

DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO

Leonardo Pereira de Lucena Silva; Wanderley Ferreira de Amorim Junior

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

Resumo: Uma das alternativas para a minimização dos impactos ambientais causados pelo rejeito salino da osmose reversa é realizar uma nova dessalinização para reduzir o seu volume. Essa nova dessalinização pode ser realizada por um processo de dessalinização por umidificação e desumidificação. Uma forma de reduzir os custos operacionais desse sistema é realizar o aquecimento do fluido a partir da fonte solar. Contudo os aquecedores solares atualmente comercializados no Brasil não trabalham adequadamente dentro das vazões e temperaturas demandados por esses sistemas de dessalinização. Por isso o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um coletor solar que atenda a esses requisitos e que possa ser fabricado inteiramente com tecnologia local. Para a realização desse projeto foi feito um extenso levantamento bibliográfico, onde foram estudados diversos equipamentos similares, com objetivo de gerar uma concepção que atendesse a todos os requisitos e especificações do projeto. Após o estudo foi gerado uma concepção com os principais subsistemas do coletor. Posteriormente esses subsistemas foram dimensionados e fabricados e testados para condições similares as que ele seria submetido caso estivesse em operação. Após os testes individuais foi realizado um teste de campo, para o qual foi desenvolvido um sistema que permitisse o coletor funcionar em sistema fechado e onde foram inseridos diversos pontos de medição de temperatura e vazões do sistema. Para que se tivesse uma base de comparação foi utilizado um software que funciona a partir da solução das equações fenomenológicas envolvidas no processo de aquecimento termosolar. Os testes mostram um comportamento similar da curva de aquecimento experimental e simulada durante o aquecimento a baixas temperaturas, havendo uma divergência entre elas a medida que a temperatura aumenta. Conclui-se que foi possível o desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico fabricado com tecnologia local, que pode ser utilizado como fonte de calor para o processo de dessalinização por umidificação e desumidificação.

Palavras-Chave: Dessalinização; Aquecimento solar; Energia solar concentrada.

Introdução

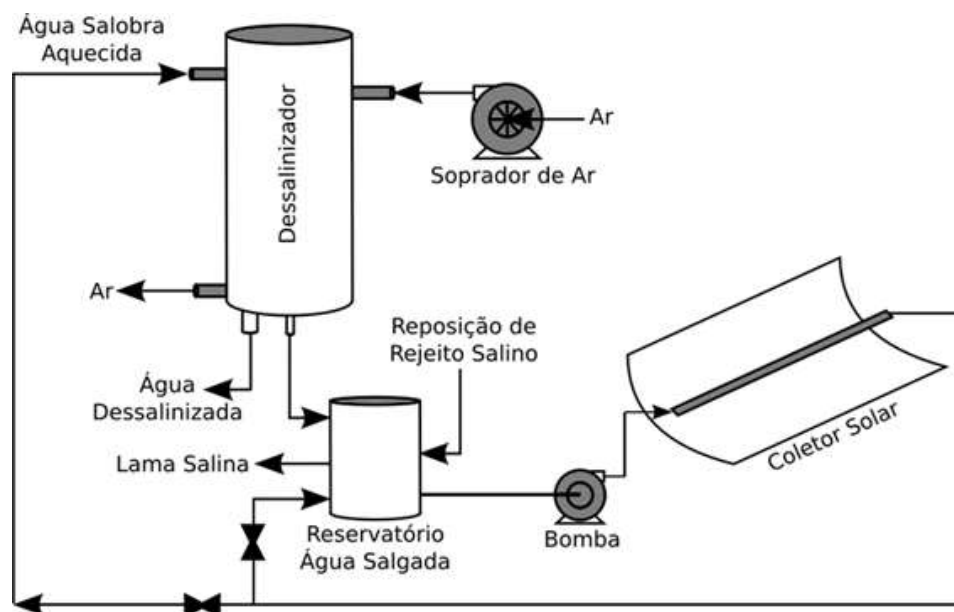
No Brasil, uma das regiões mais afetadas pela falta d'água é o semiárido Nordeste. Essa região corresponde a 11% do território nacional, possui cerca de 12% de toda a população do país, distribuindo-se por todos os estados do Nordeste e parte do estado de Minas Gerais. Nessa região são comuns longas estiagens, em torno de 20 em cada 100 anos (MARENGO, 2006).

A fim de melhorar a interação do homem com o ambiente do semiárido, o Programa Água Doce deu início à implementação, em comunidades carentes, de soluções que venham a contribuir para a disponibilidade de água de qualidade para o consumo humano.

Contudo, um aspecto negativo da proposta do Programa Água Doce diz respeito à destinação do efluente gerado pela dessalinização, uma vez que utiliza a técnica da Osmose Reversa. Pode-se esperar que para cada litro de água pura produzida, será também produzido um litro de rejeito com elevado teor de sais, que não deve ser lançado diretamente na natureza e que apresenta um alto custo de manejo.

Com objetivo de tratar o rejeito da osmose reversa Coutinho, 2013 propôs um sistema para tratar o rejeito salino da osmose reversa. Esse sistema está representado na Figura 1.

Figura 1 - Sistema de Dessalinização por Umidificação e Desumidificação.



Fonte: Coutinho, 2013

Para que o sistema opere de forma eficiente é necessária aquecer a água antes de bombeá-la para o dessalinizador. Por se tratar de uma fonte de energia abundante no semiárido e com o objetivo de reduzir os custos operacionais com o sistema de dessalinização secundário, Coutinho (2013) escolheu a fonte solar para aquecimento dessa água.

O coletor solar a ser selecionado deve aquecer a água a médias temperaturas ($\sim 90^{\circ}\text{C}$) e a grandes vazões, excluindo dessa forma a possibilidade de utilizar coletores planos, por isso Coutinho (2013) selecionou o coletor solar do tipo cilíndrico parabólico para o seu sistema. Contudo, esse tipo de coletor não é comercializado no Brasil, sendo necessário o seu desenvolvimento.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento desse coletor solar cilíndrico parabólico a ser utilizado como fonte de calor para um sistema de dessalinização por umidificação e desumidificação.

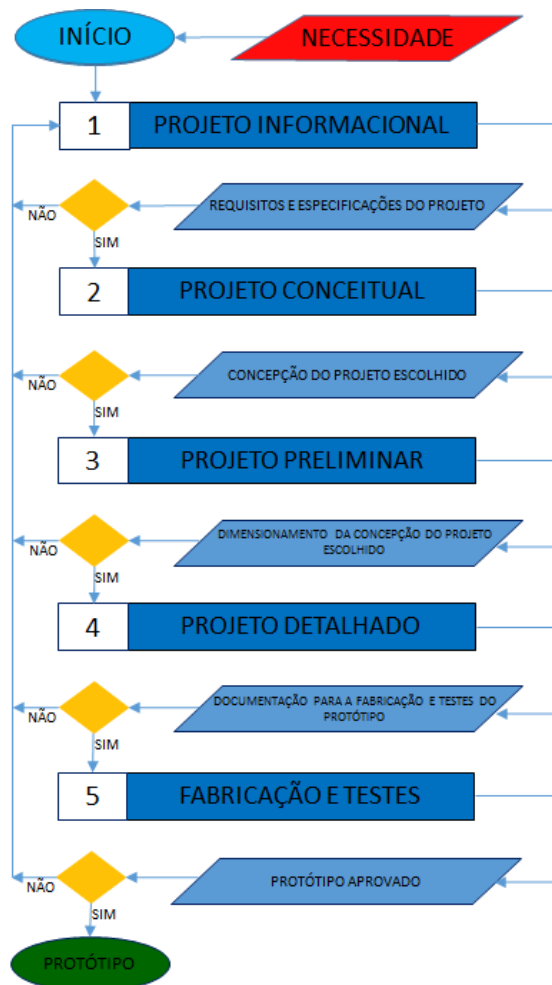
Metodologia

O projeto de um dispositivo é um processo especializado na resolução de problemas. A solução desses é atingida quando forem satisfeitas o maior número de seus requisitos e especificações. A metodologia de projeto é adotada é mostrada na Figura 2.

Nessa metodologia observa-se as seguintes fases:

- *Definição do Problema (Projeto Informacional)* é a interpretação e a limitação dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Para tanto, reuniram-se todas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido.
- *Projeto Conceitual*: busca-se apresentar na forma de croquis, diagramas, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem à demanda de projeto.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia de projetos adotada



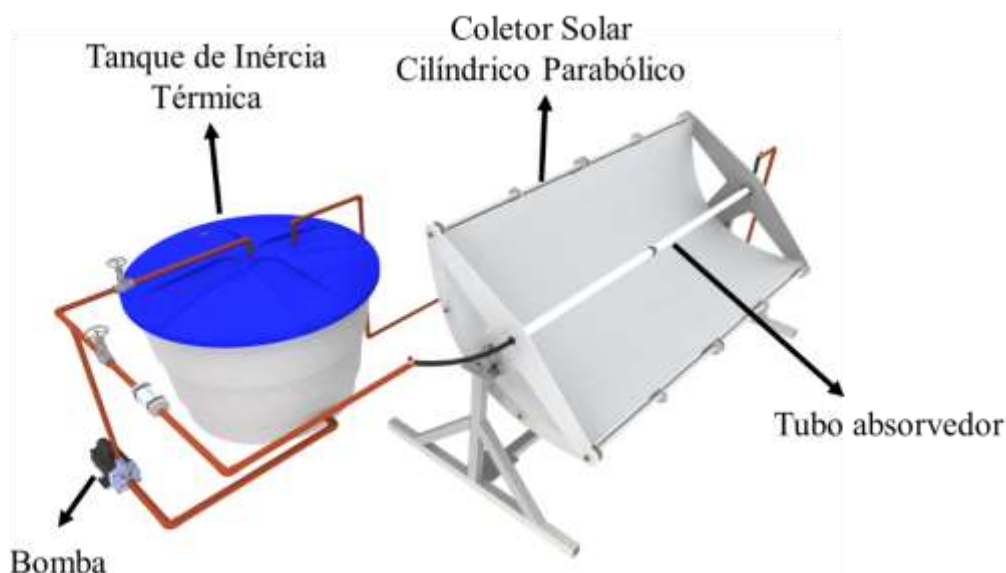
Fonte: Adaptado de Marimbondo, (2000).

- *Projeto Preliminar*: busca-se estabelecer materiais e espessuras que resistam aos esforços solicitados em conformidade.
- *Projeto Detalhado*: com relação aos processos de fabricação e as normas vigentes no país, quanto à segurança operacional e a confiabilidade do produto, detalhando a documentação para a construção do protótipo.
- *Construção do Protótipo*: faz-se uso dos recursos disponíveis em termos de fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores.
- *Teste de Validação*: para verificação ao atendimento às especificações de projeto e, conseqüentemente, a demanda inicial.

Para a realização dos testes foi montado um sistema acoplado ao coletor solar de forma que fosse possível avaliar a sua performance térmica. Esse sistema está mostrado na Figura 3. Para os testes inicialmente o sistema deve sair da sua posição de repouso e se posicionar automaticamente para o nascente, independente da época do ano, assim independente da real posição do Sol. Uma vez estando na posição adequada, o sistema de bombeamento de fluido é acionado, havendo o início do processo de aquecimento. A partir daí o sistema seguirá o Sol, não permitindo que o foco luminoso divirja do foco geométrico e assim cedendo a maior quantidade de calor para o fluido de trabalho, que vai ter a sua temperatura monitorada e armazenada no sistema de aquisição de dados que será acoplado ao aparato.

Para que se tivesse uma base de comparação foi utilizado um software desenvolvido por Coutinho (2013) no seu doutorado. Esse software permite avaliar o desempenho do sistema de aquecimento utilizando um coletor solar cilíndrico parabólico, a partir de dados de radiação solar, velocidade e temperatura do ar e propriedades dos materiais dos quais são constituídos o coletor e as suas tubulações. O software funciona a partir da solução das equações fenomenológicas envolvidas no processo de aquecimento termosolar.

Figura 3 - Aparato para teste do coletor solar cilíndrico parabólico.



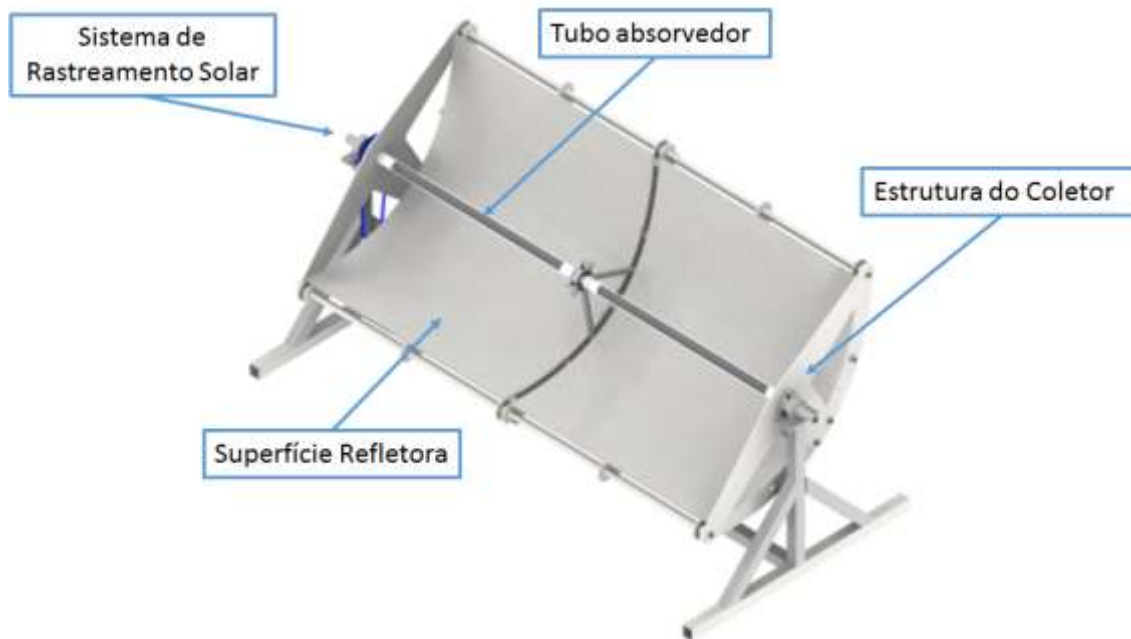
Resultados e discussão

Após pesquisar artigos, teses, patentes, consultas a especialistas e análise de 12 modelos de coletores, foi montado concebido o coletor solar cilíndrico parabólico que apresenta os seguintes subsistemas: Estrutura de sustentação, superfície refletora, tubo absorvedor e sistema de rastreamento solar., como mostrado na Figura 4 Esses subsistemas foram concebidos, dimensionados, fabricados e testados durante a realização do trabalho Silva e Amorim Junior (2017). Segue a apresentação e discussão dos principais aspectos do desenvolvimento

O projeto da superfície refletora e da estrutura do coletor passa pela determinação do ângulo de borda e da abertura do coletor.

Não existe uma regra única para a definição do ângulo de borda. Caso utilize-se um pequeno ângulo de borda, consegue-se uma maior área de coletar a partir de uma menor quantidade de superfície refletora, assim tornando o equipamento menos robusto (menor carga de vento) e demandando uma menor quantidade de superfície refletora. Já um grande ângulo de borda trás o tubo coletor para mais próximo da superfície refletora, aumentando assim o fator de interceptação e reduzindo as perdas do coletor. Assim a determinação do ângulo de borda exige uma solução de compromisso, que foi determinada a partir das melhores práticas para o projeto de coletores concentradores Günther, Joemann e Csambor (2011) e da análise dos trabalhos de Kalogirou et al. (1994) e Treadwell (1976). A partir dessas análises foi escolhido o ângulo de borda de 90°.

Figura 4 - Projeto Conceitual do coletor solar cilíndrico parabólico.

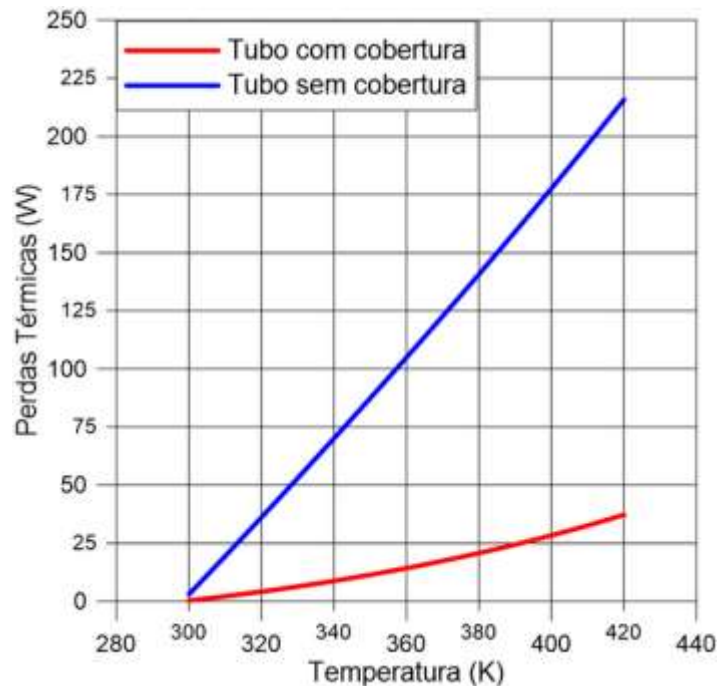


A abertura do coletor foi feita a partir da disponibilidade de folhas de aço inox (superfície refletiva) no mercado local. Como o mercado dispunha apenas de folhas de 1,2 m de largura, quando se calculou a área modificada proposta por Kalougirou (2009), chegou-se a uma abertura de aproximadamente 1 m.

O tubo absorvedor é a parte do equipamento responsável pela absorção da radiação solar e a transferência dessa energia térmica para o fluido de trabalho. Os dois principais modelos observados durante a análise dos protótipos são os tubos com cobertura de um tubo de vidro e sem essa cobertura. Durante a fase de projeto, foi modelado matematicamente esses dois sistemas, com e sem cobertura de um tubo de vidro. A partir desses cálculos foram geradas curvas para as perdas térmicas totais (condução, convecção e radiação), mostradas na Figura 5, e foi observado que para a temperatura de operação de 90°C (363 K), as dimensões do tubo absorvedor utilizado e condições de temperatura ambiente e velocidade de vento típicas, as perdas térmicas para um tubo sem cobertura seriam aproximadamente 5 vezes superiores. Dessa forma, optou-se pela utilização de um tubo absorvedor com cobertura de um tubo transparente.

Como tubo transparente, foi utilizado um tubo de borossilicato, pois esse proporciona uma maior transmissibilidade para comprimentos de onda dentro do espectro do visível (380 – 780 nm).

Figura 5 - Comparação das perdas térmicas com e sem tubo transparente.



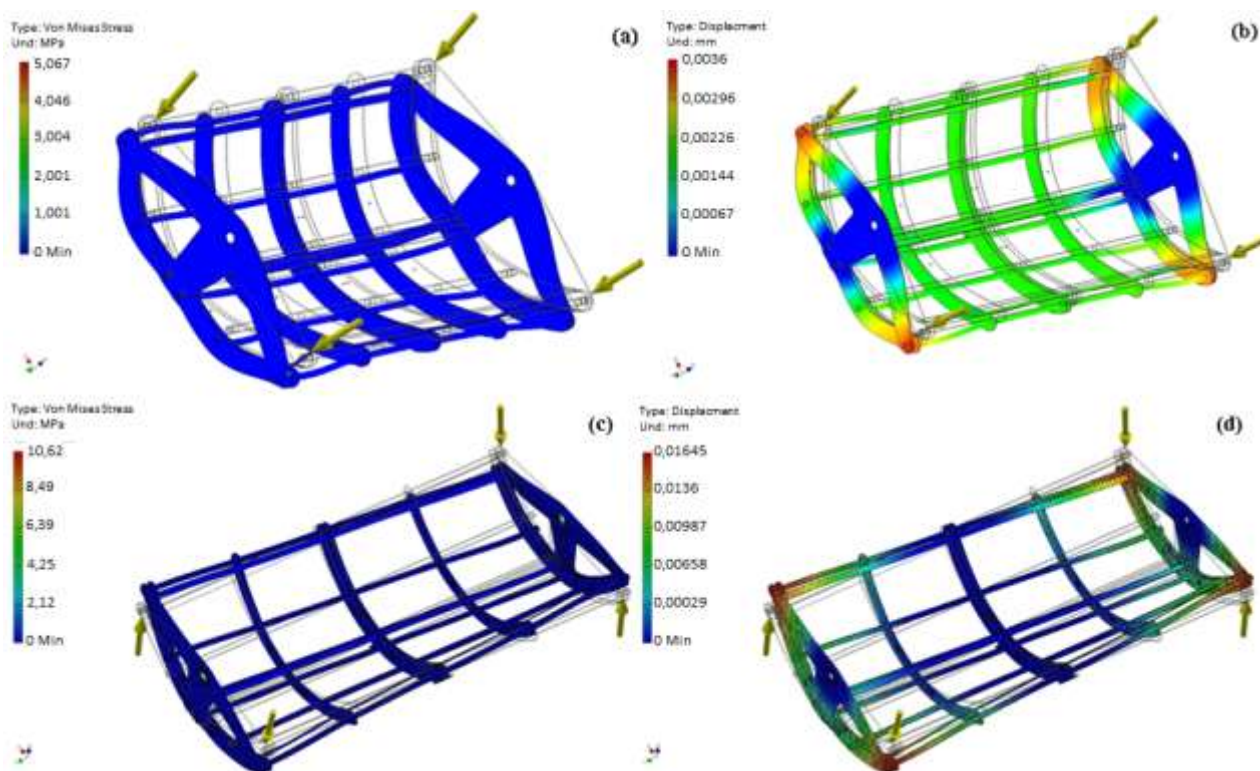
Após a fase de projeto conceitual, deu-se início a fase de projeto preliminar.

Para os testes da estrutura foi utilizado uma metodologia proposta por Venegas-reyes et al. (2012), que propõe o dimensionamento do seu coletor a partir de dois esforços predominantes, o esforço de flexão e o esforço de torção. Para as simulações foi utilizado o software Autodesk Inventor 2015. Esse software apresenta uma parte do pacote ANSYS[®] que permite a realização de testes estáticos em estruturas. Nessas simulações, os esforços de pressão foram traduzidos em esforços pontuais atuando na estrutura e são dispostos a gerar os esforços de interesse, a fim de analisar o comportamento da estrutura quando submetidos a esses esforços.

Nessa etapa, deu-se atenção especial a resistência a deformação da estrutura que servirá de suporte para a superfície refletora e para o tubo absorvedor. Essa atenção deve-se ao fato do coletor estar constantemente submetido a cargas de vento, podendo assim haver deformações elásticas de tal ordem que reduzam o fator de interceptação, levando assim a uma menor eficiência térmica do sistema de aquecimento. Dessa forma, o critério para o dimensionamento não poderia ser o convencional, que é evitar que a estrutura apresente deformação plástica, mas sim dimensionar a estrutura de forma que a mesma não apresente deformação superior a 0,1 mm, sob pena de se ter uma diminuição de mais de 5% no fator de interceptação do coletor.

Para realização dos ensaios foi necessário a determinação dos esforços que atuam no coletor. Para essa terminação foi utilizada um método proposto por Potter e Wiggert (2009), considerando uma condição extrema de velocidade de vento de 15 m/s e o coletor posicionado a 90° em relação ao vento. Os resultados dessa simulação são mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Simulação de flexão e torção na estrutura da superfície refletora utilizada no coletor solar cilíndrico parabólico. a) Tensão sob flexão, b) Deformação sob flexão, c) Tensão sob torção e d) Deformação sob torção.



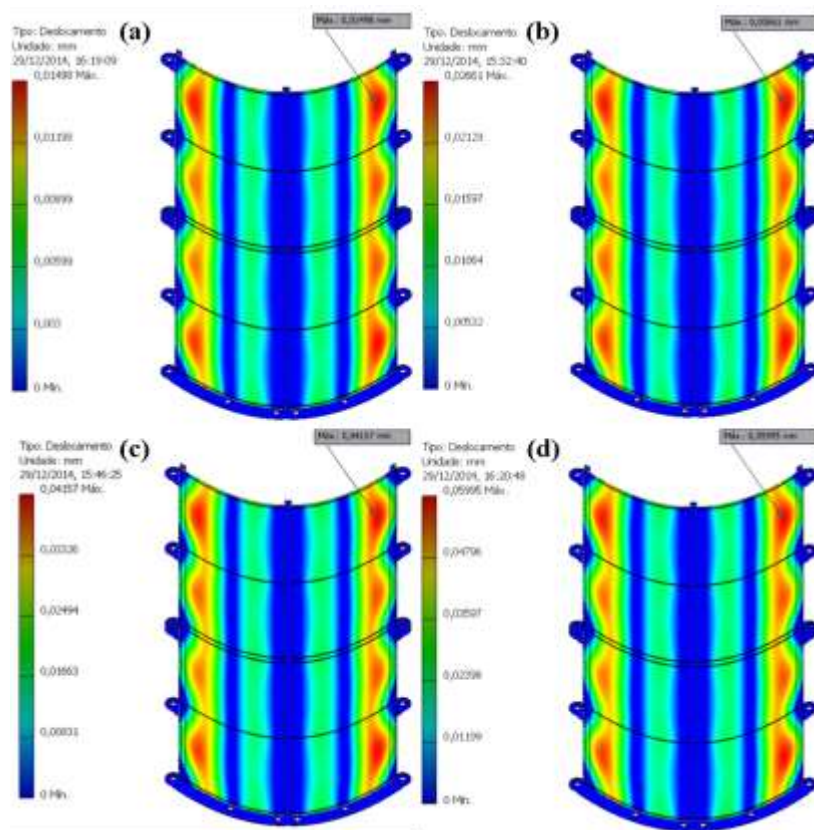
A partir dos resultados, vê-se que a maior tensão é de 10,62 MPa, obtida na condição (c) de torção pura, é bem inferior a tensão limite de escoamento do aço 1020 (~200 MPa), como já esperado pois o critério utilizado foi o de deformação mínima. Já a maior deformação encontrada foi de 0,0036 mm na condição (b) sob flexão pura, que é bem inferior ao critério de deformação escolhido, atestando a qualidade ótica da estrutura.

Uma vez sabido que as costelas não apresentam deformações excessivas, foi utilizado o mesmo procedimento, descrito anteriormente, para simular a superfície refletiva. Esta superfície foi obtida a partir de uma folha de aço inox polido fixado sob a estrutura das costelas, como mostrada na Figura 6. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b). Para essa simulação foram utilizadas cargas de vento de 6, 8, 10, 12 m/s. Os resultados dessa simulações são apresentados na Figura 7. A

partir da simulação observa-se que as deformações são inferiores a 0,1 mm, assim não influenciando significativamente na eficiência térmica do coletor.

A partir da Figura 7 vê-se que os pontos de maiores deformações são nos pontos médios entre as costelas e bem próximo das bordas do coletor, sendo que essa deformação é maior nas extremidades, dessa forma, caso a deformação fosse excessiva, esse seria o ponto onde se deveria acrescentar reforço estrutural.

Figura 7 - Deformação pela velocidade de vento na folha metálica utilizada como Superfície de Reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico. (a) 6 m/s, (b) 8 m/s, (c) 10 m/s e (d) 12 m/s.



Dessa forma foi concluído a fase de projeto preliminar e foi dado início a fase de projeto detalhado.

Esse projeto também foi desenvolvido utilizando o software Autodesk Inventor 2015, merendo destaque para os desenhos das extremidades do coletor e da costela que precisaram ter os seus modelos exportados para um equipamento de corte a plasma, como discutido na etapa de construção do protótipo.

O principal desafio de fabricação foi a obtenção das costelas com um perfil parabólico segundo a equação estabelecida de forma a obter a abertura do coletor e o ângulo de borda. Para a obtenção dessas costelas foi necessário a utilização de uma corte a plasma equipado com Comando Numérico Computadorizado (CNC) de dois eixos.

Algumas etapas da fabricação estão mostradas na Figura 8. Após o corte foram obtidos os perfis mostrados na Figura 8 (a). Esses perfis foram direcionados para uma empresa onde foi fabricada a estrutura do coletor, mostrado na Figura 8 (b) e após essa etapa foi colocada a superfície refletora e o sistema de rastreamento solar.

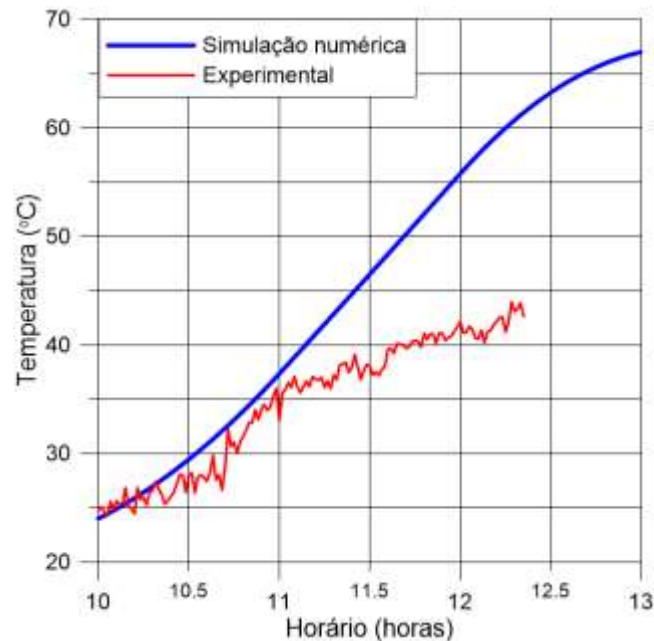
Figura 8 - Etapas da fabricação do coletor solar cilíndrico parabólico. a) Perfis obtidos com o corte a laser, b) Estrutura do coletor obtida a partir dos perfis e c) Coletor solar montado



Após a fabricação, foi dado início os testes preliminares de campo do coletor.

Os testes preliminares foram realizados na sede da empresa Suna Engenharia, num local ensolarado apenas em uma parte da manhã. Assim foi tomado os dados de um teste que ocorreu das 10 as 12 horas e 30 min e comparado com uma simulação das 10 às 13 horas realizado pelo software desenvolvido por Coutinho, 2013. Essa comparação está mostrada na Figura 9.

Figura 9 - Comparação entre os dados experimentais e simulação numérica do coletor solar cilíndrico parabólico.



Como pode-se observar na Figura 9, ambas as curvas apresentam inclinações semelhantes, o que mostra que a taxa de aquecimento é semelhante para os dois casos. As diferenças entre as curvas são atribuídas a limitação do software quanto a captar todas as características do coletor, como o seu fator de interceptação, perdas de final de linha e as perdas térmicas para o ambiente. Devendo atribuir a maior parcela dessa divergência a dificuldade do software captar corretamente todas as perdas térmicas e como apresentado em Burkholder e Kutscher (2008) as perdas térmicas são extremamente dependentes da diferença de temperatura entre o tubo metálico e o ambiente, por isso as curvas vão se distanciando a medida que a temperatura se eleva.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho conclui-se que foi possível o projeto, fabricação e teste do coletor solar cilíndrico parabólico usando tecnologia de fabricação local. Conclui-se também que foram possíveis a instrumentação e o desenvolvimento do sistema de rastreamento solar de forma que o coletor possa trabalhar sem interferência humana.

Fomento

A CAPES pelo financiamento da bolsa, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFCG e a Suna Engenharia pela auxílio financeiro através do projeto EDITAL 004/2013 - FINEP/FAPESQ – Programa TECNOVA – PB.

Referências

- BURKHOLDER, F. e KUTSCHER, C. (2008): “Heat-Loss Testing of Solel’s UVAC3 Parabolic Trough Receiver”. Relatório Técnico NREL/TP-550-42394. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42394.pdf> Acesso em Junho de 2011.
- COUTINHO, S. A. Estudo Teórico e Experimental de um Dessalinizador Solar para Tratar Água Salobra. 2013. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- GÜNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S. Parabolic Trough Technology. In: ENERMENA (Jordânia). **Advanced CSP Teaching Materials**. Amman: Enermena, 2011. p. 245-317. Disponível em: http://www.4shared.com/office/ZU40pNM-/chapter_05_parabolic_trough_te.html. Acesso em: 01 ago. 2015.
- KALOGIROU, S.a. et al. Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system. **Applied Energy**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.341-354, jan. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619\(94\)90041-8](http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619(94)90041-8).
- KALOGIROU, S. A., 2009. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, DF: MMA, 2006. 202 p. il. (Biodiversidade, 26).
- MARIMBONDO, J. F. Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares, Aplicada a Unidades de Processamento de Resíduos Domiciliares. Tese de Doutorado – Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2000. 274p.
- POTTER, Merle C.; WIGGERT, David C.. **Mecânica dos Fluidos**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 690 p.
- SILVA, L. P. de L.; AMORIM JUNIOR, W. F. de. **Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico**: Para baixas e média temperaturas. São Paulo: Novas Edições Acadêmicas, 2017. 256 p
- TREADWELL, G. W., Design considerations for parabolic--cylindrical solar collectors. Sharing the Sun, Proceedings of American Section of ISES and Solar Energy Society of Canada, 1976, Vol. 2, pp. 235-52.
- VENEGAS-REYES, E. et al. Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation. **Journal Of Renewable And Sustainable Energy**, [s.l.], v. 4, n. 5, p.0531031-05310318, set. 2012. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4751461>.