

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TIRAS DE ESPELHO CURVADO E ELEMENTOS DE CONEXÃO PARA HELIOSTATO COM MOVIMENTAÇÃO EM AROS.

Pedro Henrique Bezerra – bezerra_ph@hotmail.com

Érico Tadao Teramoto – ericoengineer@fca.unesp.br

Marcelo Lampkowski – marcelo-l@uol.com.br

Odivaldo José Seraphim - seraphim@fca.unesp.br

Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Rural.

Celso Eduardo Lins de Oliveira – celsooli@usp.br

Cristina Tiyaki Koike - cristina.koike@usp.br

Faculdade de Zootecnia e Engenharia dos Alimentos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Resumo. *Helioestado é considerado o componente de maior impacto nos custos de uma usina CSP com torre central e o uso do helioestado adequado pode gerar reduções de até 40% nas perdas de energia. Nesse sentido, faz-se necessária a nacionalização dos componentes estruturais e óticos do mesmo como medida mitigatória dos custos, com soluções que favoreçam a introdução da tecnologia na agroindústria brasileira. Além disso, observa-se a necessidade de estudos para que a tecnologia CSP se adapte às latitudes tropicais, que exigem distância focal menor e, portanto, a utilização de campos de heliostatos mais estreitos que em latitudes como na Europa e Estados Unidos, locais onde a tecnologia CSP já está estabelecida comercialmente. A solução proposta neste estudo requer a utilização de espelho com superfície curvada a fim de alcançar a concentração requerida utilizando um baixo número de heliostatos, reduzir as perdas por derramamento e aumentar a quantidade de energia absorvida e, conseqüentemente, o desempenho da usina solar. Foi proposta uma configuração de superfície reflexiva, composta por seis tiras de espelho horizontais que foram projetados utilizando o programa Autodesk Inventor e submetidos à análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) com o programa ANSYS Workbench. Nas simulações, uma carga de vento que pode ocorrer em São Paulo foi aplicada e os resultados de tensão e deformação nos espelhos foram analisados. A fim de otimizar o uso de material no espelho, foram propostas duas espessuras: 4 e 7 mm. O espelho de 4 mm de espessura pode se tornar uma solução, apesar de ter se mostrado suscetível a tensão causada pelo vento, perto dos elementos de ligação centrais posicionados ao lado do suporte do sistema de movimentação. Além disso, uma opção de ligação dos espelhos à moldura através de uma cantoneira em forma de "L" é apresentada como solução.*

Palavras-chave: *Energia Solar Concentrada, Helioestado, Otimização.*

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia (CSP - do inglês “Concentrated Solar Power” ou Energia Solar Concentrada) está pronta para assumir um importante participação na agroindústria brasileira. Os sistemas de energia solar concentrada produzem energia elétrica ao converter a energia solar em calor de alta temperatura usando várias configurações de superfícies espelhadas. Estes sistemas focam a radiação solar direta por meio de dispositivos óticos para um receptor, transformando a radiação em calor de alta temperatura, apto à produção de vapor.

Em um país como o Brasil, que possui uma grande extensão territorial, com alta incidência de radiação solar, torna-se possível desenvolver tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica e elétrica. Embora a disponibilidade de radiação solar seja aproveitável, o interesse pelo uso das tecnologias CSP na geração de energia elétrica é recente. Tal interesse tem sido motivado por diferentes razões, dentre as quais estão as políticas nacionais e internacionais de incentivo ao uso de fontes renováveis e limpas de energia diante do medo das mudanças climáticas e da atual crise energética ao qual o país se encontra.

Usinas CSP com sistema de torre central consistem em um campo de heliostatos (espelho ou conjunto de espelhos que podem ser direcionados durante o dia para refletir a luz solar em um receptor estacionário) e se movem de forma independente e concentram a radiação solar na parte superior da torre (EPE, 2012).

Nesse sentido, é necessária a nacionalização dos componentes estruturais e óticos dos heliostatos, como medida mitigatória dos custos, com soluções que favoreçam a introdução da tecnologia no mercado da agroindústria brasileira. Além disso, observa-se a necessidade de desenvolvimento de estudos para adaptação da tecnologia CSP às latitudes tropicais.

A redução do custo nivelado de geração de energia elétrica gerada por plantas CSP, obtida com reduções em seu custo de capital, aumento da eficiência das plantas e ganhos com economia de escala, pode atingir, em um horizonte

temporal similar ao horizonte de planejamento energético brasileiro de longo prazo, de 40 a 50% do custo nivelado da energia das primeiras plantas CSP de grande escala instaladas no mundo (IRENA, 2012).

Diante do panorama atual de inserção da geração termosolar no Brasil, este trabalho descreve um novo esboço de superfície refletora, a fim de alcançar a concentração requerida utilizando um baixo número de heliostatos e reduzir as perdas por derramamento, aumentar a quantidade de energia absorvida e, conseqüentemente, o desempenho da usina solar.

2. HELIOSTATO COM MOVIMENTAÇÃO EM ARCO

O primeiro protótipo de heliostato com movimentação em aros no eixo horizontal e vertical foi construído pela Agência Aeroespacial Alemã (Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt - DLR) (Pfahl et al., 2013). As partes de movimentação possuem peso equilibrado que leva a um baixo consumo de energia. Isto foi alcançado apenas por via das unidades de arcos atuando como contra peso. Os arcos nos dois eixos fazem a interface de ligação entre o pilão e a moldura que sustenta o espelho.

O heliostato rastreia o Sol e reflete a radiação solar no receptor no topo da torre em uma usina solar. Eles são considerados os elementos mais importantes de custo de uma instalação da usina solar porque representam 50% do custo do capital da planta (Kolb et al., 2014). Além disso, a utilização de heliostatos adequados pode gerar reduções de até 40% nas perdas de energia (Kolb et al., 2007). O custo do heliostato depende do tamanho. Os materiais, os requisitos para a performance e a configuração são as mesmas para todos heliostatos (Blackmon, 2013).

O heliostato com movimentação em arcos é formado por componentes mecânicos que dão sustentação e que permitem a movimentação nos dois eixos (Fig. 1).

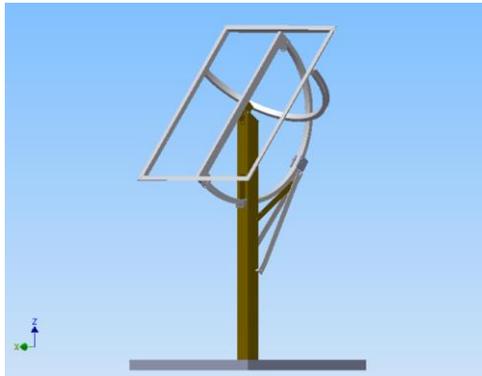


Figura 1 - Esboço do heliostato com movimentação em aro projetado no Autodesk Inventor 2014.

O termo "heliostato adequado", diz respeito ao tamanho, às configurações do espelho, às reduções de cargas operacionais e a resistência à carga de vento (Coventry and Pye, 2014). Normalmente, os critérios da concepção de heliostato dependem das condições ambientais do local (Pfahl et al., 2013). Portanto, o projeto e o processo de otimização do heliostato têm uma grande importância em projetos de usinas solares com torre.

2.1 Moldura Metálica

A solução de moldura metálica proposta foi projetada para ser embutida na estrutura de suporte do sistema de movimentação, adequada ao heliostato com movimentação em aros, com o mínimo de aço utilizado, mas que suporte o peso de superfície do refletor. A configuração desenvolvida permite que os três tipos de conexões sejam utilizados (Fig. 2).

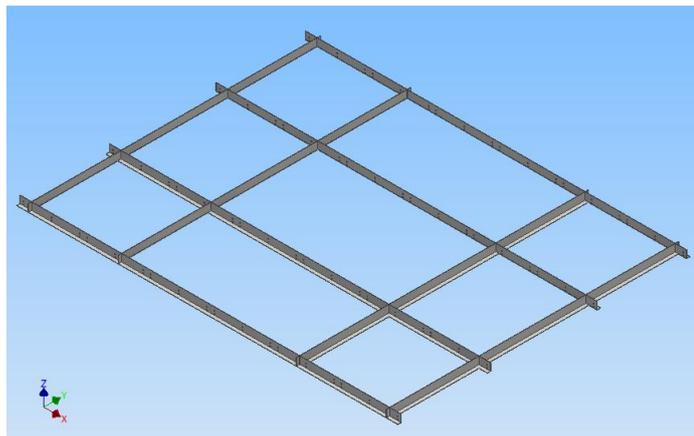


Figura 2 - Projeto da moldura metálica

2.2 Propostas de cantoneiras de conexão

Propostas de conexão foram criadas para fazer a ligação entre a estrutura de aço e da superfície refletora. Os modelos de conexão analisados foram projetados para fixar as tiras de espelho e proporcionar a curvatura almejada. Nesse sentido, foram propostas três opções de conexão (Fig. 3): bloco metálico, pino e cantoneira em forma de "L".

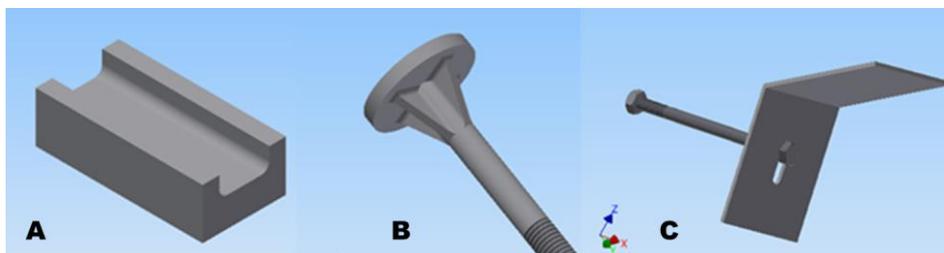


Figura 3 - Projeto do bloco metálico (A), pino (B) e cantoneira em forma de "L" projetado no Autodesk Inventor.

2.3 Esboço do Espelho

A superfície espelhada dos heliostatos mais modernos são de vidro espelhado fino, com baixo teor de ferro para uma maior reflectividade, maior resistência à oxidação, e portanto, maior durabilidade. A concentração é conseguida através do uso de espelhos posicionados de modo a concentrarem o fluxo de radiação direta no receptor. A geometria dos espelhos altera a análise do comportamento do campo de heliostatos, permitindo-lhe ser modelado por uma série de estágios, composto de elementos ópticos que possuem certos atributos, incluindo forma, contorno, e qualidade óptica. Para alcançar o melhor fator de concentração, foi proposta uma forma de superfície refletora dividida em seis (6) tiras de espelhos, com o objetivo de favorecer a aplicação da curvatura requerida com base na distância focal de 30 metros entre o receptor e o campo de heliostatos (Fig. 4). Cada heliostato possui dimensões de 2,5 x 3,26 metros, com área de reflexão de 8,15 m² formado por tiras com dimensões de 2500 x 541 x 8,1 mm, que são compostas por vidro e espelho colados entre si.



Figura 4 - Espelho composto por seis (6) tiras projetado no Autodesk Inventor 2014.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL

O esboço da superfície reflexiva composta por seis tiras de espelho horizontais foi projetado utilizando o programa Autodesk Inventor e submetidos à análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) com o programa ANSYS Workbench versão 2014. Cada avaliação foi realizada com uma das três opções de conexão. A carga de vento aplicada corresponde a uma pressão de 715,2 Pa a 25° C e densidade do ar 1,184 Kg/m³ (Fig. 5). Os dados horários de velocidade do vento foram medidos durante o período de 1989-2008 usando um anemógrafo IH Wilh Lambrecht Haringen TYP.1440 Nr: 351873, instalado na Estação Climatológica da UNESP/FCA (22.85°S, 48.43°W, 742 m). As análises foram feitas no Instituto Solar de Jülich - Alemanha. Nas simulações estruturais, uma carga de vento que pode ocorrer em São Paulo foi aplicada (29,9 m/s) com o intuito de prever a deformação e as tensões (Von Mises) causadas pela ação dos ventos sob as tiras de espelho. O cálculo preciso da carga de vento é a chave para o projeto estrutural da heliostato. As cargas de vento são geralmente analisadas utilizando testes de túnel de vento, simulações numéricas e experimentos em heliostats reais (ZANG et al., 2011).

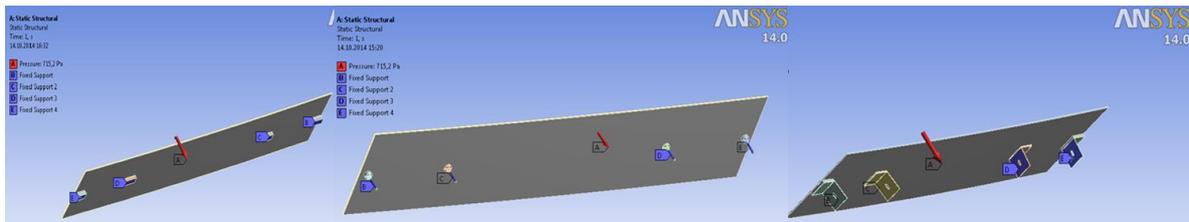


Figura 5 - Posicionamento das cantoneiras na tira de espelho no ANSYS Workbench.

As malhas foram criadas com base em dois métodos, com aplicação distintas em diferentes partes. Nas cantoneiras, o método utilizado foi o Tetraedro (elementos triangulares) porque uma das peças contém orifícios e conformação não linear. Para as tiras de espelho, o método utilizado foi o "Tamanho" (elementos quadrados), que se trata da especificação do tamanho da malha. A utilização de elementos quadrados em vez de triangulares reduz o número de equações e consequentemente o trabalho computacional.

A fim de avaliar o comportamento estrutural da tira de vidro em função da carga de vento, foram propostas duas espessuras (caso 1 e caso 2), (Fig. 6). No Caso, 1 a espessura da tira composta (somando-se vidro e espelho) foi 7 mm, como forma de analisar uma condição mais segura. No entanto, a situação analisada para o caso 2 foi uma de uma tira composta, com uma condição mais vulnerável do ponto de vista estrutural, com 4 mm de espessura. Vidros são materiais frágeis, e a fratura ocorre em tensões mais baixas na tração do que na compressão. (BOURHIS, 2008).

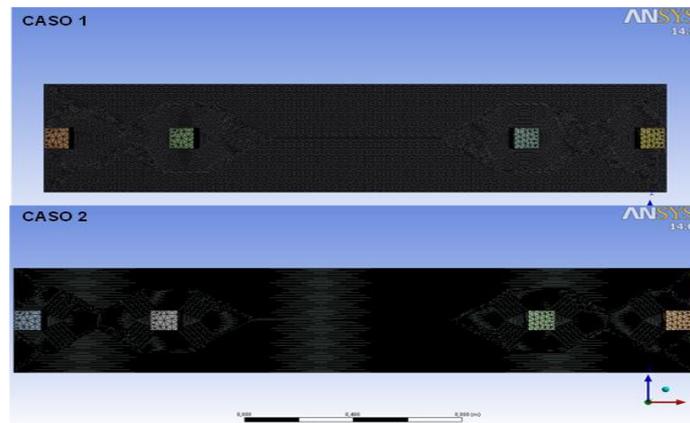


Figura 6 - Malha obtida pelo método simétrico (para a tira) e método tetraedro (para cantoneira) na mesma simulação para o caso 1 e 2.

4. RESULTADOS

A melhor opção de conexão encontrada foi a cantoneira em forma de "L", pois permite que a altura da curvatura do espelho a seja regulada através de um orifício prolongado na estrutura da peça e um parafuso. A geometria estabelecida exige baixa quantidade de aço e manuseio simples durante a instalação. A cantoneira possui espessura de 3 mm, altura de 100 mm e 100 mm de comprimento (Fig. 7). Cada tira de espelho está ligada a moldura por meio de 4 cantoneiras, inicialmente.

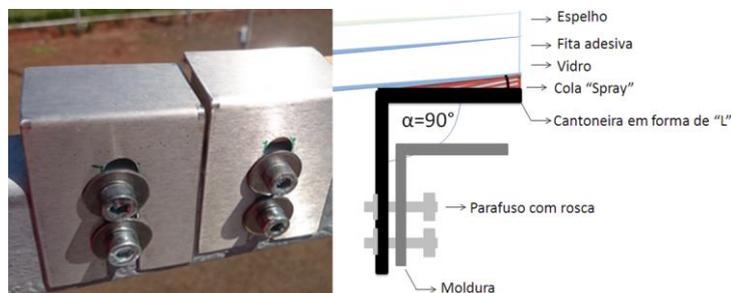


Figura 7 - Solução usando cantoneira em forma de "L" entre a moldura e a tira de espelho.

Os resultados obtidos através das imagens computacionais expressam o comportamento das tiras compostas, por meio de cores que indicam a variação da deformação e tensão. As análises confirmaram que as tiras com 7 mm de espessura são super dimensionadas e se mostraram resistente à deformações. No entanto a quantidade exorbitante de material torna a opção inviável, devido o custo de fabricação e o peso que a mesma exerce sobre a moldura de suporte dos espelhos. As tiras com espessura de 4 mm apontaram valores aceitáveis de deformação 0,75 mm (Fig. 8).

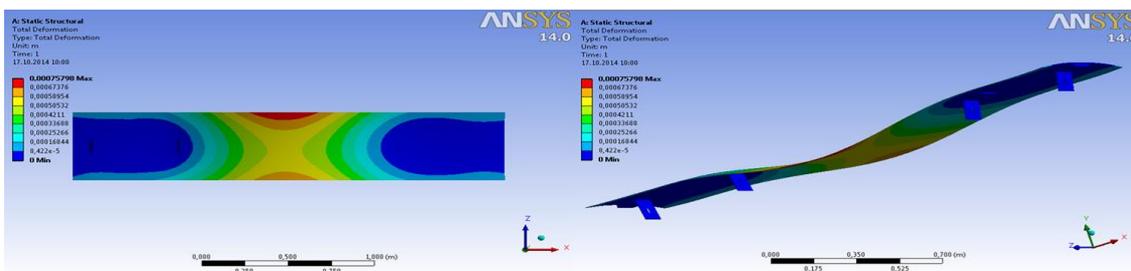


Figura 8 - Deformação total na tira de 4 mm.

Porém, a análise de tensão principal máxima na tira de 4 mm apontou valor de 69,52 MPa na terceira cantoneira, próxima ao quadro de movimentação (Fig. 9).

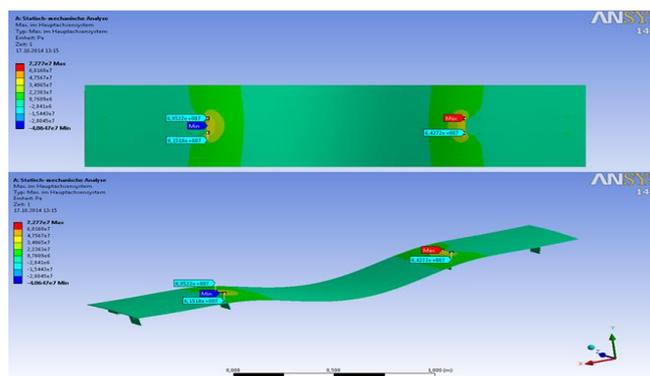


Figura 9 - Tensão máxima de 69,52 MPa na terceira cantoneira.

Observou-se o valor do tensão principal máxima de 99,77 MPa (Fig. 10) nas duas cantoneiras centrais próximas ao sistema de movimentação. Os valores de tensão são excessivos próximo à cantoneiras de conexão entre a moldura e a tira de espelho (Von Reeken et al., 2011).

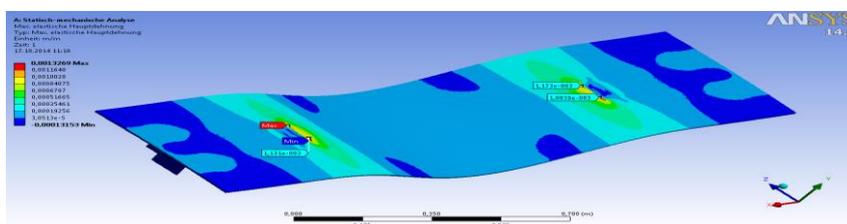


Figura 10 - Tensão máxima de 99,77 MPa nas cantoneiras centrais.

Depois de realizado as análises estruturais das tiras de espelhos, estabeleceu – se metodologias para a montagem da superfície reflectiva por meio de alternativas com a melhor sequência de montagem, do ponto de vista da facilidade manual e que ofereça menos riscos de possíveis danos ao espelho e ao vidro.

5. CONCLUSÕES

O Heliostato pequeno com a superfície refletora dividida em tiras permite menor manuseio para montagem e instalação, sistema de rastreamento simples e com custo menor (suporta melhor a carga do vento) e uma melhor utilização do terreno. A tira de espelho de 4 mm de espessura se mostrou uma boa opção do ponto de vista optimal, porém suscetível ao estresse significativo causado pelo vento, perto das cantoneiras de ligação centrais posicionados ao lado do suporte do sistema de movimentação. Por consequência, foi necessário fazer uma redistribuição das cantoneiras de ligação, a fim de diminuir a carga de pressão no espelho. Para isso, o número de cantoneiras por tira passou de quatro para doze (Fig. 11).



Figura 11 - Aumento do número de cantoneiras por tira de espelho.

Além disso, uma opção de ligação dos espelhos à moldura através de uma cantoneira de conexão em forma de "L" que permite que a curvatura do espelho seja regulada, requer baixa quantidade de aço, manuseamento simples durante a instalação e permite a possibilidade de regular o(s) espelho(s), mesmo quando já instalado(s) à estrutura (Fig. 11).

A melhor sequência de montagem da superfície reflectiva do heliostatos (Fig. 12), do ponto de vista de facilidade de manuseio foi como primeiro passo, colar as cantoneiras em forma de "L" na tira de espelho e somente depois fixa-las na moldura metálica e posiciona - las com a altura de curvatura almejada.



Figura 12 – Estabelecimento do melhor procedimento de montagem.

A tira composta pelo vidro e espelho se mostrou rígida suficiente para resistir à tensão nos conectores mais externos e flexível para proporcionar a altura de curvatura da parábola (Fig. 13).



Figura 13 - Heliostato com superfície ótica composta por 6 tiras de espelho curvadas.

REFERÊNCIAS

- BLACKMON, J, “Parametric determination of heliostat minimum cost per unit area”, Solar Energy, 97, pp. 342-349, 2013.
- COVENTRY, J.; PYE, J. Heliostat cost reduction – where to now? Solar PACES 2013, EnergyProcedia, v.49, 2014, p. 60–70. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S1876610214004615/1-s2.0-S1876610214004615-main.pdf?_tid=13c45fd2-96e1-11e5-9ac2-00000aab0f27&acdnat=1448833094_715fbd88ae2db32211e6578daac3d59a. Data de acesso: 15.09.2014.
- DBOURHIS, Eric Lee, Glass, Mechanics and Technology. França, Weinheim: Wiley-VCH. 2008.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. Nota técnica. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, mai. 2012. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/213250230/NT-EnergiaSolar-2012>. Data de acesso: 29.05.2014.
- IRENA, 2012. Concentrating Solar Power. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. s.l.: IRENA Working Paper. Volume 1: Power Sector. Issue 2/5. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos.
- KOLB, G. J.; JONES, S. A.; DONNELLY, M. W.; GORMAN, D.; THOMAS, R.; DAVENPORT, R.; LUMIA, R. Heliostat cost reduction study, SAND 2007-3293: Disponível em: <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2007/073293.pdf>. Data de acesso: 15.09.2014.
- PFAHL, A.; RANDT, M.; HOLZE, C.; UNTERSCHÜTZ, S. Autonomous light-weight heliostat with rim drives. Solar Energy, v. 92, p. 230-240, 2013.
- VON REEKEN, F., GABELER, L., SCHIEL, W., 2011. Determination of Probability of Breakage of Parabolic Trough Reflector Panels. Proc. SolarPACES 2011 conference, Granada.
- ZANG, Chunheng et al. Experimental wind load model for heliostats. Applied Energy. Beijing, p. 444-448. 28 dez. 2011.

STRUCTURAL ANALYSIS OF MIRROR BENT STRIPS AND CONNECTION ELEMENTS FOR HELIOSTAT WITH DRIVE RIMS.

Abstract: *Heliostat is considered largest component of the cost impact of a CSP plant with central tower and the use of appropriate heliostat can lead to savings of up to 40% in energy losses. In this sense, becomes necessary the nationalization of structural and optical components as mitigating measure of costs, with solutions that favor the introduction of technology in Brazilian agribusiness. Furthermore, studies that adapted to the tropical latitudes requiring focal length smaller, and thus the use of narrower heliostats fields that in latitudes as in Europe and the United States, places where the CSP technology is already commercially established. The proposed solution requires mirror curved surface in order to achieve the required concentration using a low number of heliostats, reducing losses by spillage and increase the amount of energy absorbed and consequently the performance of the solar power plant. Was proposed, a reflective surface configuration composed of six horizontal mirror strips that was designed using Autodesk Inventor software and submitted to structural analysis by finite element method (FEM) with the software ANSYS Workbench. In the simulations a wind load that may occur in Sao Paulo was applied and the results of stress, tension and deformation of mirrors were analyzed. In order to optimize the use of material in the mirror, were proposed two thicknesses: 4 and 7 mm. The mirror thickness of 4 mm can become a solution, however it showed susceptible to significant stress caused by wind, close to the central connection elements positioned adjacent the drive system. In addition, as a solution one option of connection between the mirrors and frame was is presented.*

Key words: *Concentrated Solar Power, Heliostat, Optimization.*