor (Zhu, 2013). Nesta etapa apenas o rendimento óptico é analisado, ficando de fora deste processo as perdas térmicas.

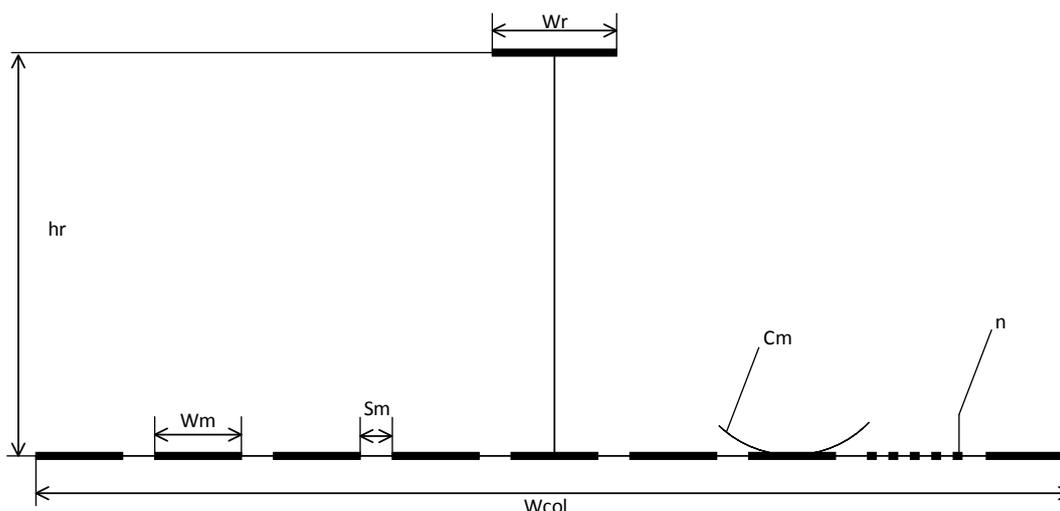


Figura 1 – Principais parâmetros do CFL

O modelo de simulação foi validado com o *software* SolTrace do NREL (*National Renewable Energy Laboratories*), considerado adequado para este fim. O SolTrace, no entanto, não é uma ferramenta de otimização e não é adequada para analisar várias configurações distintas. A diferença máxima do fluxo de calor da radiação concentrada obtido pelo modelo desenvolvido e obtido pelo SolTrace foi de 1,1%.

Outros fatores também tiveram que ser levados em consideração, tais como a área total da plataforma disponível para a construção do concentrador. Esta plataforma limitou o comprimento do concentrador em 12m, e sua largura em 5m, isto levando em consideração o espaço para instalar os equipamentos auxiliares e para caminhar e trabalhar em volta do CFL. A altura máxima do absorvedor ficou limitada em 5m da base da plataforma por questões de segurança para trabalhos envolvendo o absorvedor em altura. O número de fileiras e a largura dos espelhos está intimamente ligada ao espaçamento entre espelhos. Todos estes parâmetros foram variados para analisar o melhor custo-benefício entre rendimento óptico e custo de fabricação das linhas de espelhos. Este tópico é melhor detalhado em um artigo publicado pelo mesmo grupo de pesquisa nos Proceedings do ISES Solar World Congress 2015 (Sá *et al.*, 2016).

Em sua configuração final, o concentrador desenvolvido possui 10 fileiras de espelhos, cada uma com 0,45m de largura, espaçados igualmente entre si. O absorvedor se encontra a 3,75m de altura considerando o plano dos eixos dos espelhos e 4,75m da base da plataforma. Esta elevação do eixo dos espelhos da base da plataforma se dá para possibilitar a realização de trabalhos de manutenção e instalação dos espelhos pela parte de baixo. O absorvedor é composto por uma cavidade trapezoidal, onde seis tubos paralelos, de 25,40mm de diâmetro externo, são posicionados.

### 2.2 Espelhos

A principal vantagem dos coletores Fresnel é o seu baixo custo quando comparado com os concentradores tipo calha parabólica. Um dos fatores que reduzem este custo é a utilização de espelhos planos, comercialmente disponíveis por diversos fornecedores locais. Estes espelhos originalmente planos são curvados a frio, dentro do regime elástico de deformação, antes de serem montados no CFL. Esta curvatura que pode ser parabólica ou cilíndrica com distância focal no absorvedor serve para concentrar a radiação no mesmo, elevando o fator de concentração e possibilitando atingir maiores temperaturas. Para o protótipo foram adotadas curvaturas cilíndricas, com distancias focais diferentes para cada

fileira. Contando como fileiras 1 e 10 as mais extremas do concentrador, e fileiras 5 e 6 as centrais, a Tab. 1 mostra as distâncias focais adotadas.

Tabela 1 - Distancias focais de cada fileira de espelhos

Fileiras	1 e 10	2 e 9	3 e 8	4 e 7	5 e 6
Distância focal (mm)	4560.60	4306.40	4105.40	3965.80	3894.10

As “espinhas de peixe” são as peças responsáveis pela curvatura dos espelhos. O corte a laser utilizado na sua fabricação garante a precisão necessária. Em cada espelho de 1000 mm de comprimento são utilizadas 4 espinhas de peixe. A Fig. 2 mostra um esquema da espinha de peixe utilizada. O material utilizado é chapa de aço galvanizado de 2,70mm de espessura.

Devido ao fato de as espinhas de peixe serem finas, 2,7mm de espessura, a tensão necessária para curvar os espelhos não se propaga em toda a extensão do mesmo. Para transmitir esta tensão ao longo do espelho foram utilizados perfis em “U” de alumínio. Estes perfis são encaixados e colados nas espinhas de peixe e posteriormente esta estrutura, representada na Fig. 3, é colada no espelho. Em cada espelho foram utilizados cinco perfis de alumínio colados longitudinalmente ao longo de toda a extensão de um metro do espelho.

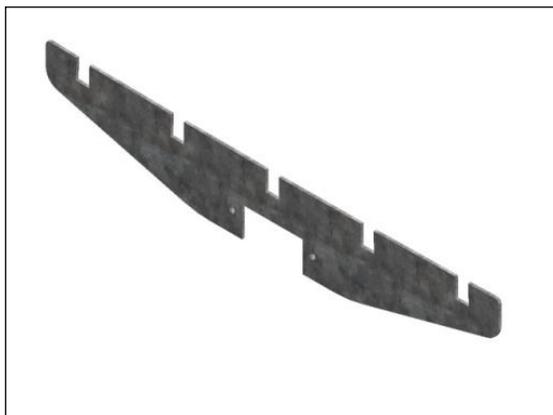


Figura 2 – Espinha de peixe

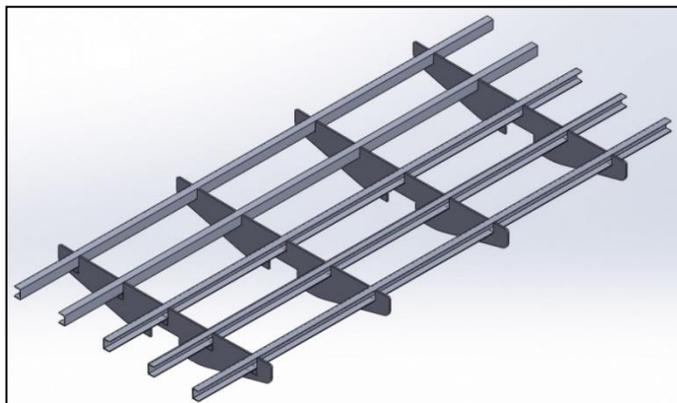


Figura 3 - Estrutura de fixação dos espelhos

Para realizar esta colagem foram desenvolvidas prensas de MDF, também cortadas a laser para dar precisão e repetibilidade ao processo. No total foram montados cento e vinte espelhos e estruturas. A colagem vidro-metal foi feita com cola do tipo polímero MS. A Fig. 4 mostra dois protótipos instalados no Fresnel. O espelho mais à esquerda é o colado em uma estrutura curva, com as espinhas de peixe, em um primeiro protótipo. O espelho à direita é um espelho plano colado em uma estrutura metálica plana. Este protótipo foi feito para verificar a durabilidade dos espelhos e a resistência da cola epóxi em condições reais de operação, expostos às intempéries atmosféricas, principalmente radiação UV e umidade. O espelho curvo foi instalado em abril de 2016 e o espelho plano instalado em novembro de 2015. Ambos se encontram em perfeitas condições (novembro de 2017).

A Fig. 5 mostra a configuração da reflexão de cada um dos protótipos da Fig. 4. Este é apenas um teste qualitativo para verificar a diferença de reflexão entre os protótipos. Pode-se perceber com clareza como a radiação é concentrada pelo espelho curvo. A largura da área de absorção de radiação no absorvedor é de 150mm. A largura da área da radiação concentrada pelo espelho na Fig. 5 é de aproximadamente 60mm. A configuração de espelhos curvos foi adotada no protótipo final do concentrador solar, sendo que o protótipo do espelho plano foi utilizado apenas em testes iniciais.

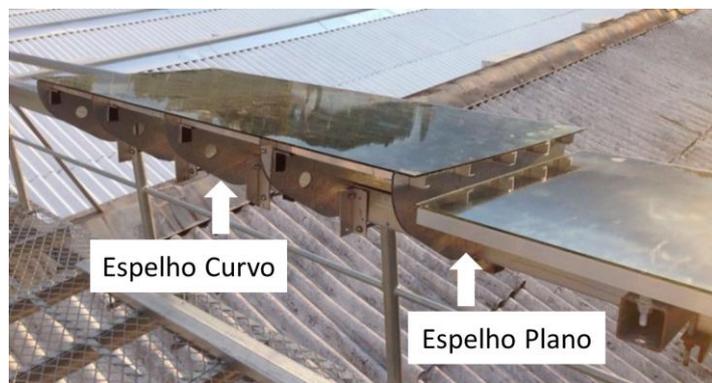


Figura 4 – Protótipos de espelhos instalados na bancada CFL

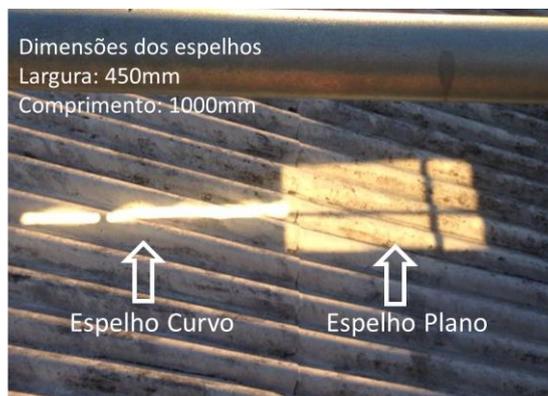


Figura 5 - Reflexão da radiação solar pelos espelhos

Os espelhos montados na estrutura metálica serão fixados nos eixos de rotação. Esta concepção de projeto é conhecida como *torque tube*, pois este eixo é responsável por sustentar todos os espelhos de uma linha, com seus 12m de comprimento, não podendo permitir que haja flexão ou torção, o que ocasionaria erros geométricos na reflexão da radiação solar.

O eixo utilizado é um tubo de seção quadrada, de 60mm de lado e 3mm de espessura de parede. O comprimento de cada eixo é de 4 m e está apoiado nos cavaletes. Em cada seção de quatro metros são instalados quatro espelhos de 1m de comprimento. Simulações foram feitas e este perfil foi selecionado com base em uma deformação máxima aceitável, da ordem de 1,5mm. Para poderem girar, para rastrear o sol, mancais de rolamento do tipo UCP-209 foram utilizados.

### 2.3 Absorvedor

O absorvedor é o componente onde o fluido de trabalho deve absorver calor proveniente da radiação solar. No presente trabalho, o absorvedor é a própria seção de teste, pois é onde ocorre o fenômeno de ebulição convectiva da água. O absorvedor escolhido é do tipo cavidade trapezoidal multi-tubos, por onde escoa o fluido de trabalho (água). Foram utilizados seis tubos de 25,40mm de diâmetro externo, totalizando uma largura do elemento absorvedor de cerca de 152,40mm (i.e.,  $6 \times 25,4$ ).

As estruturas externa e interna foram feitas a partir de duas chapas de alumínio dobradas, com 2mm de espessura cada. O espaço entre as chapas tem em média 75mm de espessura e é preenchido com lã de rocha para isolamento térmico. Seis tubos de aço inoxidável com diâmetro externo de uma polegada, 1,20 mm de espessura de parede e doze metros de comprimento, são utilizados. Na abertura inferior, por onde entra a radiação concentrada, tem-se uma placa de vidro plano de alta transparência minimizando as perdas convectivas para o meio ambiente enquanto permite a entrada da irradiação solar. Esse tipo de vidro possui um menor teor de ferro em sua composição e é conhecido no mercado com *low-iron glass*. As propriedades das placas de vidro utilizadas ainda serão verificadas em etapas posteriores do projeto.

O absorvedor é modular. Cada módulo absorvedor tem dois metros de comprimento e possui suas extremidades fechadas com uma tampa de alumínio soldada na chapa superior externa. No total, foram utilizados seis módulos, totalizando 12m de comprimento. A Fig. 6 mostra um esquema da montagem de um módulo absorvedor.

Os tubos absorvedores são revestidos com tinta seletiva. A tinta utilizada foi a *SOLKOTE*, da empresa norte-americana *SOLEC*. De acordo com o fabricante a emissividade varia entre 0,20 e 0,49 dependendo do substrato e da espessura da camada de tinta e a absorvidade varia entre 0,88 e 0,94 dependendo dos mesmos fatores. A temperatura de operação da tinta varia entre  $-73^{\circ}\text{C}$  e  $538^{\circ}\text{C}$ . A aplicação do produto foi feita por pintura com pistola de ar.

A instrumentação do absorvedor é a mais importante para a análise de desempenho do Fresnel. O absorvedor foi instrumentado em três seções: início, meio e fim. A Fig. 7 ilustra a posição dos termopares em cada seção. São realizadas medições diretamente no fluido em cada um dos seis tubos, parede dos tubos, paredes internas e externas das chapas de alumínio, meio do isolamento térmico, superfície do vidro e medições na temperatura do ar no interior da cavidade.

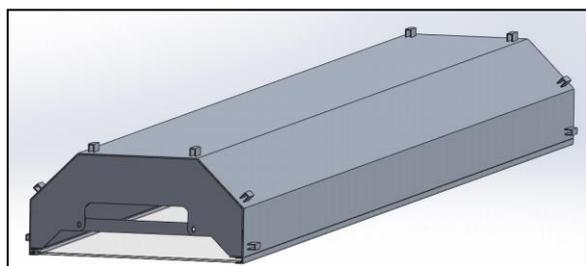


Figura 6 - Módulo absorvedor

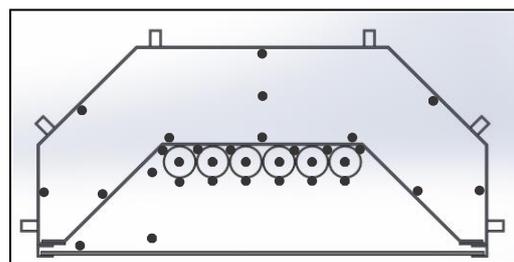


Figura 7 - Instrumentação do absorvedor

A decisão de se utilizar um absorvedor com multi-tubos decorreu de aspectos econômicos e construtivos. O tubo evacuado é um componente geralmente mais caro, geralmente não é vendido em pequenas quantidades como para a fabricação de um protótipo de testes. Além disto, a curvatura dos espelhos teria que ser muito precisa e acentuada para concentrar a radiação em apenas um tubo, ou a cavidade teria que contar com refletores secundários, o que é comum de ser encontrado em plantas CFL com tubos evacuados. A configuração multi-tubo permite uma fabricação simplificada dos espelhos curvos, exigindo apenas tubos de aço inoxidável, soldagem e a posterior aplicação de tinta seletiva.

A Fig. 8 mostra uma foto da bancada experimental montada. É possível observar os trilhos onde o absorvedor está fixado. Estes elementos permitem que o absorvedor se mova de forma a reduzir as perdas de final de linha, decorrentes da inclinação no plano longitudinal do vetor solar.



Figura 8 - Bancada experimental com absorvedor móvel

## 2.4 Sistema de rastreamento solar

As posições angulares dos espelhos devem ser corrigidas para refletir continuamente a radiação solar no absorvedor, à medida que a posição do sol muda no céu ao longo do dia. A Figura 9 ilustra o mecanismo de rastreamento, composto por dez braços de alavanca paralelos, um para cada linha, conectado à barra do atuador.

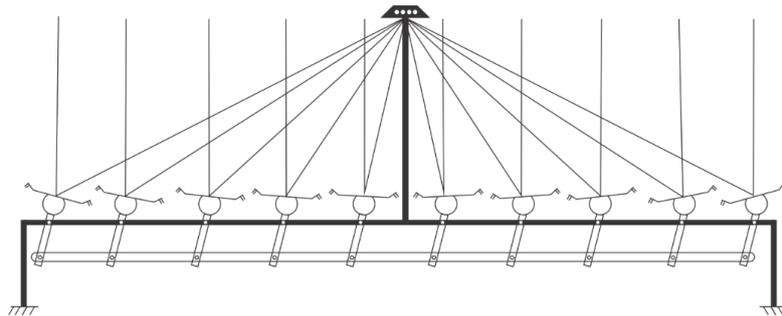


Figura 9 - Esquema do mecanismo de rastreamento

A Figura 10 mostra, na prática, o atuador linear elétrico conectado à barra do atuador. O mecanismo projetado é capaz de girar as linhas do espelho em  $80^\circ$ , rastreamento do sol durante quase todo o dia, de  $-80^\circ$  a  $80^\circ$  no ângulo de incidência transversal solar,  $\theta_T$ . O atuador linear possui baixa velocidade e alto torque. Um controlador manual de velocidade PWM foi utilizado para diminuir ainda mais a velocidade do atuador, aumentando a precisão do controle de posição.



Figura 10 - Mecanismo de rastreamento solar

Inclinômetros são usados para medir a inclinação dos braços da alavanca e, conseqüentemente, a posição angular das linhas do espelho. O controle do rastreamento solar é feito por meio de equações do posicionamento solar, e as inclinações das fileiras é garantida através dos inclinômetros.

## 2.5 Circuito hidráulico e de controle

O concentrador solar está conectado a um circuito hidráulico conforme o esquema da Figura 11. Água é alimentada ao separador de vapor antes do início dos testes. Durante os testes, a água líquida é recirculada do separador de vapor para o CFL, onde parte da mesma é evaporada. A mistura bifásica retorna ao separador de vapor e a parcela evaporada é purgada para a atmosfera através da válvula de controle elétrica. Esta válvula é responsável por fazer o controle da pressão de saturação desejada dentro do separador de vapor através de sua abertura e fechamento. As pressões de teste podem variar entre atmosférica, onde a válvula permanece aberta durante todo o teste, até 23bar, quando a válvula de alívio abre por questões de segurança.

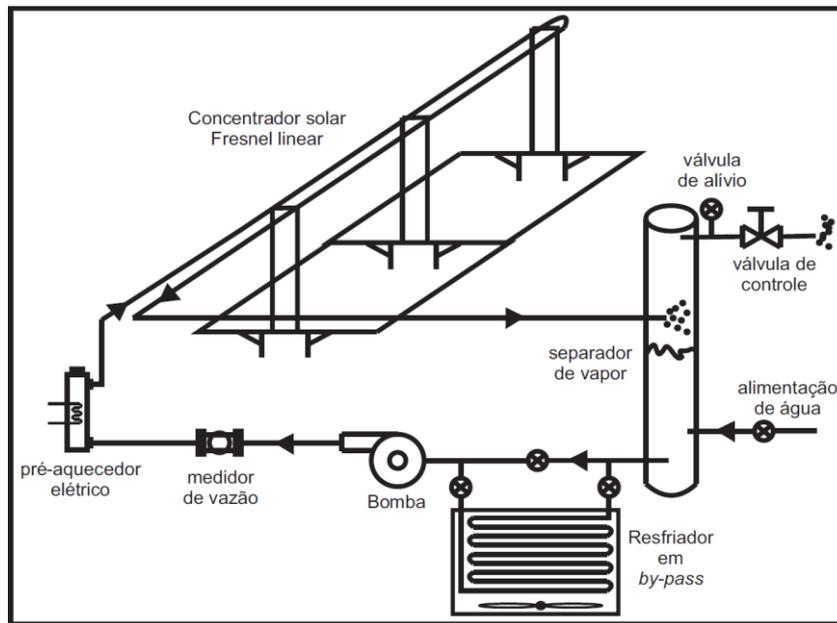


Figura 11 – Circuito hidráulico da bancada de testes

A Figura 12 mostra o separador de vapor em operação. O mesmo é constituído de um tubo de aço inoxidável de 152,40mm, Schedule 10, com 5,50m de altura. Conforme o vapor é purgado durante os testes, o nível de líquido saturado dentro do separador vai descendo. Como forma de proteger a bomba e o pré-aquecedor contra falhas de operação a seco, um sensor de nível baixo foi instalado no separador de vapor. Foram instalados um manômetro e um termômetro analógicos a fim de se verificar as condições de saturação diretamente no separador de vapor.

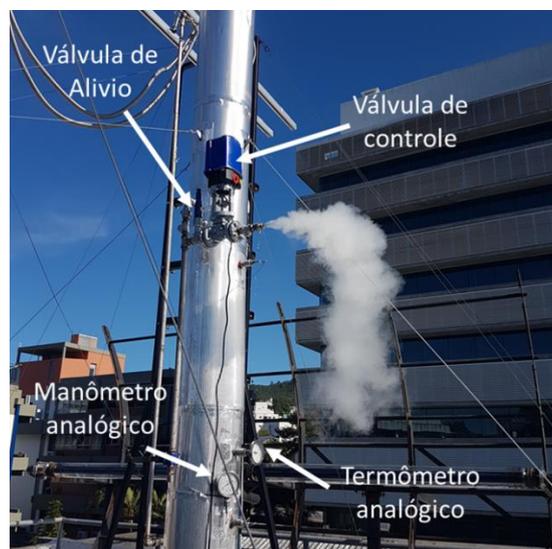


Figura 12 - Separador de vapor e seus componentes

O circuito conta ainda com um medidor de vazão, transdutores de pressão, e um pré-aquecedor elétrico utilizado para diminuir o tempo para se atingir o regime permanente no CFL durante o início dos testes. A válvula de controle regula a pressão de operação interna do sistema. O escoamento bifásico na saída do CFL é encaminhado para a parte superior do separador de vapor. Uma torre seca de resfriamento foi instalada em *by-pass* entre o separador de vapor e a entrada da bomba para realizar testes em regime monofásico a temperaturas próximas à ambiente. Estes testes serão feitos para encontrar o rendimento óptico do CFL, e estão descritos na seção 4.1.

## 2.6 Perdas Térmicas

Como parte de um estudo de mestrado, uma seção do absorvedor foi construída e instrumentada para testar as perdas térmicas em um ambiente controlado, no interior do laboratório. Assim como o absorvedor do CFL projetado, a bancada consiste em um absorvedor de cavidade trapezoidal com seis tubos de 25,40mm instalados em seu interior. As dimensões são as mesmas do absorvedor instalado no concentrador em operação. O esquema de instrumentação pode ser visto na Figura 13. Os 17 pontos indicados pelo T são os termopares utilizados para medir as temperaturas nas paredes dos elementos, dentro do isolamento térmico, e do ar ambiente externo e dentro da cavidade. Termopares do tipo T e K foram utilizados. A instrumentação foi feita na seção central do módulo de testes.

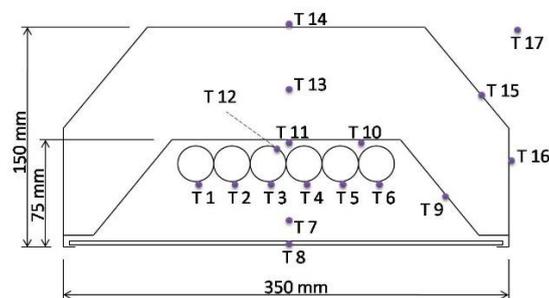


Figura 13 - Esquema de instrumentação da bancada de perdas térmicas

As perdas térmicas foram simuladas utilizando elementos aquecedores no interior dos tubos absorvedores. A potência entregue aos aquecedores foi medida e controlada utilizando um variador de tensão TDGC-2 da marca EZA. Quando o sistema atinge o regime permanente, as perdas térmicas correspondem ao mesmo valor da potência entregue pelos aquecedores. A cavidade do experimento, assim como a do CFL, é construída a partir de uma chapa de alumínio de 2mm de espessura. O espaço interno da cavidade é preenchido por lã de rocha.

Os testes foram realizados considerando as seguintes configurações:

- Com e sem convecção externa forçada
- Pintura completa com tinta seletiva
- Pintura parcial com tinta seletiva
- Sem pintura

O coeficiente global de perdas térmicas ( $U_L$ ) foi verificado para as condições acima indicadas, considerando uma faixa de temperatura média das paredes dos tubos absorvedores variando entre 100°C a 225°C.

As três condições de pintura utilizadas consistem em o tubo de inox polido sem pintura, o tubo completamente pintado pela mesma tinta seletiva utilizada no CFL, e o tubo com a metade inferior pintada e a superior sem tinta. Isto pois apenas a metade inferior dos tubos recebe a radiação concentrada, e a emissividade do tubo sem pintura é menor que a do tubo pintado, devido à baixa emissividade que metais polidos possuem. Esta última configuração foi estudada como uma forma de reduzir as perdas térmicas e os custos associados à tinta seletiva.

## 3. RESULTADOS PRELIMINARES

### 3.1 Perdas Térmicas

Como esperado, de forma geral as perdas térmicas aumentam com o aumento da temperatura. Também se verificou que os tubos não pintados possuem os menores valores de  $U_L$ , entretanto eles não possuem aplicação em um sistema de concentração solar real. A Figura 14 mostra o resultado de  $U_L$  para os três casos de pinturas distintas, enquanto a Figura 15 mostra a diferença entre os casos de convecção natural e forçada. Ambos os gráficos mostram a variação de  $U_L$  com diferença entre a temperatura da parede dos tubos e da temperatura ambiente.

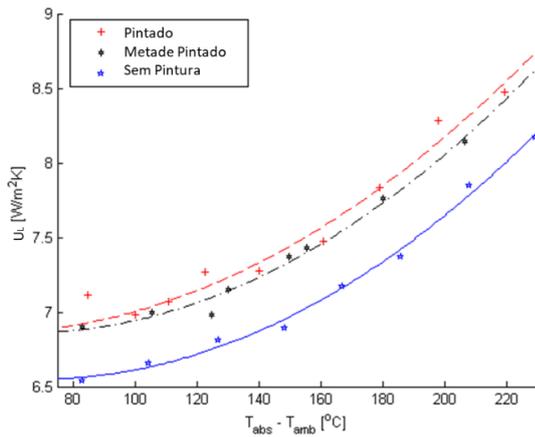


Figura 14 - Comparação do UL entre as três configurações de pintura para convecção natural

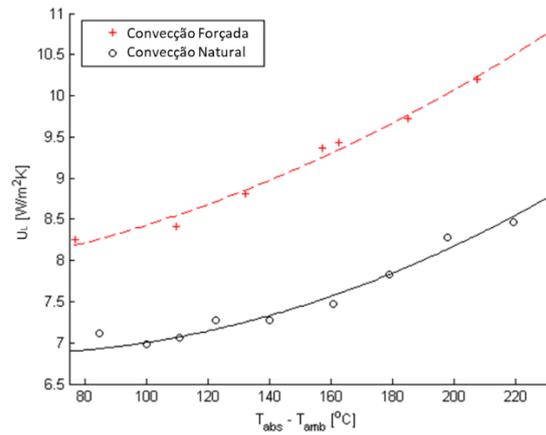


Figura 15 Comparação do UL entre convecção forçada e natural para o caso de tubos pintados

Para a configuração completa da pintura, o valor do coeficiente de perda de calor variou entre 7,04-8,55 W/m<sup>2</sup>K para convecção natural. Em caso de convecção forçada com velocidade do vento de 1,90 m / s o coeficiente de perda de calor variou entre 8,18-10,51 W/m<sup>2</sup>K. Nota-se ver que a convecção forçada desempenha um papel importante nas perdas de calor. Considerando a meia pintura dos tubos, o coeficiente de perda de calor ficou na faixa de 6,94-8,43 W/m<sup>2</sup>K para condições de convecção natural, praticamente igual ao caso de tubos totalmente pintados.

### 3.2 Rastreamento Solar

Foram realizados experimentos para encontrar a incerteza final da posição dos espelhos  $\theta_{mi}$ . Inicialmente, um anteparo branco com linhas demarcando o centro e uma distância de 75mm do centro foi instalado na entrada da cavidade trapezoidal, a fim de facilitar observar a região do concentrador em que foi concentrada a radiação. Este anteparo está fixado no vidro na parte inferior da cavidade. A segunda fileira foi analisada neste experimento devido aos inclinômetros que ali estão instalados.

A faixa média (duas bandas centrais) indica onde estão posicionados os seis tubos, e as duas bandas laterais representam as superfícies internas do absorvedor. Conforme visto nas fotos a, b c e d da Figura 16, mesmo uma pequena mudança no ângulo do espelho resulta em um desvio da radiação refletida. Variações na ordem de 0,5 ° podem quase totalmente deslocar a radiação concentrada dos tubos. Isso indica a importância de ter uma boa precisão na determinação da posição solar e no posicionamento dos espelhos.

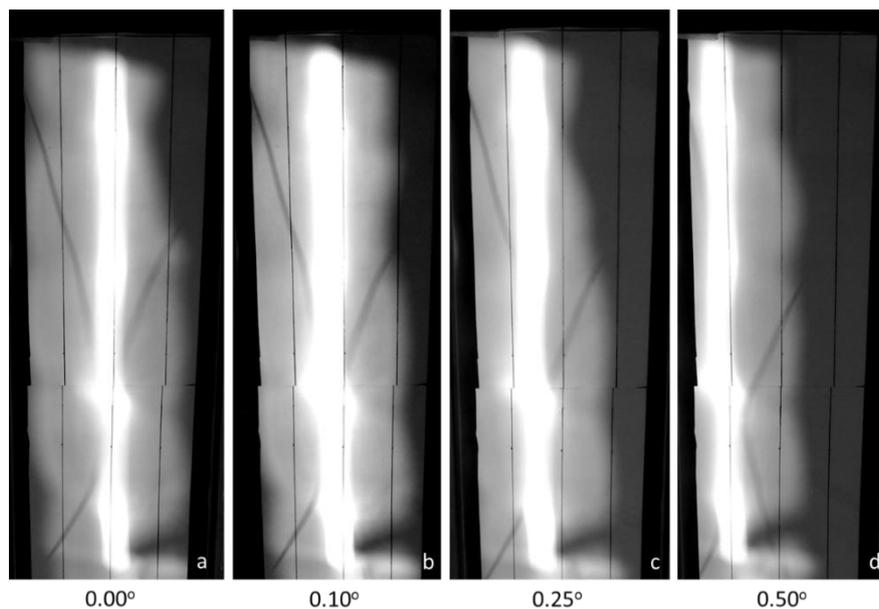


Figura 16 - Influência da variação da posição angular do espelho em relação a radiação concentrada no absorvedor

As incertezas de vários parâmetros foram analisadas e consideradas na obtenção da incerteza final, tais como as incertezas do inclinômetro e do tempo apresentado no relógio do controlador. Também foram consideradas as incertezas de posição de latitude, longitude e altitude, relacionadas à localização onde o CFL está instalado. O fato de

todas as fileiras de espelho girarem utilizando um único mecanismo também influencia na posição final. Caso o espelho estivesse posicionado exatamente no centro de giro, esta influência seria inexistente. Entretanto devido ao eixo e ao sistema de fixação mostrado na seção 2.2, existe uma distância entre o centro dos espelhos e o centro de giro. Neste caso, idealmente cada fileira deveria girar individualmente para conseguir manter o posicionamento ideal.

A influência de todos estes parâmetros na posição final dos espelhos  $\theta_{mi}$  foi verificada variando entre  $0,07^\circ$  a  $0,12^\circ$  para o caso mais extremo, dependendo do ângulo de incidência transversal solar. Conforme verificado na Figura 16, uma variação de aproximadamente  $0,10^\circ$  tem uma influência pequena na radiação concentrada, e mesmo tal desvio sendo visível, ele ainda está dentro da área ocupada pelos tubos absorvedores.

Vários testes experimentais de rastreamento foram realizados. Espelhos de linhas adjacentes foram removidos para evitar sombreamento. A radiação concentrada dos espelhos curvos permaneceu no centro do receptor durante todo o dia, sem desvio visível. Isso indica que as equações de rastreamento solar e o sistema de rastreamento estão trabalhando com desempenho satisfatório. Além disso, o erro máximo de posição angular obtido parece coerente com os resultados experimentais. A estrutura robusta é capaz de manter o foco solar mesmo em períodos com ventos razoáveis.

## 4. ETAPAS FUTURAS

### 4.1 Avaliação do rendimento ótico do concentrador

Nos testes de avaliação do rendimento ótico do concentrador, a água será alimentada no CFL o mais próximo da temperatura ambiente possível, de forma a que possamos negligenciar as perdas térmicas. Com os espelhos devidamente posicionados será possível obter o rendimento ótico para cada período em que se atinja o regime permanente de escoamento. O rendimento ótico dependerá fortemente da inclinação do sol em relação à bancada. Todos estes rendimentos podem ser comparados ao rendimento ótico de pico, que ocorre quando o sol está normal ao plano de abertura do coletor. São utilizadas curvas chamadas de modificadores de ângulo de incidência. Existe uma curva destas para o plano transversal e uma para o longitudinal do CFL, e elas foram obtidas utilizando o software de MCRT apresentado na seção 2.1. O rendimento ótico transposto para o rendimento ótico de pico de cada conjunto de dados experimentais apresentará diferenças entre si. Uma rotina em Matlab foi desenvolvida para obter o rendimento ótico de pico considerando a redução dos erros para todos os conjuntos experimentais.

### 4.2 Verificação das perdas térmicas do absorvedor

A seção 3.1 descreveu um experimento em laboratório desenvolvido para avaliar as perdas térmicas do absorvedor. Entretanto é importante verificar se as perdas térmicas obtidas são condizentes com o concentrador em condições reais de operação. Para tanto, testes sob certas condições serão efetuados. Neles os espelhos serão desfocados do absorvedor, e o aquecimento da água até determinados níveis será feito pelo pré-aquecedor. Sob estas condições, o escoamento será resfriado ao passar pelo absorvedor devido às perdas térmicas. É importante ressaltar que esta condição, assim como a do teste descrito na seção 3.1, aponta as perdas térmicas para a condição sem radiação concentrada. Conforme demonstrado por Dudley *et al.* (1994), as perdas térmicas são maiores para condições de operação com radiação concentrada, pois nestes casos a temperatura na parede externa dos tubos é mais elevada que a do fluido no interior deles, ao contrário de como ocorre no teste aqui descrito. A condição de perdas térmicas no caso sem radiação é também importante para gerar uma curva de perdas térmicas como função da radiação externa. Essa ocorrerá em caso de transientes diários por passagem de nuvens.

Também serão realizados testes de perdas térmicas com radiação concentrada incidindo sobre o absorvedor. Neste caso é necessário entrar com o rendimento ótico do concentrador, que também deve ser obtido experimentalmente. Juntando as informações dos diferentes testes será possível ter um bom entendimento de como ocorrem as perdas térmicas no absorvedor.

### 4.3 Testes com geração de vapor

Finalmente serão realizados os testes com geração direta de vapor no absorvedor, que são o objetivo principal do estudo. Diferentes taxas de recirculação, temperaturas de operação e layout de escoamento entre os seis tubos do absorvedor serão analisados.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo de desenvolver um protótipo funcional de um CFL foi alcançado dentro do projeto descrito. As etapas realizadas para alcançar tal objetivo foram detalhadas no presente trabalho, assim como etapas futuras que envolvem a análise do CFL desenvolvido. Dentre todos os processos e decisões de projeto e construção do concentrador, os mais relevantes foram analisados. Em relação ao projeto, o desempenho da configuração obtida através do método de *Monte Carlo Ray-Tracing* ainda será avaliado por testes de rendimento. Os processos construtivos descritos provaram ser adequados para a construção de um CFL. Dentre estes, o sistema de fixação dos espelhos foi capaz de gerar curvaturas de precisão satisfatória e mantidas a quase dois anos com espelhos expostos às intempéries, entretanto a montagem dos espelhos através dele ainda é muito artesanal e trabalhosa. Isto não se apresentou como um

grande problema para o caso de um módulo de CFL para teste, entretanto este sistema de fixação e curvatura necessitará de melhorias para expandir sua aplicação para a indústria. O sistema de rastreamento obteve bons resultados de precisão, operando o dia inteiro dentro da incerteza de  $0,12^\circ$  na posição angular final dos espelhos. Desta forma ficou demonstrado que um mecanismo utilizando apenas um atuador para girar todas as fileiras de espelhos é uma alternativa econômica e viável. Os testes de perdas térmicas realizados na bancada dentro do laboratório serão validados com o protótipo CFL em operação.

O CFL está atualmente em fase de teste com suas curvas de rendimento sendo levantadas. Testes iniciais mostram a viabilidade técnica do uso da tecnologia de concentração Fresnel linear para a geração direta de vapor.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPQ pelos recursos disponibilizados mediante o projeto aprovado 406357/2013-7. Agradecemos também a CAPES e ao programa de pós-graduação em engenharia mecânica (POSMEC) da Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio e suporte financeiro.

### **REFERÊNCIAS**

- Barlev D, Vidu R, Stroeve P. Innovation in concentrated solar power. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2011;95:2703–25. doi:10.1016/j.solmat.2011.05.020.
- Delatorre J, Baud G, Bézian JJ, Blanco S, Caliot C, Cornet JF, et al. Monte Carlo advances and concentrated solar applications. *Sol Energy* 2014;103:653–81. doi:10.1016/j.solener.2013.02.035.
- Dudley VE, Kolb GJ, Mahoney AR, Mancini TR, Matthews CW, Sloan M, et al. Test results: SEGS LS-2 solar collector 1994.
- Morin G, Dersch J, Platzer W, Eck M, Häberle A. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. *Sol Energy* 2012;86:1–12. doi:10.1016/j.solener.2011.06.020.
- Sá AB, Pigozzo VCF, Passos JC, Cascaes GM, Burigo A. Geometrical Parametric Analysis to Find Optimum Configuration of a Solar Concentrator Workbench Using Linear Fresnel Technology. *Proc. ISES Sol. World Congr. 2015, Freiburg, Germany: International Solar Energy Society; 2016*, p. 1–11. doi:10.18086/swc.2015.10.06.
- Sharma AK, Sharma C, Mullick SC, Kandpal TC. Solar industrial process heating: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:124–37. doi:10.1016/j.rser.2017.04.079.
- U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2017*. Sept 14, 2017 2017:76. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>.
- Zarza E, Valenzuela L, León J, Hennecke K, Eck M, Weyers HD, et al. Direct steam generation in parabolic troughs: Final results and conclusions of the DISS project. *Energy* 2004;29:635–44. doi:10.1016/S0360-5442(03)00172-5.
- Zhu G. Development of an analytical optical method for linear fresnel collectors. *Sol Energy* 2013;94:240–52. doi:10.1016/j.solener.2013.05.003.
- Zhu G, Wendelin T, Wagner MJ, Kutscher C. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. *Sol Energy* 2014;103:639–52. doi:10.1016/j.solener.2013.05.021.

### **DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTS OF A LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATOR PROTOTYPE FOR DIRECT STEAM GENERATION FOR INDUSTRIAL PROCESSES**

**Abstract.** *Linear Fresnel Solar concentrators have a great potential for application in the medium range temperature steam market. However, because it is a relatively new technology, still a lot of research and development need to be done in thermal and economic feasibility for different markets. This work presents the preliminary results of a project that had as scope the design, construction and test of a CFL. This prototype has a total area of  $54\text{m}^2$  mirrors and a 12m long trapezoidal cavity multi-tube absorber. The design and manufacturing methods used in the main parts of CFL, as well as the procedures for optical, geometric and thermal characterization are described here. Although this is still an ongoing project, the technical viability of using linear Fresnel concentration technology for direct steam generation has been proved for a multi-tube configuration.*

**Key words:** *Solar Energy, Linear Fresnel Concentrator, Direct Steam Generation.*