

AValiação INICIAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR CÔNICO COM VISTAS À UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

José Augusto Fontenele Magalhães – augusto.fontenele@outlook.com
Sebastião Carlos Sena – sebastiaosena@hotmail.com
Profa. Maria Eugênia Vieira da Silva, Ph. D. – eugenia@sol.les.ufc.br
Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha – paulo.rocha@ufc.com
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este documento apresenta a avaliação de um concentrador solar cônico, instalado no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Tentando aproveitar ao máximo possível a irradiância recebida do Sol, um coletor cônico teria uma melhoria em sua performance se este fosse acoplado a um sistema de rastreamento, fazendo-se uso de um rastreamento não só unidirecional (Leste-Oeste), mas sim de um que permite a captação da irradiância direta no coletor cônico, mesmo que para isto o modelo de rastreamento demande um maior detalhamento. A partir de uma análise de desempenho do coletor atrelado ao rastreamento, torna-se possível analisar dados de eficiência do concentrador para irradiâncias específicas encontradas na Região Nordeste e assim prever dados essenciais de projeto, como as faixas de temperaturas que poderão ser alcançadas com a utilização da energia solar térmica ao longo do aquecimento da água, bem como o total de energia captada por metro quadrado. Este rastreamento, levando em consideração as condições climáticas e a própria inércia do sistema, possibilita um maior controle sobre o aquecimento ao longo do dia, fazendo com que o fluido aquecido possa ter distintas aplicações. Com coletas ao longo do dia, foi possível verificar que o rastreamento apresentou bons resultados sendo efetuado a cada trinta minutos, além de ter sido possível a elaboração de mapas de eficiência x irradiância solar, podendo estes serem utilizados para análises futuras do coletor.

Palavras-chave: Energia Solar, Concentrador Cônico, Rastreamento Solar, Automação.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia passiva do Sol vem atrelada a um desenvolvimento estratégico do uso de energias alternativas para satisfazer a demanda por energia do século. O Sol emite energia irradiada para a atmosfera terrestre de forma praticamente constante e em perspectiva humana ele apresenta uma disponibilidade ilimitada. Como o Sol se encontra a 143 milhões de quilômetros da Terra, cerca de 1410 W/m² de energia é recebida, sendo apenas 19% desse total absorvido pela atmosfera. No entanto, a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, a nível mundial, durante um ano. (Greenpro Project, 2004).

No âmbito da utilização de fonte solar de energia para suprimento da demanda energética do século, os geradores de foco linear (coletores cônicos, cilíndricos, parabólicos, dentre outros) podem ser utilizados para aquecimento de fluidos e com uma posterior transformação de calor em eletricidade de forma similar àquela dada pelo uso de combustíveis fósseis e energia nuclear.

Dentro do princípio da conversão termomecânica, estes equipamentos não são de uso tão recente, já que refletores para concentração solar foram desenvolvidos a mais de um século. Coletores cônicos foram primeiramente desenvolvidos na França com o intuito de aproveitar o vapor produzido para operar prensas tipográficas e posteriormente para bombeamento de água em outras localidades. Deve-se também mencionar um motor a vapor de 4 HP desenvolvido pelo inglês A. G. Eneas, por volta de 1904, nos EUA, que também usava uma seção cônica como refletor (Palz, 1978).

Como benefícios da utilização de tal fonte energética, destaca-se o fato da fonte ser de graça, renovável e inesgotável. Entretanto, em relação a desvantagens, sabe-se que atualmente as tecnologias ainda são caras e a energia solar em si tem um baixo fator de capacidade, já que além de coletores e painéis fotovoltaicos não trabalham durante a noite, mesmo podendo-se fazer previsões sobre dados de irradiância e comportamento dos sistemas, estes dados são muito variáveis, e assim como na utilização da energia proveniente do vento, torna-se uma fonte dependente de condições climáticas e períodos do ano.

Devido a essa aplicabilidade dos sistemas de concentração solar, o seu desenvolvimento se torna algo relevante meio a estratégias de redução de gases do efeito estufa e redução de outros impactos ao ambiente. Levando em consideração a região Nordeste do país, onde o potencial de captação da energia solar é elevado, o uso desses sistemas limpos tem um papel importante, se tratando de uma alternativa energética. Pode-se levar em consideração o fato de haver zonas onde se necessita de aquecimento, refrigeração e energia da rede em geral, mas por serem regiões remotas, o uso de energia solar surge como uma alternativa para suprir tal demanda.

Tratando-se especificamente da localidade onde o sistema foco deste trabalho está instalado, a cidade de Fortaleza está centrada em uma área onde as estações do ano não são bem definidas, a temperatura média é em torno de 26°C, com

clima semi-árido e com uma baixa latitude, encontrando-se em uma das zonas de alto potencial solar, mostrado na Fig. 1, onde este potencial é apresentado de acordo com as tonalidades de cada região.

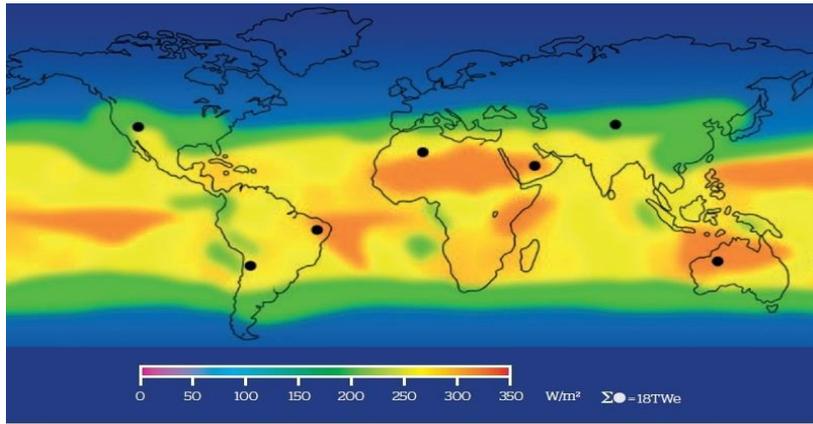


Figura 1 – Mapa de Irradiância Solar no mundo. Irradiância em W/m^2 .
Adaptação de Matthias Loster, Revista Renergy Brasil.

Geradores solares, sejam eles térmicos ou fotovoltaicos (fonte direta de eletricidade), são geralmente acoplados a sistemas de medição de dados terrestres relacionados ao comportamento do sol durante o dia e a condições climáticas. Para o sistema de concentração solar, são utilizados dados de medidores dos diferentes tipos de irradiância solar, dados do vento, faixas de temperatura de trabalho do coletor, vazões de trabalho, entre outras variáveis.

Sendo assim, este trabalho objetiva a avaliação de um sistema acoplado ao concentrador solar cônico de forma a aumentar sua eficiência, fazendo este passar por um processo de rastreamento, a fim de manter um controle sobre a troca de calor que acontece devido à captação da energia do sol. No caso específico do concentrador cônico, é importante a análise de quais variáveis estão diretamente atreladas à eficiência da troca de calor, sejam estas a irradiância solar, a posição do concentrador, a região onde ele se encontra instalado, dentre outras. A partir de um sistema otimizado e fazendo uso de rastreamento solar, torna-se possível a construção de métodos de previsão de dados do concentrador para diferentes condições climáticas e fluidos de trabalho, tornando o sistema uma referência para futuras inovações tecnológicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Todo o mecanismo termomecânico deve ser regido por diferentes sistemas de controle, como medidores de irradiância solar e de temperatura do fluido ao longo do trocador de calor, atuadores que geram o movimento do concentrador de forma a se alinhar com o sol e medidores de vazão. Alguns aspectos do sistema são discutidos a seguir:

2.1 O Sol

O Sol é uma estrela sem superfície sólida formada basicamente por gás hidrogênio (H_2) e Hélio (He), cuja temperatura no seu núcleo atinge 15 milhões de graus Celsius (27 milhões de graus Fahrenheit) e sendo fornecedor de energia intensa de suma importância para a vida na Terra (NASA, 2003).

A energia praticamente constante irradiada pelo sol é descrita como a constante solar relativa a uma área de $1 m^2$ e ela possui diversas componentes: a irradiância solar direta, I_{dir} , proveniente do sol, que não sofre nenhuma mudança de direção, e a irradiância difusa, I_{dif} , que sofre o processo de difusão de moléculas de ar e partículas de pó, como mostrado na Fig. 2. No caso do concentrador solar cônico, esta última tem sua participação quase desprezível, devido à própria geometria do coletor e ao mecanismo de captação da irradiância, dado por uma serpentina direcionada à posição do sol.

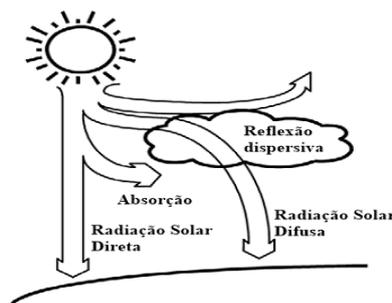


Figura 2: Passagem da Irradiância pela atmosfera. Adaptado de Quasching (2005).

A Fig. 3 mostra a medição de irradiância direta e difusa durante um dia típico ensolarado com nuvens no município de Fortaleza. Os dados são mostrados em potência por unidade de área, isso ao longo de um dia.

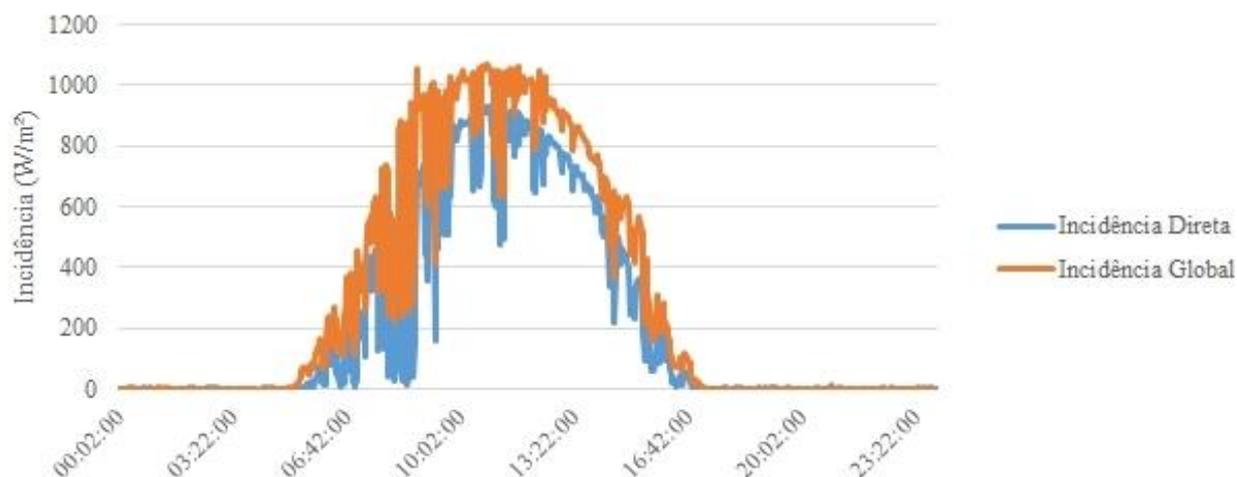


Figura 3: Irradiância Solar em Fortaleza em um dia ensolarado com nuvens. LESGN.

2.2 Aparelhos e Rede de Medição

Quanto à irradiância solar que mais influencia nos coletores pontuais (I_{dir}), sua medida é feita diretamente por meio de um piroheliômetro, pois este tipo de instrumento, seja operacional ou de campo, é usado juntamente ao piranômetro (instrumento capaz de medir dados de irradiância global) para fornecer a maioria dos dados de projetos de engenharia de sistemas com energia solar. Acoplado a um mecanismo de rastreamento, ele possui um detector ao fim de um tubo colimador, que contém diversos diafragmas e é negro em seu interior. Ele também utiliza um termômetro que é o transdutor responsável pela associação entre a temperatura de um disco de prata aquecido diretamente pelo sol e valores de irradiância.

Outro aparelho utilizado no controle de sistemas de energia solar térmica são os termopares. Estes transdutores são acoplados a diversos pontos dentro do sistema a fim de medir a temperatura do fluido que será aquecido, podendo fornecer dados para posterior análise de eficiência, por exemplo. Dados de vazão do fluido a ser aquecido também precisam ser coletados, já que a análise do calor trocado pelo concentrador só será possível mediante tal coleta. Medidores de vazão costumam ser acoplados no ponto mais próximo do trocador, a fim de se evitar perdas de carga ou interferências externas.

2.3 O Coletor

Com o intuito de elevar a irradiância nos receptores, muitos tipos de concentradores podem ser utilizados em instalações de energia solar térmica. Estes equipamentos podem apresentar concentração linear, como no caso de coletores parabólicos e cilíndricos, ou concentração pontual, como nos paraboloides de revolução. Os concentradores podem ser constituídos de refletores ou refratores, sendo que para refletores com superfície de revolução (concentradores circulares) deve-se haver uma orientação de forma a alinhar o eixo e o sol, de forma que o coletor seja capaz de se mover em dois eixos.

2.4 Sistema de Rastreamento

Por se tratar de um sistema que demanda constante posicionamento da serpentina em direção ao sol, o sistema de rastreamento é peça fundamental em uma instalação solar. Dependendo da localização de tal sistema, torna-se necessário o ajuste do coletor com relação aos diversos ângulos que definem a posição solar em determinado instante. Os dois ângulos que definem a posição do sol utilizados em tal projeto de rastreamento são definidos a seguir:

Altura Solar γ_s : ângulo formado pela direção do Sol e o plano horizontal do local onde se encontra o observador.

Azimute α_s : ângulo solar que descreve o ângulo entre o norte geográfico e o arco vertical que passa pelo centro do sol.

A altura do sol e o azimute solar dependem da localização geográfica do observador, do dia e da hora. A posição do sol é bastante influenciada pelo ângulo entre o plano equatorial da Terra e o plano rotacional da Terra em torno do Sol, chamado de declinação solar (Quaschnig, 2005). A declinação solar varia entre $+23^{\circ}26,5'$ e $-23^{\circ}26,5'$ durante o ano, sendo que a duração de um dia solar também varia ao longo do ano devido à órbita não circular da Terra. Os ângulos tratados acima são mostrados na Fig. 4.

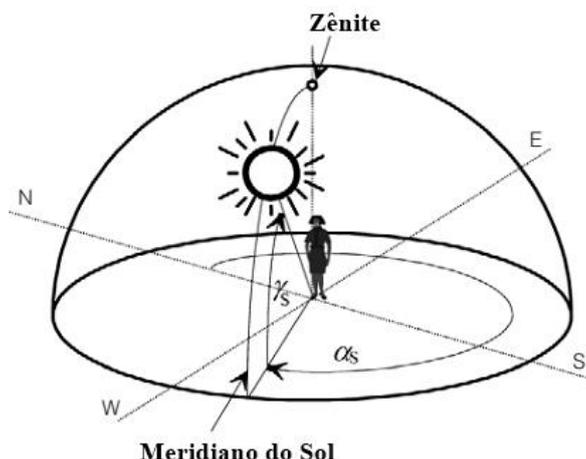


Figura 4: Definição dos ângulos que descrevem a posição do Sol.
Adaptado de Quaschnig (2005).

Para determinar a localização do sol em um específico dia, hora, latitude, dentre outros parâmetros, pode-se fazer uso de três mecanismos de rastreamento: algoritmos desenvolvidos para cálculo da posição solar, utilização de controle automatizado e rastreamento manual ao longo do dia. Os três mecanismos são descritos brevemente abaixo.

Algoritmos para cálculo da posição solar: Se faz uso de dados de longitude, hora local, fuso-horário para cálculo da hora local média. Salienta-se que dados de altura solar e azimute possuem precisão dependendo do método utilizado, o que varia com o algoritmo escolhido. Vários algoritmos foram desenvolvidos para calcular a posição do Sol, seja este o SUNAE, NREL ou o DIN, que, ainda segundo Quaschnig (2005), são algoritmos alternativos que se diferem quanto ao nível de complexidade e precisão na posição do Sol.

Controle Servo: após a coleta dos dados de irradiância direta instantânea, no caso de coletores cônicos, sensores informam a um microcontrolador qual a posição ótima para posicionamento do coletor ao longo do dia. Um motor de passo também é utilizado nesse tipo de sistema de rastreamento e desta forma consegue-se posicionar o coletor dependendo do arranjo de sensores instalados.

Sistema de rastreamento manual: fazendo-se uso de acessórios mecânicos acoplados ao próprio coletor, como os guias de sombra, consegue-se observar se a linha direta do sol está ou não alinhada à serpentina do gerador solar (no caso dos coletores pontuais). O rastreamento é feito em tempos predeterminados e o sistema é acoplado a barras mecânicas que permitem ajuste em diferentes posições. Necessita-se também de uma base rotatória para o sistema, já que rastreamento apenas Leste-Oeste não leva em conta a declinação solar, por exemplo. Para sistemas focais, qualquer desalinhamento do sol já acarreta grande perda na captação da irradiância solar.

3. METODOLOGIA, INSTALAÇÃO E EXPERIMENTOS

Para um processo de aquecimento de água, o coletor cônico é acoplado a um sistema de armazenamento de tal fluido, podendo este ser uma caixa d'água atrelada à companhia de fornecimento local, no caso de Fortaleza, a CAGECE. Utilizou-se uma caixa com capacidade de 2000L, que serve para todo o abastecimento dos coletores solares do LESGN. O controle da quantidade de fluido que entra no coletor é feito a poucos metros deste, por uma torneira que possui um termopar para medir a temperatura fria do fluido.

O coletor cônico, com boa parte constituída de alumínio, possui um diâmetro de aproximadamente 1,10m e é dotado de uma serpentina, por onde o fluido passa continuamente. O coletor possui dois guias de sombra, a fim de favorecer um melhor ajuste no momento do rastreamento solar. Estes guias são: a própria serpentina, que faz sombra na base interior do coletor quando este não está alinhado ao sol e um parafuso na extremidade da superfície cônica, que possibilita o ajuste do azimute.

Utilizou-se uma superfície transparente para cobrir a base do cone, pois segundo Arbizu e Mesa (2013), a superfície proporciona um melhor aproveitamento da irradiância absorvida, evitando-se perdas para a atmosfera. Para tal, usam-se plásticos próprios para a montagem de coletores solares.

Com dois termopares do tipo K, dois canais do *datalogger* foram utilizados para coleta de temperatura instantânea da água, na entrada e saída do coletor. Estes dados podem ser coletados a cada 48hs e associados aos dados de irradiância medidos também em tempo real através de um piroheliômetro. Dados de irradiância global provenientes de um piranômetro horizontal servem de base para acompanhamento diário da irradiância solar, pois devido à geometria do gerador solar, este funciona majoritariamente com irradiância direta.

Estes dados coletados tanto do anexo de coleta solar do LESGN quanto do *datalogger* instalado nas proximidades dos coletores são colocados em uma planilha para posterior análise de dados de eficiência, quantidade de calor absorvida e quantidade de fluido aquecido a cada dia. Em um banco de dados pode-se verificar qual a irradiância esperada para determinado período do ano e é então feita a escolha dos dias de testes com o coletor cônico.

O coletor é acoplado a uma base metálica dotada de diversos furos que possibilitam a mudança da angulação do cone da forma que se deseja, como mostrado na Fig 5.



Figura 5: Base metálica com sistema de ajuste dos ângulos do coletor.
LESGN.

Cada furo da barra horizontal possibilita a mudança de $7,5^\circ$ do coletor, o que é suficiente para mudanças a cada 30 minutos (tempo estimado para melhor funcionamento do coletor, podendo este ser a cada hora ou sem nenhum padrão (Arbizu e Mesa, 2013). Os furos são de fácil encaixe no parafuso circulado à direita da Fig. 5 e a base dessa estrutura é dotada de rodas, isto porque para tal rastreamento, é necessário que não só as barras horizontais sejam utilizadas, mas que o coletor seja movido de 360° em seu plano de instalação. O rastreamento Leste-Oeste seria uma simplificação para um melhor posicionamento do coletor, entretanto, como se deseja o uso deste durante todo o ano, utilizar a declinação como um parâmetro a mais no projeto é imprescindível para a captação da irradiância direta.

Quanto à análise da troca térmica, o sistema requer um controle da vazão de água na entrada do coletor. No entanto, como o sistema de fornecimento de água é interligado a todos os coletores do laboratório, não se consegue obter uma vazão constante na entrada da serpentina. Para atenuar qualquer problema causado por esse distúrbio em tal sistema de controle, mede-se a vazão de saída da água do coletor a cada instante em que o rastreamento manual é feito. Tal vazão é então associada aos dados de temperatura e irradiância solar, completando as variáveis necessárias para a análise de eficiência do sistema. Para tal coleta, fez-se uso de uma proveta, de forma a assimilar vazão com o volume da proveta dividido pelo tempo de enchimento, sendo este o tempo necessário para se fazer um ajuste no coletor. Entre outras palavras, a cada intervalo de rastreamento, a coleta dos dados era feita rapidamente.

Os meses de coleta de dados foram os do segundo semestre do ano de 2013, período em que a irradiância direta é mais intensa em todo o estado cearense. Devido à quantidade de nuvens durante o dia que interferiram no caminho da irradiância ao coletor, os testes precisaram ser feitos para diferentes condições meteorológicas.

4. RESULTADOS E CONCLUSÃO

4.1 Rastreamento

O primeiro ponto a ser levado em consideração quanto ao rastreamento é o intervalo no qual este será feito pelo operador, no caso de rastreamento manual. Fazendo-se testes com ajuste da posição a cada uma hora, observa-se uma grande queda de eficiência do coletor, em torno de 25%. Como a própria eficiência de um coletor cônico não é de grande magnitude, por perdas na serpentina, na recepção da irradiância, perdas convectivas e distúrbios externos, tal queda na eficiência durante o funcionamento do coletor representa um grande desperdício de energia do Sol.

Para tal, testes com o coletor sendo posicionado a cada trinta minutos foram elaborados e verificou-se então uma queda em torno de 10% da eficiência durante cada intervalo de tempo, como mostrado na Fig. 6.

As quedas maiores e outras irregularidades que aparecem ao se traçar gráficos de Eficiência x Tempo são devidas principalmente a irregularidades na irradiância direta nos meses de testes, pois mesmo sendo o período não-chuvoso no estado, a passagem das nuvens interferiu bastante a troca de calor em alguns intervalos no dia solar do coletor.

O parâmetro do intervalo de tempo do rastreamento é muito importante, sendo que quanto menor o tempo em que o coletor fica desalinhado com o sol, mais irradiância o gerador solar consegue captar. Entretanto, para um rastreamento de tal detalhamento, deve-se levar em conta os gastos com o motor que faz o posicionamento do coletor, bem como o sistema eletrônico de controle, em caso de um rastreamento automático, por exemplo.



Figura 6: Comportamento da eficiência com o rastreamento manual.

4.2 Dados para futuras previsões

Após verificar que o intervalo estabelecido para o rastreamento manual previne quedas bruscas de eficiência do coletor, é possível traçar comportamentos de tal aparelho para determinadas condições meteorológicas e período do ano, através de um banco de dados do funcionamento do coletor. Com a irradiância solar direta, têm-se a potência fornecida ao coletor pela fonte renovável devido à geometria conhecida do coletor. Já com os dados de temperatura e vazão de água, é possível estimar a quantidade de calor trocada com o fluido por unidade de tempo, tornando o cálculo de eficiência um parâmetro mensurável ao longo do dia.

Dados de eficiência do coletor cônico foram mostrados na Fig. 6 para um dia ensolarado com nuvens, mas podem ser traçados comportamentos de potência útil e eficiência em função da irradiância solar de forma análoga. Na Fig. 7 a potência de aquecimento da água é mostrada de acordo com o tempo em um teste no mês de Novembro durante um certo período do dia. É possível perceber que a presença de interferências na irradiância direta em alguns momentos atrapalha o calor trocado com a água mesmo que o sistema possua alguma inércia. Para intervalos em que a irradiância direta é comportada, percebe-se a mesma tendência do calor trocado com a queda na eficiência enquanto o coletor desalinha-se do Sol.

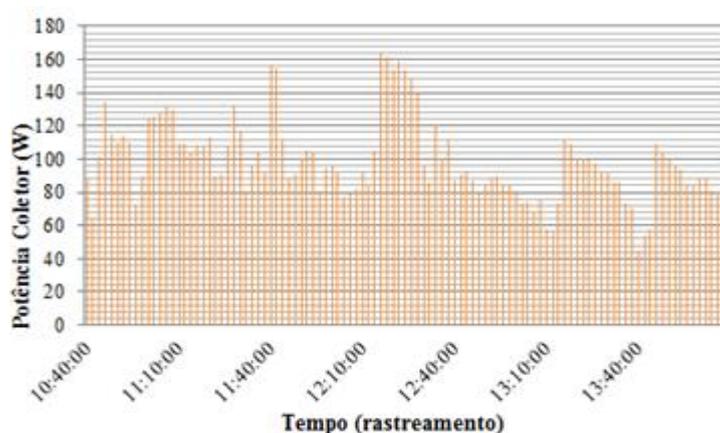


Figura 7: Comportamento da potência do coletor utilizada para aquecimento.

Talvez o mais importante resultado do estudo do comportamento do coletor cônico com uso do rastreamento manual, é que mesmo apresentando menos precisão e menor controle da irradiância direta, este fornece uma razoável captação de energia do Sol levando em conta o baixo custo do sistema, e também abre a possibilidade de se obter dados para previsões futuras. A fim de não ser necessária a realização de mais testes do coletor para diferentes situações em ocasiões futuras (aperfeiçoamento do projeto, rastreamento automático, acoplamento a mais coletores, dentre outros), com os dados até aqui coletados foi possível traçar um comportamento da eficiência do coletor para determinada irradiância solar direta. Como os dados de irradiância podem ser coletados e analisados instantaneamente, pode-se prever qual seria a eficiência e a troca de calor que ocorreria para determinado fluido se o coletor estivesse funcionando em tal situação. Isto é mostrado no gráfico de dispersão da Fig. 8, onde se observa parte de um carta de eficiência em relação à irradiância solar direta.

Dispersões deste tipo puderam ser elaboradas com o estudo do coletor durante alguns meses e dados anuais podem ser também elaborados a fim de se obter uma previsão mais ampla do comportamento do coletor.

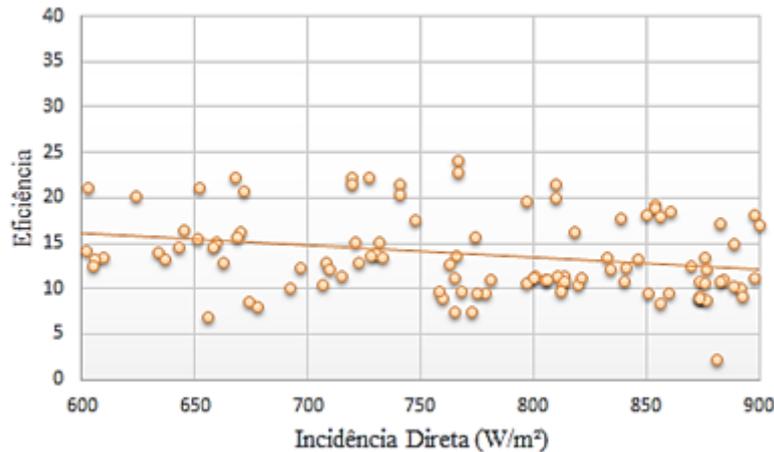


Figura 8: Comportamento da eficiência do coletor cônico com a irradiância solar direta.

Sendo assim, como o rastreamento manual a cada trinta minutos forneceu desempenho satisfatório e tendo sido possível traçar os dados de eficiência x irradiância solar objetivados desde o princípio (de forma a permitir uma análise futura, uma ampliação do sistema ou até mesmo um uso na comparação entre coletores cônicos), verifica-se que em qualquer alteração feita ao coletor em relação ao método de rastreamento, o intervalo de tempo de rastreamento neste trabalho deve ser levado em consideração, pois a cada meia-hora observou-se bom comportamento do coletor mesmo que em desalinhamento por alguns instantes. Como a superfície de plástico também mostrou melhorias no desempenho, como já discutido em outros trabalhos, conclui-se também que o rastreamento não deve ser elaborado de forma a apenas alinhar o coletor ao Sol, mas a evitar perdas no sistema. Logo, outros acessórios podem ser anexados ao coletor além do plástico já acoplado, como coberturas de vidro para a serpentina e melhor isolamento do sistema de abastecimento de água, por exemplo.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro na realização do projeto.

REFERÊNCIAS

- Arbizu, Álvaro V., Mesa, Isaac G., 2003. Estudo de melhoria de desempenho de um concentrador solar cônico. Trabalho Final de Curso, Dep. de Engenharia Mecânica, UFC, Fortaleza.
- GreenPro Project, 2004. Energia Solar Térmica: manual sobre tecnologias, projeto e instalação.
- NASA, National Aeronautics and Space Administration, 2003. Solar System Exploration. Available at: <<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Sun>>.
- Palz, Wolfgang, 2002. Energia Solar e Fontes Alternativas. Editora Hemus.
- Quaschning, Volker, 2005. Understanding Renewable Energy Systems.

CONICAL SOLAR COLLECTOR ENHANCEMENT AIMING A SUN-TRACKING SYSTEM UTILIZATION

Abstract. This paper presents an enhancement of a conical solar collector, installed at the Solar Energy and Natural Gas Laboratory (LESGN), in the Federal University of Ceará (UFC). Looking forward to taking advantages from the irradiance coming from the Sun, a conical collector would have its performance improved if it were attached to a sun-tracking system, using more than just an East-West tracking system that would be adapted to the conical collector.

From an efficiency analysis of the collector and the tracking system, it is possible to verify efficiency data for specific irradiances in the Northeast of Brazil, allowing forecasts of any project specification, such as possible reached temperatures for the solar energy system to heat water. Furthermore, this tracking permits a more accurate control over the heating along the day, providing plenty of applications for the hot fluid. Collecting data along the day, it was possible to perceive good collector performance doing the sun-tracking every thirty minutes, providing efficiency x irradiance maps to be used in future analysis of the conical collector.

Key words: Solar Energy, Conical Solar Collector, Sun-tracking system, Automation.