

Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica da USP

Francisco Marchiore Carvalho

**Modelo Conceitual de um Heliostato de Baixo Custo com Sistema
de Rastreamento Solar Pneumático de Dois Eixos**

São Paulo

2022

Francisco Marchiore Carvalho

**Modelo Conceitual de um Heliostato de Baixo Custo com Sistema
de Rastreamento Solar Pneumático de Dois Eixos**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída e
Eficiência Energética**

São Paulo

2022

Francisco Marchiore Carvalho

**Modelo Conceitual de um Heliostato de Baixo Custo com Sistema
de Rastreamento Solar Pneumático de Dois Eixos**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída e
Eficiência Energética**

**Área de Concentração: Engenharia
Mecânica**

**Orientador: Prof. Dr. Daniel Setrak
Sowmy**

São Paulo

2022



Resumo

As instalações CSP (Concentrated Solar Power) têm sido bem utilizadas mundo afora a fim de produzir energia elétrica, energia térmica ou combustíveis solares, tal como o hidrogênio. Sua participação entre as fontes renováveis da matriz energética mundial tem sido tímida, porém crescente ao longo dos últimos anos. Ela consiste na utilização de espelhos que coletam os raios solares incidentes e os refletem em direção a um absorvedor cuja área de superfície é sempre menor do que a área de todos os espelhos da instalação. A concentração dos raios solares faz com que o fluido de trabalho contido no absorvedor ganhe calor, podendo atingir temperaturas de até 2000°C a depender da tecnologia utilizada. A primeira conversão de energia realizada nas instalações CSP é sempre da forma radiante (raios solares) para a forma térmica e, a partir daí, para as formas elétrica ou química.

Os espelhos utilizados no direcionamento dos raios solares, suas respectivas estruturas e dispositivos agregados são chamados de heliostatos. Os heliostatos oferecem melhor desempenho ao sistema quando possuem um mecanismo de rastreamento solar de dois eixos, seguindo plenamente o movimento do sol ao longo do dia, durante todo ano. Os sistemas de rastreamento solar mais utilizados no heliostatos atualmente são aqueles impulsionados eletricamente, não havendo, entretanto, restrição à utilização de outros mecanismos. Os mecanismos de rastreamento solar pneumáticos se mostram como uma alternativa para os heliostatos e oferecem uma boa resposta em termos de economia de energia elétrica e diminuição dos custos de fabricação, montagem, operação e manutenção do equipamento, mantendo o nível de precisão dos atuadores elétricos em sua movimentação.

A elaboração do modelo virtual conceitual de um heliostato de pequeno porte com mecanismo pneumático de rastreamento solar, bem como de um estudo para validação de sua movimentação, e a consideração de alguns aspectos específicos de um projeto mecânico de baixo custo são certamente os primeiros passos para a construção de um protótipo experimental em escala real. Podendo, principalmente, servir de referência para projetos futuros de instalações modulares (também de pequeno porte) para produção de químicos tais como os combustíveis solares.

Palavras Chave: CSP, heliostato, rastreamento solar, acionamento pneumático, combustíveis solares

Abstract

The CSP facilities have been widely commissioned worldwide to produce electricity, thermal energy, or solar fuels and its share among the renewable sources is still small but shows good growth during the last years. It consists in the usage of mirrors that reflect the sun beams upon an absorber with reduced surface area compared to that of the mirrors. The concentration of the solar beams heats up the fluid inside the absorber which can reach temperatures of about 2000°C depending on the CSP technology deployed. The first energy conversion that the system does is always from the radiant form to the thermal form and then to electricity or chemical energy.

The mirror as well as its mechanical structure and attached devices compound what is called a heliostat. The heliostats offer better performance to the system when a two-axis solar tracking mechanism is used, so they can follow the sun whatever its position in the de sky during daytime in the whole year. Most of the solar trackers are electric driven, however there are no restrictions to other types of mechanisms. In this context, the pneumatic driven mechanisms appear to be a good alternative which can offer good response in terms of energy consumption and cost decreasing of the equipment's manufacturing, assembly, operation, and maintenance and possibly without affecting the level of precision shown in those with electric driven motion devices.

The creation of a virtual model of a small size heliostat with a pneumatic solar tracker as well as a good simulation of its movements of operation and the consideration of some specific aspects of a low-cost mechanical project are certainly the de first steps for the construction of a scaled up experimental prototype. It can be mainly used as reference to future projects of small size modular facilities to produce chemicals as the solar fuels.

Keywords: CSP, heliostat, solar tracking, pneumatic driven mechanism, solar fuels

SUMÁRIO

1. Introdução	7
2. Objetivo	8
3. Metodologia.....	9
4. Revisão Bibliográfica	10
4.1. Concentrated Solar Power (CSP)	10
4.2. O Heliostato	15
5. Desenvolvimento.....	22
5.1. Análise da trajetória solar para um determinado dia do ano e uma determinada localidade.....	22
5.2. Modelo conceitual do heliostato	26
5.2.1. Sistema de produção de ar comprimido	28
5.2.2. Painel de comando eletropneumático	29
5.2.3. Mecanismo de movimentação Leste-Oeste.....	31
5.2.4. Mecanismo de movimentação Norte-Sul.....	32
5.2.5. Estrutura do espelho e pedestal	33
6. Conclusões.....	35
7. Referências.....	36

1. Introdução

Os equipamentos concentradores de energia solar certamente representam uma tecnologia muito promissora na produção de energia térmica. Seu uso permite alcançar altas temperaturas, dependendo da geometria, da qualidade da superfície coletora da luz solar, da razão de concentração entre coletor e receptor e de seu sistema de rastreamento da posição do Sol. Quando se faz uso da energia solar concentrada, para quaisquer que sejam os fins, temos o que se chama de uma instalação CSP (Concentrated Solar Power).

Nas usinas heliotérmicas, por exemplo, a energia da radiação solar incide sobre equipamentos conhecidos como heliostatos. Eles são responsáveis por refletir os raios de luz solar sobre um receptor do alto de uma torre central no qual estão contidas substâncias que, depois de aquecidas a altas temperaturas, produzem o vapor necessário para a movimentação de uma turbina e assim produzir a energia elétrica que irá suprir uma determinada região. Instalações como esta necessitam áreas imensas e são sempre construídas em locais onde há fortíssima incidência de luz solar. Regiões com clima desértico são sempre potenciais candidatas para esse tipo de empreendimento. Certas usinas heliotérmicas podem atingir uma potência instalada superior a 200MW.

No entanto, o uso dos concentradores solares não se restringe apenas à geração de energia elétrica. Eles podem ser usados também em fornos para derretimento de substâncias com altos pontos de fusão, para produção e suprimento de vapor, ou para fornecer a energia necessária para que se iniciem determinadas reações químicas. Alguns especialistas do mercado de energia têm demonstrado particular interesse nessa última com o objetivo de produzir combustíveis hidrocarbonetos sintéticos a partir do hidrogênio (H) e dióxido de carbono (CO₂). Estudos e pesquisas vêm sendo realizados e têm mostrado que para esse tipo de aplicação não são necessárias grandes áreas para coleta da radiação solar, sendo perfeitamente possível a produção em usinas modulares de menor tamanho cobrindo áreas de, por exemplo, 2500m² e torres receptoras que variem em torno de 20m de altura.

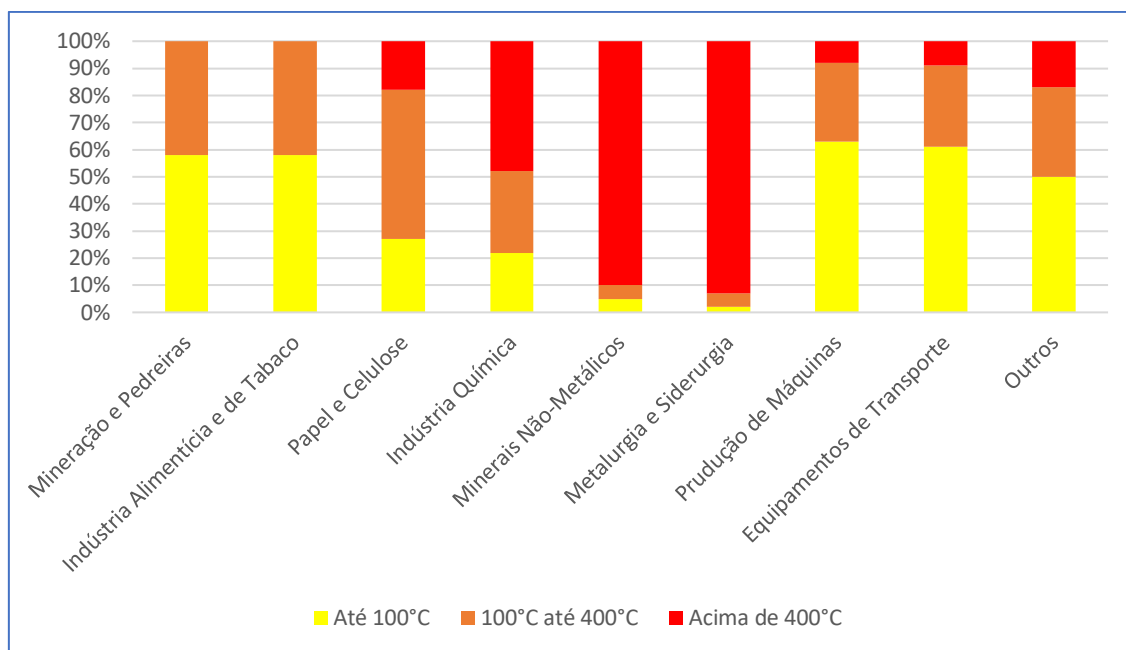


Figura 1 - Necessidades de energia térmica de aquecimento na Europa por temperatura – Fonte:
<http://www.itulip.com/forums/showthread.php/20796-Understanding-energy-usage-kinetic-vs-thermal>

O gráfico da figura 1 mostra as necessidades de energia térmica de aquecimento na indústria europeia. Observa-se que as indústrias química, de minerais não metálicos e siderúrgica são as que mais carecem de energia térmica. Esses exemplos mostram que há espaço no mercado para os heliostatos e as demais tecnologias CSP. Projetos de equipamentos menores e de baixo custo de fabricação são perfeitamente possíveis. Além disso, ao contrário das grandes centrais heliotérmicas, um modelo compacto pode ser facilmente adaptável aos centros urbanos ou utilizado em complexos industriais.

2. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo a criação do protótipo virtual de um heliostato de pequeno porte contendo dois eixos de movimentação para o rastreamento solar impulsionados por atuadores lineares pneumáticos. A criação do modelo se dará com o auxílio do software Solidworks®.

O modelo conceitual do heliostato, objeto deste trabalho, tem a intenção de servir como base para a construção de protótipos experimentais futuros em escala real para uso em instalações CSP modulares (também de pequeno porte) usados na produção dos chamados combustíveis solares.

Além disso, o projeto conceitual proposto visa também inspirar mudanças aos modelos de heliostatos já consolidados no mercado e utilizados nas aplicações mais convencionais. Neste caso, é possível que a substituição do sistema de acionamento elétrico (aplicado à maioria dos equipamentos encontrados no mercado) por um sistema acionado pneumáticamente traga alguns benefícios como, por exemplo, a redução no consumo de energia elétrica, uma vez que, quanto maior o espelho e sua estrutura, maior a energia necessária para a sua movimentação durante o rastreamento solar, e maior a demanda elétrica.

O modelo de heliostato escolhido é o de disco parabólico. No entanto, o mecanismo pneumático utilizado pode ser muito bem empregado a qualquer modelo de heliostato de um ou dois eixos, tanto para os de foco linear quanto os de foco pontual. No caso dos heliostatos com espelhos planos, a elaboração de seu sistema de movimentação deve ser um pouco mais cuidadosa pois, diferente dos modelos mencionados acima (nos quais o ponto focal acompanha toda sua movimentação) suas inclinações devem permitir que os raios solares refletidos cheguem a um receptor localizado a muitos metros de distância.

3. Metodologia

Atividade 1: Pesquisa detalhada sobre as instalações CSP e suas tecnologias.

Atividade 2: Análise da geometria da insolação, ou seja, da direção dos raios solares e sua trajetória ao longo de um dia e ao longo de um ano para o entendimento da movimentação necessária ao heliostato.

Atividade 3: Criação do modelo virtual do heliostato com os graus de liberdade necessários à sua movimentação contendo, inclusive, seu sistema pneumático de rastreamento solar, com os pontos de fixação dos cilindros pneumáticos bem definidos e de outros itens agregados como o painel eletropneumático e o mini compressor.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Concentrated Solar Power (CSP)

A energia solar é limpa e abundante ao ponto de podermos considerá-la quase eterna. Segundo Mourão (2000), o Sol emitirá a mesma radiação que emite hoje por mais 5 bilhões de anos.

Dos 180000TW que alcançam o limite superior da atmosfera, aproximadamente uma terça parte (60000TW) se reflete nas nuvens [...]. Essa energia retorna como radiação luminosa ao espaço cósmico sem influir nos processos terrestres.

Aproximadamente uma quinta parte (34000TW) é absorvida na atmosfera provocando seu aquecimento. Quase a metade (84600TW) é absorvida pela superfície líquida (hidrosfera) e sólida (litosfera) e se transforma em calor. (MOURÃO, 2000, p. 36)

Os valores mencionados acima resultam de cálculos que consideram uma irradiância solar média de 1367 W/m^2 , que é a potência luminosa por unidade de área com a qual o Sol banha o topo da atmosfera terrestre em sua face diurna.

Cientes dessa grande capacidade do Sol em nos prover energia de forma ininterrupta e abundante, surge a questão: de que maneiras é possível aproveitar toda essa energia visando suprir as necessidades do ser humano em suas atividades?

A produção de energia térmica por concentração da radiação solar, conhecida também pela sigla CSP (Concentrated Solar Power) tem sido bem utilizada nos últimos anos e a expectativa é que continue a ser explorada e aprimorada cada vez mais a julgar pela participação cada vez maior das fontes de energia renováveis na matriz energética mundial.

“[...] commercial heliostat fields are proposed for very competitive biddings worldwide [...]” (ROMERO; AGUILAR e LUQUE, 2016, p.1)

O cenário projetado para 2040 prevê uma capacidade elétrica instalada de 61 GW para as usinas CSP (IEA, 2019) (ver tabela 1).

Cenário de Políticas Firmadas						
Capacidade Elétrica (GW)						
	2017	2018	2025	2030	2035	2040
Capacidade Total	6970	7218	8962	10244	11655	13109
Carvão	2071	2079	2106	2111	2132	2171
Petróleo	450	450	344	298	271	239
Gás Natural	1693	1745	2070	2254	2448	2651
Nuclear	413	419	417	436	459	482
Renováveis	2339	2517	3962	5019	6120	7233
Hidrelétrica	1269	1290	1448	1586	1707	1822
Bioenergia	137	146	194	224	255	286
Eólica	515	566	980	1288	1594	1856
Geotérmica	14	14	19	27	37	46
Solar	399	495	1309	1866	2476	3142
Fotovoltaica						
CSP	5	6	11	23	40	61
Marés	1	1	1	4	10	20

Tabela 1 - Potencial elétrico instalado a nível global por fonte (CSP em destaque) (IEA, 2019)

A concentração da radiação solar, já há algum tempo, é aproveitada em aplicações bem específicas, dentre as quais podemos citar duas menos convencionais, como os fornos solares usados na fundição de certos materiais e no estudo do comportamento de alguns materiais submetidos à altas temperaturas (figura 3) e os espelhos em forma de disco parabólico utilizados para cocção de alimentos, conhecido como fogão solar (figura 4); e uma outra muito mais difundida e utilizada que é a geração de energia térmica, elétrica ou combustíveis através de espelhos refletores, conhecidos como heliostatos (figura 5).



Figura 3 - Forno Solar em Odeillo, França – Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-O-grande-forno-solar-de-Odeillo-nos-Pirineus-Franca-com-63-espelhos-planos_fig4_343097240



Figura 4 - Exemplo de um fogão solar para cocção de alimentos – fonte:
https://www.researchgate.net/publication/351024349_Fogao_solar_tipo_eliptico_movel_uma_tecnologia_alternativa_para_o_processo_de_coccao_de_alimentos



Figura 5 - Vista aérea de uma central heliotérmica – fonte:
<https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/primeiro-receptor-solar-erguido-em-projeto-chileno-cerro-dominador/>

Os sistemas concentradores de radiação solar (CSP) geram energia através da utilização de espelhos. Os raios solares que incidem sobre os espelhos são então refletidos sobre uma superfície de área reduzida, chamada de receptor. É no receptor onde ocorre a conversão da energia radiante em energia térmica. A partir do receptor, são quatro as possíveis formas de aproveitamento energético a serem utilizadas:

- a) o receptor pode ser usado como uma caldeira. Um reservatório contendo sais fundidos ou óleo sintético para a produção de vapor à alta pressão que irá mover uma turbina;
- b) o receptor pode conter um reator que se vale das altas temperaturas para desencadear uma reação de química e produzir outras substâncias, tais como combustíveis;

- c) o receptor pode ser um duto dentro do qual ocorre a produção de vapor e este é direcionado para o atendimento de processos industriais diversos ou para a produção de energia elétrica;
- d) o receptor pode conter um gerador de elétrico do tipo *Stirling*, convertendo a energia térmica em energia cinética e logo depois a energia cinética em energia elétrica;

Em 2018, no mundo, o potencial instalado acumulado correspondente às CSPs foi de 6,1GW (CSTA, 2021). Nesse mesmo ano, somente a Espanha respondeu por uma capacidade instalada e operacional de 2,3GW (IEA, 2019), com uma participação de 37% do potencial mundial de energia nessa modalidade, seguida pelos Estados Unidos com 1,8GW instalados e operacionais.

As instalações CSP de grande porte normalmente requerem regiões onde há intensa incidência de radiação solar. Por conta disso, as regiões com clima mais desértico são sempre boas opções. No entanto, isso impacta negativamente sob o aspecto da manutenção dos equipamentos, uma vez que a poeira típica dessas regiões, quando acumulada sobre a superfície reflexiva dos heliostatos podem levar a perdas na eficiência do sistema. Segundo o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) (2021), a vida útil média das instalações CSP é de 40 anos.

Outra questão importante no tocante às CSPs é a capacidade de armazenamento de energia térmica. Segundo Pinho e Gaudino (2014) é importante que se tenha esse recurso pois dessa maneira a energia elétrica produzida torna-se despachável à rede de energia elétrica existente e não se restringe apenas aos horários em que há incidência de luz solar. A utilização de um sistema de armazenamento térmico dá, inclusive, a possibilidade de direcionar essa energia para outros processos paralelos à geração de eletricidade que necessitem, por exemplo, de calor. Sistemas sem armazenamento de energia térmica têm seu funcionamento restrito apenas enquanto durarem os raios solares ao longo do dia

A depender da razão de concentração entre a área da superfície coletora e a área da superfície absorvedora é possível atingir temperaturas da ordem de 2000°C, como no caso das grandes centrais heliotérmicas por heliostatos refletores e absorvedor em torre central. Quanto maior a razão de concentração, maior a eficiência térmica do concentrador. No entanto, este não é o único fator que pode influenciar a

sua eficiência térmica, que depende também da irradiância solar no local de instalação, da eficiência óptica do coletor, do tipo de sistema de rastreamento solar e da temperatura de entrada do fluido de trabalho.

Nos últimos anos, estudos têm sido conduzidos com o objetivo de avaliar a viabilidade e a eficiência de instalações CSP de menor porte para produção dos chamados combustíveis solares, como por exemplo o hidrogênio, evidenciando uma nova tendência para essa fonte. Neste caso, ela poderia ser adaptada a instalações que requeiram menor espaço físico (área de captação) focando em projetos que promovam alto fluxo radiante ou altas temperaturas em absorvedores com áreas muito reduzidas contendo reatores químicos e com torres e heliostatos de dimensões relativamente pequenas.

“The optimization could lead to a system with a low visual impact by making use of a tower with an optical height of 15m that may be easily integrated in semi-urban areas, resorts and technology and industrial parks.” (ROMERO; AGUILAR e LUQUE, 2016, p. 4)

O Brasil é um país no qual as tecnologias CSP ainda são pouco desenvolvidas e recebem pouco investimento. Atualmente no país existe apenas uma pequena central termosolar em operação localizada na Usina Hidrelétrica de Porto Paraná, no município de Rosana (SP). Trata-se de um projeto piloto da CESP (Companhia de Energia de São Paulo) com capacidade de geração de 500KW elétricos. O projeto foi iniciado em 2017 e conta com heliostatos de calha parabólica que juntos somam uma área de superfície reflexiva de 30000m², produzindo vapor a uma taxa de 4t/h para movimentação de uma microturbina acoplada a um gerador elétrico. O sistema conta também com uma torre para armazenamento de energia térmica (figura 6).



Figura 6 - Imagem aérea da usina heliotérmica localizada do município de Rosana (SP) - fonte: <https://eudoraenergia.com.br/solucoes-energia-heliotermica-csp>

4.2. O Heliostato

O equipamento responsável por concentrar a radiação solar é chamado de heliostato. Sua invenção, no século XVIII, é atribuída ao físico Holandês Willem Jacob Gravesande (1688-1742) (Mourão, 2000).

O heliostato, [...] é um dispositivo usado para projetar a luz solar sobre uma região fixa. É constituído por um conjunto de espelhos móveis cujas direções podem ser ajustadas manualmente ou mecanicamente. Os heliostatos mais sofisticados funcionam com um mecanismo de relojoaria que move os espelhos de modo que eles possam “seguir” o movimento do Sol. (LUIZ, 1985, p. 85)

Existem atualmente alguns modelos de heliostatos com aplicações bem estabelecidas no mercado de geração de energia e que variam com relação à geometria de sua superfície reflexiva, o tipo de foco (pontual ou linear), ao número de eixos e a forma de acionamento do mecanismo de restramento solar. Para o seguimento solar leste-oeste, é necessário apenas um eixo e, nos casos em que se deseja rastrear também a altura solar, faz-se necessário o emprego de um segundo eixo de movimentação

Atualmente são quatro as tecnologias CSP disponíveis, sendo elas: calha parabólica, torres solares, refletores lineares Fresnel e os discos parabólicos, (Pinho e Galdino, 2014). Normalmente, as três primeiras requerem grandes áreas para instalação dos heliostatos. Neste contexto os discos parabólicos se mostram mais versáteis, podendo ser instalados tanto aos grupos como em versões *standalone*.

Os heliostatos de calha parabólica (figura 7) são os mais utilizados nos empreendimentos CSP, representando 90% do potencial instalado (Pinho e Galdino, 2014). Normalmente possuem apenas um eixo de movimentação para o rastreamento solar leste-oeste e a tubulação posicionada no foco da superfície reflexiva acompanha este movimento.



Figura 7 – Concentrador de calha parabólica – fonte: <https://blog.bluesol.com.br/fonte-de-energia-solar-resumo/>

A superfície reflexiva tem foco linear e, ao longo desse foco é instalada a tubulação que irá conter o fluido que se deseja aquecer. Esta tubulação deve obrigatoriamente ser envolvida por um isolante térmico para o aumento da eficiência do sistema, sendo que nos casos em que se deseja atingir temperaturas maiores normalmente são utilizados tubos a vácuo na tubulação do absorvedor. Pode ter uma razão de concentração de 10 a 85 vezes e as temperaturas de operação podem variar de 60 a 400°C (Simões, 2021).

As torres solares (figura 8) são instalações CSP que, na maioria dos casos empregam um vasto campo de heliostatos ao seu redor e geralmente ocupam imensas áreas. A usina de Cerro Dominador, no Chile, por exemplo, possui uma área circular de mais de 700 hectares contendo mais de 10600 heliostatos ao redor de uma torre central com 250m de altura. Sua razão de concentração varia de 300 a 1500 vezes e sua temperatura de operação pode atingir até 2000°C (Simões, 2021). O rastreamento solar dos heliostatos, nesse caso, deve ser tal que os raios refletidos incidam sempre sobre o reservatório no alto da torre central. O receptor localizado no alto da torre central contém sais fundidos e, através da tubulação e dos equipamentos do sistema, este fluido transfere seu calor à água produzindo vapor à altas pressões, que faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Quanto aos espelhos utilizados, podem ser planos ou levemente encurvados (Ledesma et al, 2016).



Figura 8 - Torre solar - fonte: <https://www.diariorenovables.com/2017/09/dubai-precio-termsolar-bajo-central-mas-grande-mundo.html>

Há uma versão deste tipo de instalação na qual um segundo espelho de proporções muito maiores é instalado no alto da torre central que recebe os raios refletidos dos heliostatos ao seu redor, redirecionando-os para baixo, para o receptor, onde o vapor será produzido. Este sistema é conhecido como *beam down solar concentrator* (ver figura 9).



Figura 9 - Usina heliotérmica do tipo beam down - fonte: <https://www.solarpaces.org/chinas-curtailments-go-up-as-renewables-growth-explodes/>

O refletor linear Fresnel (figura 10), tem uma superfície reflexiva plana e cada espelho tem uma regulação específica de inclinação em relação ao solo, sendo que essa inclinação varia ao longo do dia caracterizando um sistema de eixo único de rastreamento solar leste-oeste. Os raios solares refletidos são sempre direcionados a um absorvedor fixo localizado acima dos heliostatos contendo o fluido que se deseja aquecer. Dentre as quatro tecnologias, é a que possui o menor custo de manutenção.

Sua razão de concentração varia de 10 a 40 vezes e sua temperatura de trabalho se situa na faixa entre 60 e 250°C (Simões, 2021).



Figura 10 - Coletor tipo Fresnel - fonte: <https://williampaulbell.wordpress.com/tag/linear-fresnel-reflector/>

Os heliostatos de disco parabólico (figura 11) são normalmente usados para produção direta de energia elétrica. Como a superfície reflexiva se resume a uma parábola revolucionada, seu foco se restringe a um único ponto e sobre esse ponto é posicionado um motor Stirling. Esse equipamento normalmente requer o pleno seguimento solar, contendo um sistema de movimentação de dois eixos: um para o movimento leste-oeste e outro para o movimento norte-sul. Por se tratar de um disco parabólico, seu ponto focal acompanha o movimento realizado pelo heliostato durante o rastreamento solar. Neste equipamento as temperaturas podem atingir de 100 até 1500°C e sua razão de concentração varia de 600 a 2000 vezes (Simões, 2021).



Figura 11 - Heliostato de disco parabólico - fonte: <https://afinidadeelectronica.com/2020/07/04/la-energia-termosolar/>

Apesar das altas temperaturas atingidas, segundo Maaitah et al (2019), os discos parabólicos são pouco comercializados devido ao fato de que o ponto focal da superfície reflexiva sempre acompanha o movimento do heliostato durante seu movimento de rastreamento solar, o que dificulta muito seu uso acompanhado de um sistema de armazenamento da energia térmica. Como seu ponto focal, onde se localiza o receptor, está sempre em movimento na operação do equipamento, seriam necessários dutos flexíveis (mangueiras) para interligá-lo ao sistema de armazenamento térmico. Mangueiras que resistam a altas temperaturas da ordem de grandeza disponibilizada por esse tipo de heliostato são muito difíceis de serem encontradas no mercado, tornando o projeto muito mais custoso.

Atualmente, algumas pesquisas vêm sendo feitas para o desenvolvimento de um novo modelo de heliostato. Trata-se de um novo conceito no qual o receptor é fixo ao solo e se situa abaixo da superfície reflexiva. Dessa forma, o ponto focal do equipamento não mais acompanha o movimento de rastreamento solar, tornando-se um receptor independente. Uma vez fixado ao solo, o receptor pode ser facilmente acoplado a um reservatório térmico através de uma tubulação rígida capaz de suportar as altas temperaturas de operação. Neste caso, o equipamento requer a utilização de espelhos planos do tipo Fresnel dispostos em um disco para a captação da radiação e posterior reflexão sobre o receptor que está sempre de frente para o lado côncavo da estrutura. Alguns protótipos desse modelo de heliostato vêm sendo testados nos Emirados Árabes Unidos (SolarPACES, 2019) (figura 12).

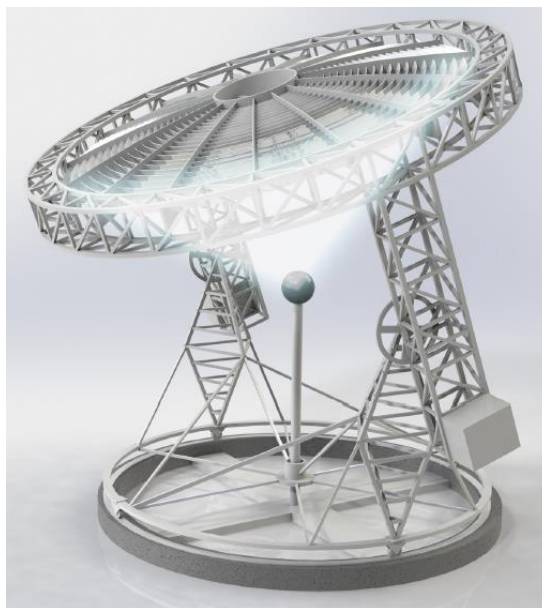
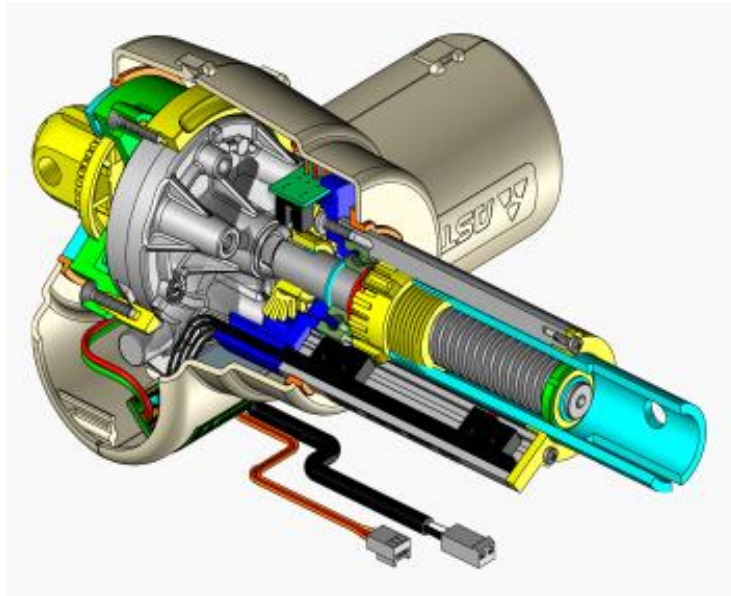


Figura 12 – Heliostato com receptor fixo ao solo - <https://www.solarpaces.org/start-up-vc-invests-in-beam-down-concentrator-for-solar-fuel/>

Para que o heliostato tenha o melhor rendimento possível é importante que se tenha todos os graus de liberdade necessários em seu movimento de rastreamento solar. Os equipamentos que oferecem maior grau de liberdade são os de 2 eixos, que permitem um seguimento pleno do Sol. Um dos eixos serve para regular a inclinação da superfície do espelho em relação ao solo e seu movimento acompanha a altitude solar (variação do ângulo zenital). O segundo eixo serve para acompanhar o movimento do Sol do seu nascer ao seu ocaso, de leste a oeste, (variação do ângulo azimutal). O movimento do heliostato ao longo do dia deve ser tal que os raios solares incidam sempre perpendicularmente ao plano projetado pela superfície reflexiva de captação.

Atualmente, nos heliostatos existentes no mercado, os mecanismos seguidores são geralmente acionados por motores elétricos acoplados diretamente aos eixos de rastreamento ou por atuadores lineares elétricos (figura 13). Os sistemas acionados eletricamente são capazes de garantir um controle preciso da posição do painel, da ordem de décimos de grau.

“[...] the selection of the drive mechanism becomes a key element in terms of tracking accuracy, reliability and cost competitiveness.” (ROMERO; AGUILAR e LUQUE, 2016, p. 4)



*Figura 13 - Exemplo de um atuador linear elétrico usado para rastreamento solar -
fonte: <http://www.asten.com.br/capa.asp?eletromecanicos=categoria&depcodigo=756>*

Entretanto, o consumo de energia dos sistemas de rastreamento é um dos fatores que impactam diretamente no custo operacional do equipamento (Simões, 2021). Sendo assim, torna-se importante o desenvolvimento de projetos que ofereçam outras possibilidades além dos mecanismos de acionamento elétricos e que se aliem a uma redução de custos de fabricação, montagem, operação e manutenção do equipamento.

Uma alternativa possível seria a utilização de atuadores lineares pneumáticos. Segundo Alboteanu (2015), algumas vantagens da utilização de um sistema de rastreamento solar pneumático são:

- a) Suas estruturas são simples e perfeitamente ajustáveis para um sistema de produção em série de equipamentos solares;
- b) As forças, momentos, e velocidades podem ser facilmente ajustadas através de dispositivos simples;
- c) A sobrecarga dos atuadores pneumáticos não oferece risco de dano ao equipamento;
- d) As transmissões pneumáticas permitem um regime de trabalho intermitente de acionamentos e paradas bem como mudanças repentinas de direção sem oferecerem risco de dano aos equipamentos;

- e) O ar comprimido é relativamente fácil de ser produzido, e sua rede de distribuição é ambientalmente amigável por se tratar de um fluido não inflamável;
- f) O ar comprimido pode ser armazenado em grandes quantidades;
- g) O risco de prejuízo torna-se menor
- h) Sistemas pneumáticos são de fácil manutenção

5. Desenvolvimento

5.1. Análise da trajetória solar para um determinado dia do ano e uma determinada localidade

O movimento orbital da Terra ao redor do Sol tem a forma de uma elipse e o plano definido por essa elipse coincide com o plano equatorial do Sol, conhecido como plano da eclíptica. O eixo de rotação da Terra é inclinado de aproximadamente $23,5^\circ$, sendo que esse ângulo influencia as estações do ano nos hemisférios sul e norte e a duração dos dias ao longo do ano. Isso significa que num certo período do ano, os dias no hemisfério sul são mais longos do que os dias no hemisfério norte e durante outro período do ano ocorre justamente o contrário. Ao ligarmos os raios solares da superfície do Sol até a superfície terrestre, e imaginarmos o movimento rotativo do planeta em torno de seu próprio eixo, veremos que os raios solares desenhavam círculos ao redor da superfície terrestre (figura 14).

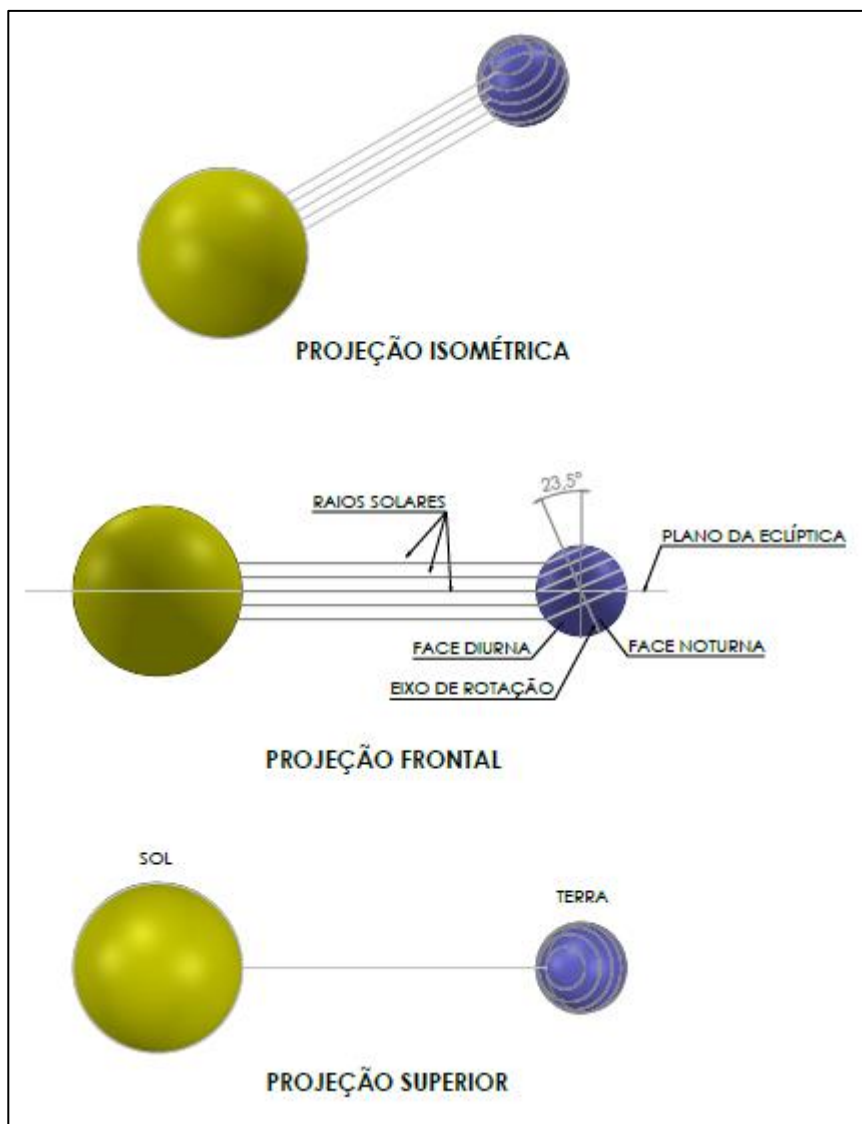


Figura 14 - Raios solares sobre a Terra - fonte: o autor

Imaginemos agora um observador, situado a uma determinada latitude e longitude, e limitemos o seu horizonte em um plano circular no qual estão projetados os quatro pontos cardeais. Podemos admitir que o céu percebido por esse observador é determinado pela superfície semiesférica que encobre toda a circunferência, a qual chamamos de abóbada celeste (Neves e Arguelo, 2001). Do período de 21 de setembro até 21 de dezembro os arcos diurnos, no hemisfério Sul, tendem a crescer até o seu ponto máximo e o nascer do Sol fica mais a sudeste. Do período de 21 de março até 21 de junho, os arcos diurnos decrescem até o seu ponto mínimo e o nascer do Sol fica mais a nordeste. Nas datas de 21 de setembro e 21 de março, no hemisfério Sul, temos respectivamente os equinócios de primavera e outono onde a duração do dia e da noite são iguais, onde o Sol nasce exatamente a Leste e se põe exatamente a Oeste.

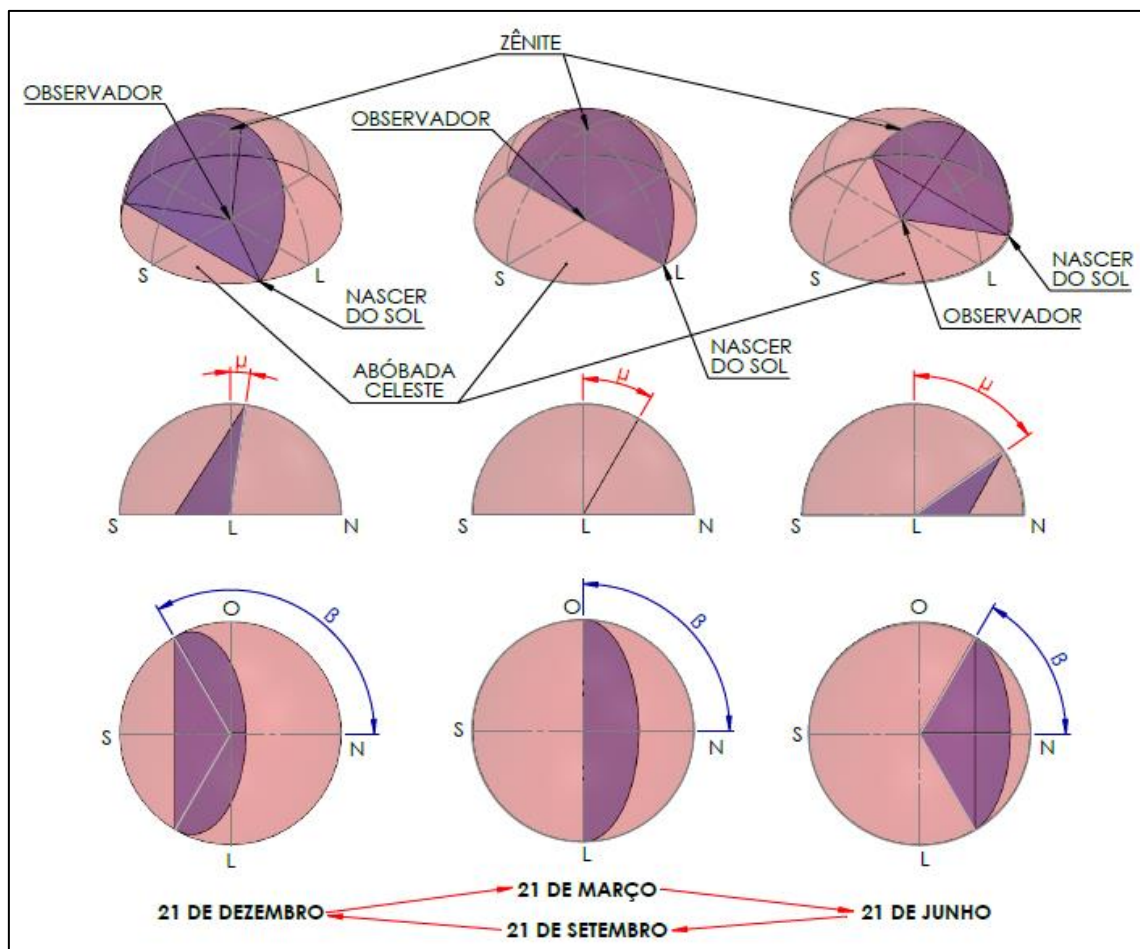


Figura 15 - Trajetória do Sol em diferentes dias do ano - fonte: o autor

Da figura 15 podemos ver que o dia 21 dezembro tem o maior arco diurno possível, o que significa que de todos os dias do ano, este é o mais longo enquanto o dia 21 de junho tem o menor arco diurno, ou seja, o dia mais curto do ano. Continuando a análise da figura 15, vemos também que o dia 21 de dezembro é aquele que apresenta o maior ângulo azimutal (β).

Para que o heliostato possa acompanhar plenamente o movimento do Sol, do seu nascer ao seu ocaso, é necessário dar a ele os devidos graus de liberdade de forma que consiga rotacionar e cobrir um ângulo de, no mínimo, duas vezes o ângulo azimutal.

Para o cálculo do ângulo azimutal no dia 21 de dezembro deve-se admitir:

$$\text{Dia do Mês (D)} = 21$$

$$\text{Mês (M)} = 12 \text{ (dezembro)}$$

Local de Instalação do Heliostato: Campinas, SP, Brasil

Apenas para efeito de demonstração dos cálculos a cidade de Campinas foi a escolhida como local de instalação do equipamento. A determinação do ângulo de abertura do heliostato é possível para qualquer localidade, conhecida sua latitude, através das equações a seguir (Simões, 2021).

$$\text{Latitude de Campinas } (\varphi) = 22^{\circ}53'S = 22 + \frac{53}{60} = 22 + 0,88 = 22,88^{\circ}(S) = -22,88^{\circ}$$

$$\text{Correção do Dia } (Cor) = \left[\text{Int.} \left(\frac{M}{2} + \frac{1}{2} \right) \right] - 2 = \left[\text{Int.} \left(\frac{12}{2} + \frac{1}{2} \right) \right] - 2 = 4 *$$

* *Int.* é o mesmo que "número inteiro contido em"

A fórmula para determinação da Correção do Dia (Cor) varia para certos meses. Deve-se escolher a fórmula adequada conforme descrito a seguir:

$$\text{Se } m\acute{e}s \leq 2, Cor = \text{Int.} \left(\frac{m\acute{e}s}{2} \right)$$

$$\text{Se } 2 < m\acute{e}s \leq 8, Cor = \left[\text{Int.} \left(\frac{m\acute{e}s}{2} \right) \right] - 2$$

$$\text{Se } 8 < m\acute{e}s \leq 12, Cor = \left[\text{Int.} \left(\frac{m\acute{e}s}{2} + \frac{1}{2} \right) \right] - 2$$

Seguindo os cálculos:

$$\text{Dia do Ano } (n) = D + (M - 1) \times 30 + Cor$$

$$n = 21 + (12 - 1) \times 30 + 4 = 355$$

$$\text{Declinação Solar } (\delta) = 23,45 \times \sin \left[\frac{360}{365} \times (284 + n) \right]$$

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{360}{365} \times (284 + 355) \right] = -23,45^{\circ}$$

$$\text{Ângulo Zenital } (\mu) = 90^{\circ} \text{ (ocaso do Sol)}$$

$$\text{Ângulo Azimutal } (\beta) = \arccos \left(\frac{\cos(\mu) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\sin(\mu) \times \cos(\varphi)} \right)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{\cos(90) \times \sin(\varphi - 22,88) - \sin(-23,45)}{\sin(90) \times \cos(-22,88)} \right)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{0 - 0,4}{1 \times 0,92}\right) = \arccos\left(-\frac{0,4}{0,92}\right) = 115,8^\circ$$

Abertura Angular Mínima do Heliostato (β_i) = $2 \times \beta = 2 \times 115,8 = 231,6^\circ$

Abertura Angular Definida para o Heliostato (β_f) = 240°

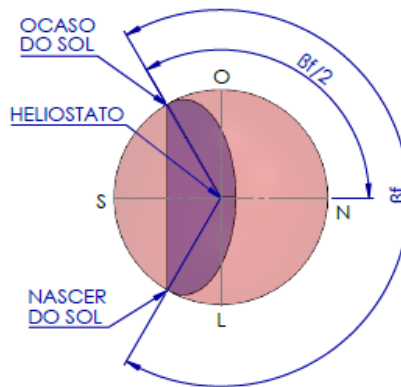


Figura 16 - Abertura Angular do Heliostato - fonte: o autor

5.2. Modelo conceitual do heliostato

Este trabalho considera um equipamento portando um disco parabólico com diâmetro externo de 2m. Vale lembrar também que, apesar de ser movido por um fluido compressível como o ar, é perfeitamente possível que o movimento de rastreamento solar do painel alcance um grau de precisão próximo daquele encontrado nos mecanismos de acionamento elétrico lançando mão de válvulas para controle do fluxo de ar, válvulas direcionais e sensores específicos.

Conhecida a maneira de funcionamento típica de um heliostato e determinada sua abertura angular, foi elaborado, com o auxílio do software Solidworks®, o modelo conceitual ilustrado a seguir, com a intenção de servir de referência para a construção de um protótipo experimental futuro a quem possa interessar. Na sequência será feita uma análise comentada sobre alguns aspectos importantes que devem ser levados em conta durante a execução de um projeto mecânico mais elaborado, com seus componentes devidamente dimensionados.

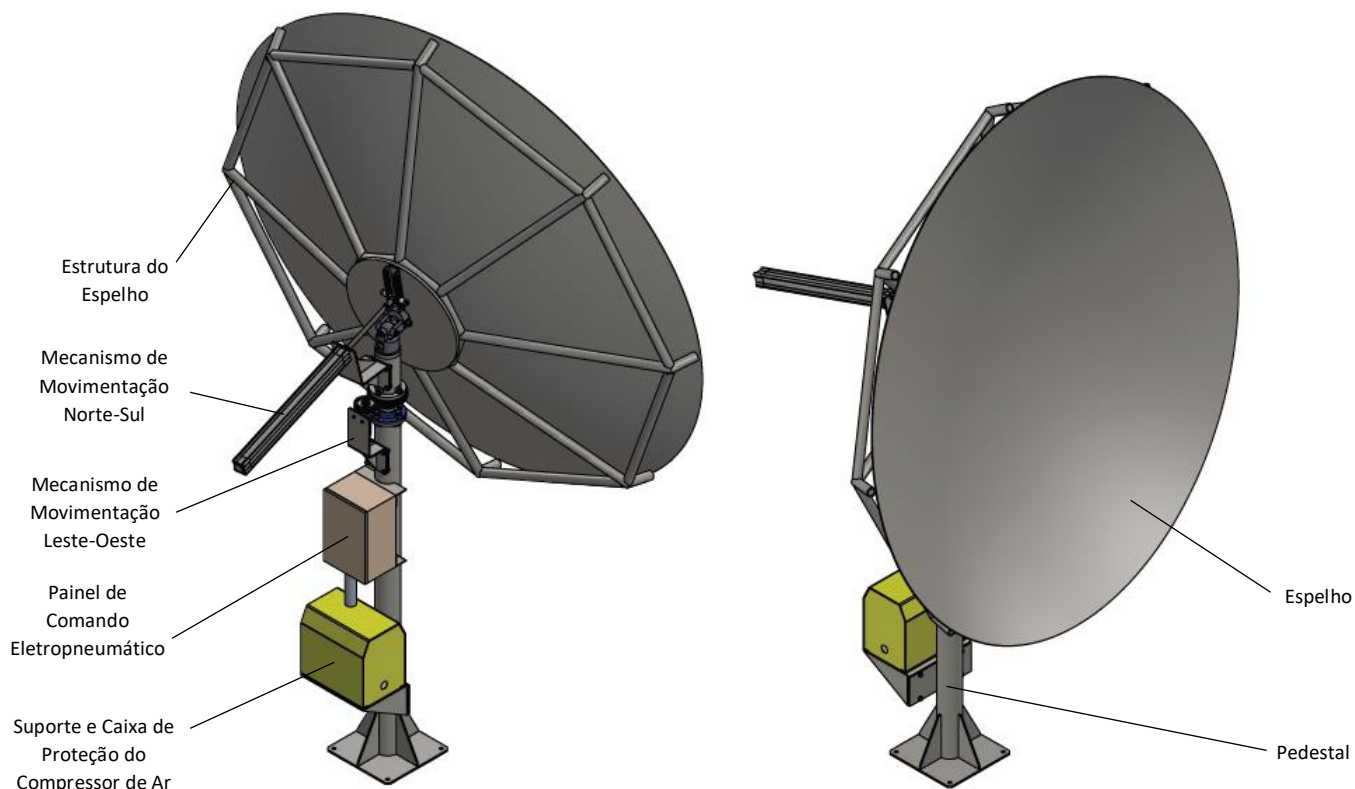


Figura 17 – À esquerda: vista Isométrica privilegiando a parte traseira do heliostato; À direita: vista isométrica privilegiando a parte frontal do heliostato – fonte: o autor

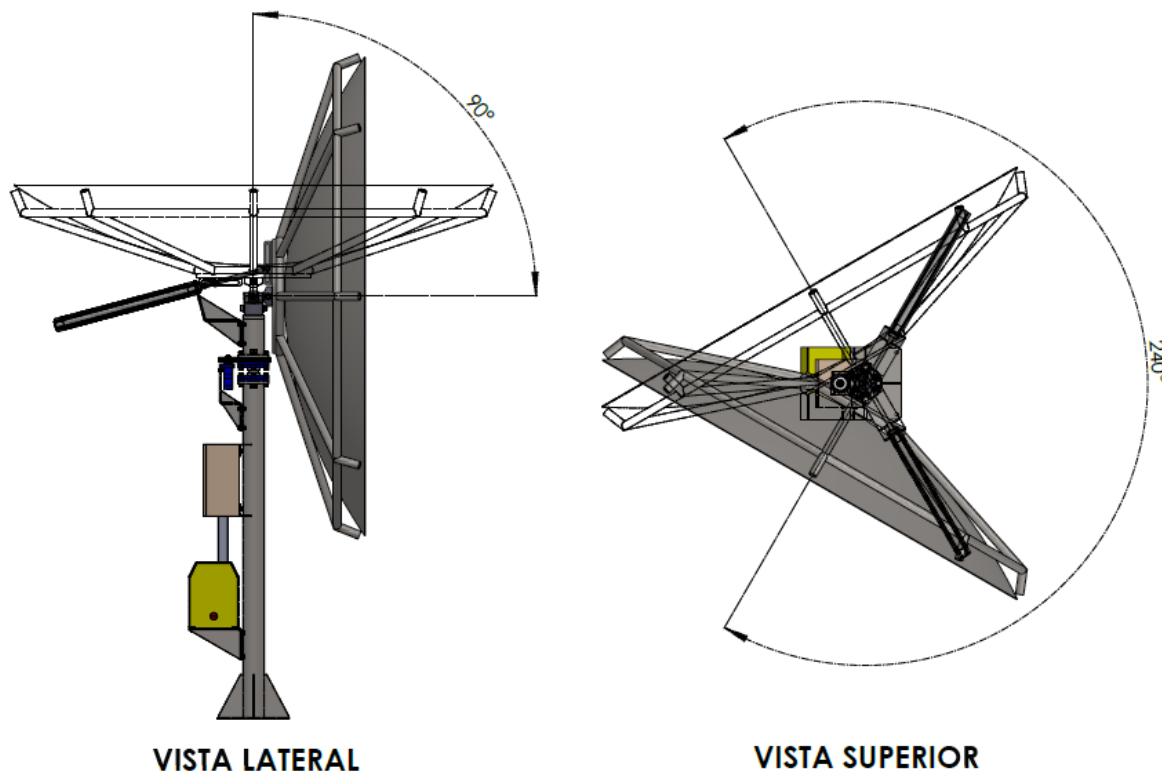


Figura 18 – Ilustração dos movimentos que o heliostato é capaz de realizar durante sua operação – fonte: o autor

Tentou-se aqui, a criação de um modelo simples, que privilegiasse a viabilidade de fabricação em larga escala, bem como a facilidade montagem, desmontagem, instalação em campo e manutenção à baixo custo. Para tal, a utilização de ligações parafusadas, de conjuntos soldados de fabricação simples e o emprego de equipamentos auxiliares facilmente encontrados no mercado foram amplamente utilizados.

5.2.1. Sistema de produção de ar comprimido

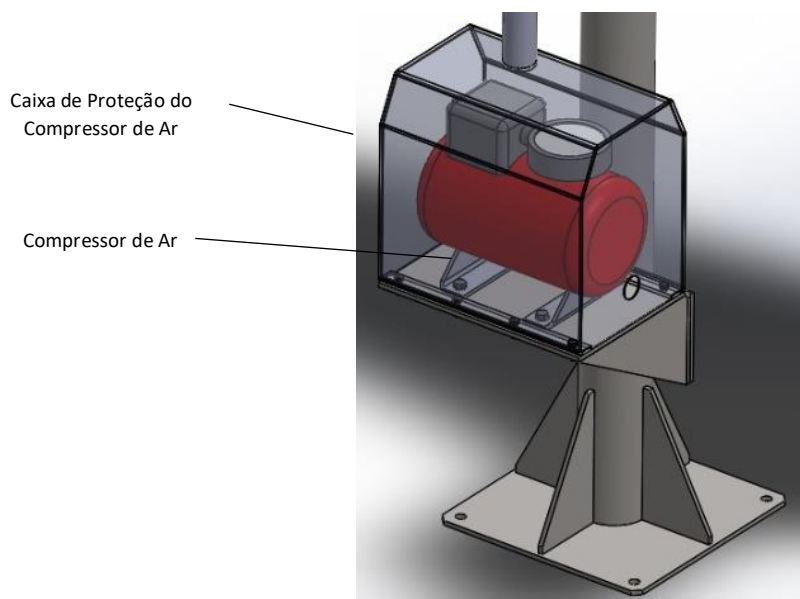


Figura 19 - Destaque para o sistema de produção de ar comprimido – fonte: o autor

Próximo à base do pedestal está instalado o compressor de ar. Com intuito de reduzir o custo do equipamento, deve-se selecionar um modelo compacto, similar àqueles portáteis utilizados para calibração de pneus. Os modelos encontrados no mercado costumam entregar pressões de 7 a 10 bar, que são suficientes para prover a força necessária aos atuadores. Em equipamentos com espelhos muito maiores é possível, inclusive, a instalação de um multiplicador de pressão (booster), logo após a saída do compressor. Isso evita a necessidade de usar cilindros com diâmetros de êmbolo cada vez maiores.

O compressor não deverá trabalhar de forma contínua e sim intermitente, mantendo a pressão da linha de ar sempre próxima dos 6 bar. Dessa forma, qualquer queda de pressão na linha deverá ser percebida por um pressostato cujo sinal de saída deverá alertar o sistema de comando para ligar o compressor. Uma vez reestabelecida a pressão normal da linha, o compressor deve desligar. A tensão de

alimentação deste modelo de compressor é de 12VDC, muito similar à tensão de acionamento dos atuadores lineares elétricos encontrados nos painéis fotovoltaicos e heliostatos de pequeno porte.

Dentro do campo dos compressores compactos existem também aqueles utilizados em aerógrafos, no entanto, as pressões fornecidas por esses equipamentos são de, no máximo 3,5 bar, sendo necessário, nesses casos, a utilização de um booster com relação de pressurização de, no máximo, 1:2, de forma que a pressão de trabalho fique em torno dos 6 bar, pressão considerada ideal para sistemas pneumáticos. Além disso, ao contrário dos compressores primeiramente citados, esses equipamentos são alimentados em tensão alternada 127/220 VAC requerendo uma análise de economia de energia mais aprofundada.

Há também a possibilidade de excluir o compressor e conectar o heliostato a uma linha de ar comprimido. Nesse caso, existe a figura de um compressor central e uma rede de distribuição de ar comprimido na qual estão conectados todos os heliostatos da instalação.

Para proteger o compressor das intempéries do tempo é necessário cobri-lo com uma proteção metálica fixa e dar a ela o devido tratamento superficial anticorrosivo. Além disso, a caixa de proteção deve possuir uma canaleta vertical para comunicação com o painel eletropneumático logo acima para passagem de mangueiras e fiação elétrica.

5.2.2. Painel de comando eletropneumático

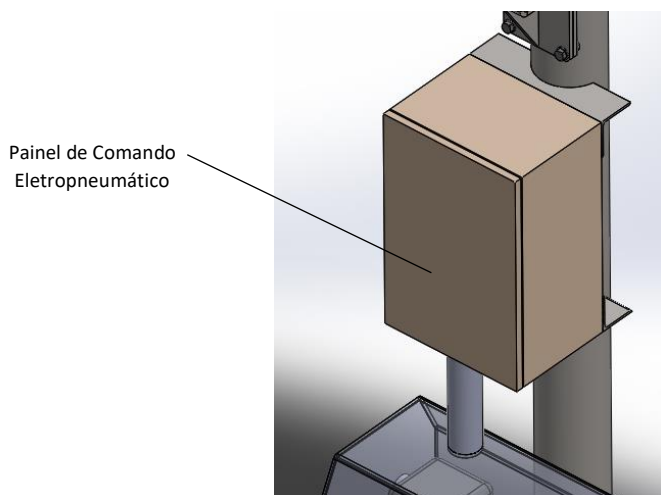


Figura 20 - Painel eletropneumático em destaque – fonte: o autor

O painel eletropneumático é onde devem estar acomodados os componentes pneumáticos de comando.

Entre os componentes pneumáticos necessários citam-se:

- a) duas válvulas pneumáticas 5/3 com centro fechado e acionamento por duplo solenoide, sendo uma delas dedicada ao comando do atuador linear (eixo de movimentação norte-sul) e a outra, ao comando do motor pneumático (eixo de movimentação leste-oeste). Os solenoides das válvulas são alimentados em 24VDC;
- b) o booster (quando necessário) com uma relação de compressão de, no máximo, 1:2.
- c) a unidade de condicionamento de ar (lubrifil), contendo filtro, regulador de pressão e lubrificador;
- d) um pressostato para detecção de quedas de pressão na linha de ar comprimido e envio de sinal para acionamento do compressor. A tensão de alimentação do pressostato é de 24VDC.

O painel deve ter uma classe de proteção IP54 ou superior para sua proteção e dos componentes internos contra as intempéries do tempo. O painel escolhido para este modelo possui 200mm de largura, 300mm de altura e 150mm de profundidade.

Devem sair do painel eletropneumático as mangueiras para conexão no atuador linear e no atuador rotativo. Para evitar a degradação prematura das mangueiras recomenda-se envolvê-las em um conduíte.

Existe, inclusive, a possibilidade dos componentes eletroeletrônicos e eletropneumáticos compartilharem o mesmo painel ou serem montados em painéis separados.

Os componentes elétricos podem incluir um CLP, uma fonte chaveada para conversão da tensão de alimentação alternada para contínua, dispositivos de proteção tais como disjuntores e DPS. De forma que se possa reduzir mais o custo do equipamento, é perfeitamente possível a criação de uma lógica de operação substituindo o CLP por um sistema com placas de Arduino. Deve-se considerar a instalação de sinalizadores luminosos na porta do painel para indicar o status do equipamento.

5.2.3. Mecanismo de movimentação Leste-Oeste

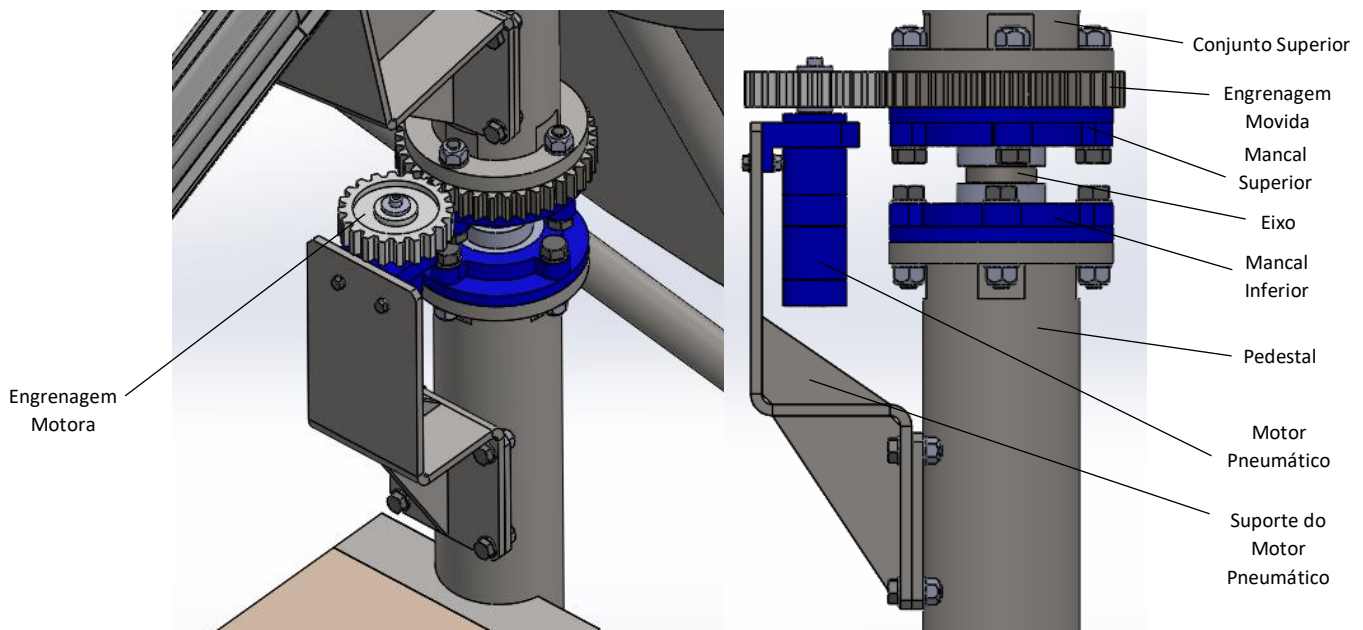


Figura 21 – À esquerda: vista isométrica do mecanismo de movimentação leste-oeste do heliostato; À direita: vista lateral do mesmo mecanismo – fonte: o autor

O sistema de movimentação Leste-Oeste é feito através do acionamento de um motor pneumático com potência estimada entre 1 e 3cv. Na ponta do eixo desse motor é acoplada a engrenagem motora que pode ser construída em material metálico com o devido tratamento superficial anticorrosivo ou em material não metálico desde que sejam atendidos os requisitos de resistência mecânica. Optou-se por um mecanismo com atuador rotativo pois este foi o que permitiu a abertura angular necessária de 240°, o que seria mais difícil de se conseguir com um atuador linear. A relação de transmissão entre as engrenagens motora e movida foi definida inicialmente em 1:2. A engrenagem movida deve ser construída em material metálico com o devido tratamento superficial anticorrosivo.

Entre o conjunto superior e o pedestal, observa-se uma redução da seção circular (vide a figura 20 à direita), sendo que a menor seção possível se dá no eixo. Deve-se atentar para este ponto e o eixo deve ser devidamente dimensionado para que suporte as cargas externas estáticas e dinâmicas e resista aos esforços internos solicitantes. Recomenda-se não utilizar eixos de grandes comprimentos de forma que os momentos de tenham menor influência sobre sua resistência. Os mancais de rolamento superior e inferior devem ser selecionados para resistam também a essas

cargas radiais e axiais estáticas e dinâmicas. Sugere-se mancais com rolamentos de rolos cônicos montados de forma contraposta, de forma que resistam bem às cargas radiais e axiais.

Para que se tenha um melhor controle sobre a velocidade de rotação do atuador pneumático recomenda-se a instalação de válvulas reguladoras de fluxo em suas duas vias de entrada de ar. O motor pneumático também deve possuir classe de proteção compatível com as condições de operação em ambiente externo, sujeito às intempéries do tempo.

É comum encontrar em alguns heliostatos o mecanismo de movimentação Leste-Oeste impulsionado por motores elétricos trifásicos, motores de passo ou servomotores. No caso do motor elétrico trifásico, devido ao regime de trabalho intermitente, as correntes de partida podem ser um problema e impactar o consumo de energia elétrica do equipamento. No caso dos motores de passo e dos servomotores, há a necessidade de instalação de drivers, agregando mais componentes ao sistema elétrico. O motor pneumático pode ser mais vantajoso nesta aplicação, podendo proporcionar economia no consumo de energia do sistema de movimentação do equipamento, bastando apenas que a rede de ar comprimido seja mantida à pressão correta.

Para determinação da posição angular correta para cada hora do dia, pode ser instalado no eixo da engrenagem motora ou da engrenagem movida um sensor de ângulo para envio do sinal ao sistema de comando.

5.2.4. Mecanismo de movimentação Norte-Sul

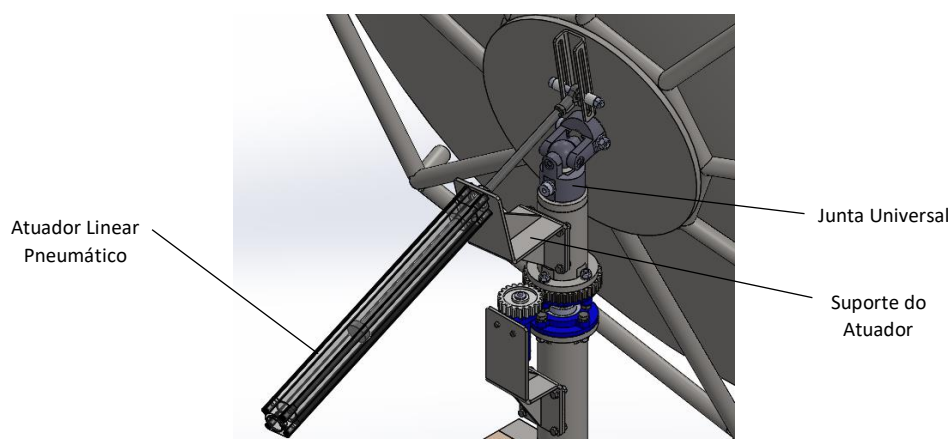


Figura 22 – Vista isométrica do mecanismo de movimentação Norte-Sul do heliostato com o corpo do atuador linear pneumático em transparência – fonte: o autor

Para movimentação do espelho no sentido norte-sul os principais componentes são o atuador linear pneumático e a junta universal.

Estando o espelho em sua posição vertical, a haste do atuador pneumático estará em sua extensão máxima. Nesta condição, é importante que ao menos metade do corpo da haste ainda esteja dentro do atuador, como mostra a figura 21. Isso contribui para que os momentos não influenciem menos sobre a haste, minimizando os efeitos de flexão. Além do dimensionamento do cilindro com relação à força necessária para a movimentação do espelho. É necessário também que tanto a haste quanto o corpo do atuador tenham a robustez necessária para suportar os esforços mecânicos aos quais estão submetidos.

A junta universal deve ser de acordo com a norma DIN 808 em um modelo que permita um grau de liberdade de 180° de um corpo em relação ao outro. No modelo conceitual apresentado foi utilizada uma junta universal com 80mm de diâmetro. Este componente deve ter a robustez necessárias para suportar e os esforços mecânicos em regime de trabalho. Para tal é necessário o devido dimensionamento, sobretudo do pino de sua articulação e dos pinos de trava, que neste caso são parafusos de corpo retificado (DIN 7379).

Faz-se necessário também a instalação de um sensor de ângulo no eixo de articulação da junta universal ou de um sensor óptico de distância com feixe apontado para o disco da estrutura do espelho de forma de que, para cada hora do dia, o heliostato realize o rastreamento da altitude solar.

O cilindro pneumático deve possuir grau de proteção contra corrosão na classe CRC4 para regime de trabalho ao ar livre e a junta universal deve ser submetida a um tratamento superficial para suporte a ação corrosiva das intempéries do tempo.

5.2.5. Estrutura do espelho e pedestal

A estrutura do espelho foi baseada de em tubos de seção circular com paredes de, no máximo 3mm de espessura de forma que o peso do conjunto seja o mais leve possível, possibilitando montagem e desmontagem ágeis e também menores cargas

sobre os componentes mais críticos do equipamento. A construção em trechos de tubos retos foi pensada visando um processo de fabricação mais ágil sob a perspectiva do trabalho de soldagem, procurando viabilizar uma produção seriada.

O pedestal também é de construção simples. Seu pilar deve ser construído com tubos de paredes espessas, sendo os tubos schedule ótimos candidatos para tal.

Algumas das peças agregadas ao pedestal como os suportes dos atuadores pneumáticos e os flanges sobre os quais são montados os mancais de rolamento podem requerer fabricação por corte a laser e dobra.

Recomenda-se utilizar chapas de espessura não menores do que 1/4 de polegada de espessura para a fabricação da sapata e das nervuras da base do pedestal.

Ambas as peças devem receber o tratamento superficial adequado uma vez que trabalharão expostas às intempéries do tempo. Neste caso sugere-se uma pintura eletrostática.

6. Conclusões

Feitas as devidas considerações sobre os principais aspectos do projeto mecânico de um heliostato de pequeno porte conclui-se que este modelo pode ser vantajoso para implementação em instalações CSP modulares de pequeno porte, principalmente aquelas para produção de químicos tais como os combustíveis solares.

Sua forma construtiva certamente permite uma fabricação em larga escala a baixo custo, bem como montagens e desmontagens fáceis tanto do equipamento como um todo quanto de seus subsistemas, possibilitando também manutenções mais ágeis.

A implementação de um modelo de heliostato com sistema de rastreamento solar impulsionado pneumaticamente pode impactar de forma positiva sobre o consumo de energia do equipamento quando comparado com os modelos mais convencionais do mercado, impulsionados eletricamente, sem abrir mão da precisão no posicionamento do espelho. Além disso a utilização do ar comprimido como fluido de trabalho oferece outras vantagens como menor risco de danos e acidentes em caso de sobrecarga do sistema e facilidade de manutenção. Se devidamente consideradas, a premissas apresentadas aqui podem levar à construção de um equipamento robusto e de longo tempo de serviço.

As ideias apresentadas com o modelo de equipamento exposto neste trabalho podem também ser utilizadas como referência para projetos futuros de protótipos experimentais e também servir como base para um projeto de heliostato mais detalhado com o devido dimensionamento de seus componentes mecânicos e todos os seus subsistemas.

7. Referências

ALBOTEANU, I.L. Experimental Model of Pneumatic Tracking System for Photovoltaic Panel. Hidraulica Magazine, Craiova, n.4, p. 17-22, 2015, april, 2015.

ALBOTEANU, I.L. Pneumatic Tracking System for Photovoltaic Panel. Hidraulica Magazine, Craiova, n. 1, january 2015.

Al Maaita, A.; HOFFMAN, J.F.; FARRAH, T.; CALVET, N. Design and Demonstration of a 10-meter Metallic Reflectors Based Fresnel Lens, with Lower Focal Point Fixed to the Ground. Daegu: SolarPACES, 2019. 2 p.

Blue Book of China's Concentrating Solar Power Industry. Beijing: China Solar Thermal Alliance, 2021-

LEDESMA-JAIME, R.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, M.; FERRER-ALMARÁZ, M. A.; RAMOS-LÓPEZ, H. Análisis dinámico estructural de un helióstato concentrador de energía solar. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-8: 1-11.

LUIZ, A.M. Como Aproveitar a Energia Solar. São Paulo: Edgard Blücher, 1985. 191 p.

MOREIRA, J.R.S. Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 2ª ed. São Paulo: LTC, 2021. 490 p.

MOURÃO, R.R.F. Sol e Energia no Terceiro Milênio. São Paulo: Scipione, 2000. 114 p.

NEVES, M.C.D.; ARGÜELLO, C.A.; Astronomia de Régua e Compasso: de Kepler a Ptolomeu. 2ª ed. Campinas: Papirus, 2001. 161 p.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 2014. 529 P.

ROMERO, M.; AGUILAR, J.G.; LUQUE, S. Ultra-Modular 500m² Heliostat Field for High Flux/High Temperature Solar-Driven Processes. Móstoles: AIP Publusing, 2016. 9 p.

SolarPACES. Almería. Start-Up VC Invests in Beam-Down Concentrator for Solar Fuel. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/start-up-vc-invests-in-beam-down-concentrator-for-solar-fuel/>>. Acesso em: 03 out. 2022.

Solar thermal power plants. Heat, electricity and fuels from concentrated solar power. Cologne: German Aerospace Center, 2021-

World Energy Outlook 2019, IEA Publications. Paris: Internationa Energu Agency, 2019- . Annual. ISSN 2072-5302.