

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

ISRAEL COSTA BETTIOL

**PROPOSTA DE UM MECANISMO DE GIRO PARA SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR ATRAVÉS DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

CAXIAS DO SUL

2017

ISRAEL COSTA BETTIOL

**PROPOSTA DE UM MECANISMO DE GIRO PARA SISTEMAS DE CAPTAÇÃO
DE ENERGIA SOLAR ATRAVÉS DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Aproveitamento de Energia

Supervisor: prof. Dr. Carlos Alberto Costa

CAXIAS DO SUL

2017

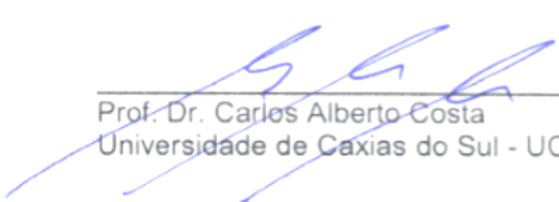
ISRAEL COSTA BETTIOL

PROPOSTA DE UM MECANISMO DE GIRO PARA SISTEMAS DE CAPTAÇÃO
DE ENERGIA SOLAR ATRAVÉS DE PLACAS FOTOVOLTAICAS

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Aproveitamento de Energia

Aprovado em 30/06/2017

Banca Examinadora



Prof. Dr. Carlos Alberto Costa
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Me. Sergio da Silva Kucera
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Profª. Ma. Andréa Cantarelli Morales
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

Devido às mudanças climáticas e preocupações relacionadas ao meio ambiente, as fontes renováveis de energia, como a solar, vêm recebendo cada vez mais incentivos governamentais e tecnológicos. É comprovado que mecanismos que atuam como rastreadores solares podem aumentar a eficiência na geração de energia fotovoltaica em até 40% se comparado às instalações fixas. Com base nisso, este trabalho desenvolveu uma configuração de rastreador solar para implementação na área da engenharia mecânica da UCS. Foram estudadas soluções de rastreadores solares, considerando a movimentação do sistema para acompanhamento do movimento diário e sazonal do sol. Foram analisados os principais mecanismos de movimentação encontrados na literatura, dos quais foi extraído um conjunto de critérios de avaliação que serviram de base para a discussão de uma proposta inicial. Além de dados do movimento do sol e da força dos ventos para a cidade de Caxias do Sul, foram considerados: o princípio de giro, componentes do sistema, resistência à força dos ventos, alcance angular e forma de acionamento. Para o estudo foi considerado um sistema com duas placas fotovoltaicas, disponíveis na UCS, com dimensões de 1667 x 1000 x 50 mm e peso de 19,4 kg cada uma. Como resultado, chegou-se em uma configuração final composta por perfis de sustentação e um poste de aço, que compõem a estrutura do rastreador. O giro do mecanismo nos dois eixos se dá em função do uso de duas engrenagens com eixo sem fim. Mancais, rolamentos e elementos de fixação complementam o mecanismo. Tal solução poderá ser utilizada como modelo inicial aos painéis fotovoltaicos da UCS, acrescentando à instituição de ensino possibilidades de futuros estudos relacionados às energias renováveis.

Palavras-chave: Energia Solar. Painel Fotovoltaico. Rastreador Solar. Eficiência Energética.

ABSTRACT

Due to climate change and environmental concerns, renewable energy sources, such as solar, are increasingly receiving government and technological inputs. It is proven that mechanisms that act as solar trackers increase the efficiency in the generation of photovoltaic energy by approximately 40% when compared to fixed installations. Based on this, this paper has developed a solar tracker configuration to be implemented in the mechanical engineering area of UCS. Solutions of solar trackers were studied, considering the movement of the system to follow the daily and seasonal movement of the sun. The main solar trackers found in the literature were analyzed, from which a set of evaluation criteria was extracted, serving as a basis for the discussion of an initial proposal. In addition to the study of the movement of the sun and the force of the winds of Caxias do Sul, the aspects considered were: the turning principle, system components, wind force resistance, angular range and drive form. For the study, it was considered a system with two photovoltaic panels, available at UCS, with dimensions of 1667 x 1000 x 50 mm and weight of 19.4 kg each. As a result, a final configuration was made up of support profiles and a steel pole, which make up the tracker structure. The rotation of the mechanism in the two axes is due to the use of two slew drives. Bearings and fasteners complement the mechanism. Such a solution could be used as an initial model for the photovoltaic panels of UCS, adding to the educational institution possibilities of future studies related to renewable energies.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Panel. Solar Tracker. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira em 2015	11
Figura 2 - Custo nivelado de componentes energéticos (US\$/MWh)	17
Figura 3 - Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar.....	18
Figura 4 - Componentes de um sistema fotovoltaico residencial.....	19
Figura 5 – Conversão fotovoltaica e formação de corrente elétrica fotovoltaica.....	20
Figura 6 - Média de radiação solar anual no Brasil	22
Figura 7 – Azimute e Altura Solar	24
Figura 8 – Variação da Altura Solar.....	24
Figura 9 – Rastreador solar operado por atuador linear.....	26
Figura 10 – Rastreador solar operado por engrenagens de rotação	26
Figura 11 - Rastreador solar operado por cabos.....	27
Figura 12 - Rastreador solar híbrido	28
Figura 13 – Rastreador Smartflower	29
Figura 14 – Carta solar de Caxias do Sul.....	30
Figura 15 – Exemplo de leitura de uma carta solar	31
Figura 16 – Rastreadores solares selecionados para análise	36
Figura 17 – Princípio de giro do Rastreador “A”	37
Figura 18 – Princípio de giro do Rastreador “B”	38
Figura 19 – Princípio de giro do Rastreador “C”	38
Figura 20 – Painel fotovoltaico da UCS.....	45
Figura 21 – Posicionamento inicial dos painéis.....	48
Figura 22 – Primeiro modelo rastreador solar UCS.....	49
Figura 23 – Segundo modelo rastreador solar UCS.....	50
Figura 24 – Modelo final rastreador solar UCS	51
Figura 25 – Ilustração para cálculo dos rolamentos	53
Figura 26 – Ilustração para cálculo do torque	54

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Componentes mecânicos dos rastreadores	39
Quadro 2 - Resistência dos rastreadores à força dos ventos	40
Quadro 3 - Faixa de rastreamento	41
Tabela 1 – Força dos ventos para 1, 2, 3 e 4 painéis fotovoltaicos	43
Tabela 2 – Faixa de rastreamento para Caxias do Sul.....	44
Quadro 4 – Características mecânicas do painel fotovoltaico	45
Tabela 3 – Dados de entrada para a proposta	47
Tabela 4 – Correção da força dos ventos devido à inclinação dos painéis.....	47
Quadro 5 – Componentes mecânicos do rastreador UCS	52

LISTA DE SIGLAS

AC	Corrente Alternada
CCET	Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
DC	Corrente Contínua
FV	Energia Fotovoltaica
GICC	Gaseificação Integrada de Ciclo Combinado
MME	Ministério de Minas e Energia
UCS	Universidade de Caxias do Sul
ICES	Instituição Comunitária de Educação Superior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	AMBIENTE DE ESTÁGIO	12
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ENERGIA SOLAR	15
2.1.1	Por que a energia solar?	15
2.1.2	Aplicações	17
2.1.3	Elementos de um sistema de captação solar fotovoltaico	20
2.1.4	Potencial energético brasileiro	21
2.2	MECANISMOS E SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA PLACAS SOLARES	23
2.2.1	Princípios do movimento solar	23
2.2.2	Rastreadores solares e sua eficiência energética	25
2.3	REQUISITOS TÉCNICOS PARA ENERGIA E CAPTAÇÃO SOLAR	29
2.3.1	Mapeamento solar	29
2.3.2	Diretrizes de construção civil	31
2.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	CENÁRIO ATUAL	34
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO	35
3.3	APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	36
3.3.1	Princípio de giro do mecanismo	37
3.3.2	Componentes mecânicos dos rastreadores	38
3.3.3	Forma de acionamento do mecanismo	39
3.3.4	Resistência à força dos ventos	40
3.3.5	Alcance angular do mecanismo nos dois eixos	41
3.3.6	Complexidade da manutenção do sistema	41
3.3.7	Análise geral	41
3.4	REQUISITOS TÉCNICOS DE PROJETO PARA O MODELO DE PAINEL DA UCS	42
3.4.1	Força dos ventos para Caxias do Sul	43
3.4.2	Faixa de rastreamento para Caxias do Sul	44
3.4.3	Painel fotovoltaico da UCS	44
4	PROPOSTA DE RASTREADOR SOLAR DA UCS	47

4.1	CÁLCULO DA FORÇA DOS VENTOS	47
4.2	MODELAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO RASTREADOR SOLAR	48
4.2.1	Modelamento do conceito do rastreador solar	48
4.2.2	Dimensionamento dos rolamentos e torque do sistema.....	52
4.3	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	ANEXO A – POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR MUNDIAL	61
	ANEXO B – ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA.....	62
	ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO PAINEL FOTOVOLTAICO	63

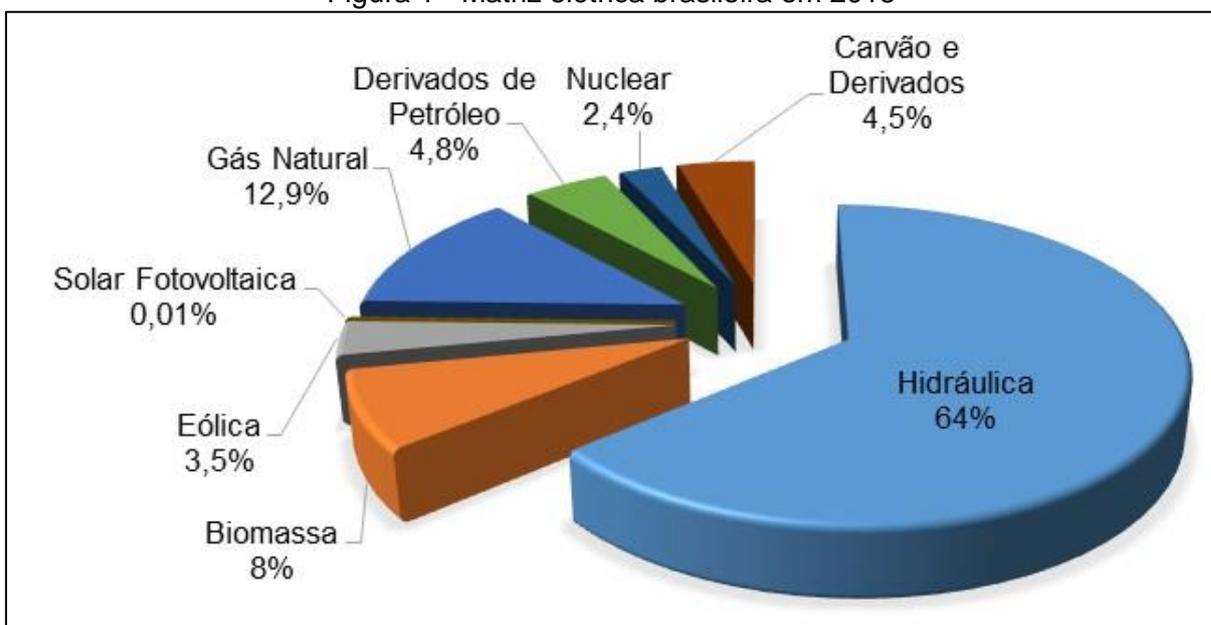
1 INTRODUÇÃO

O mundo é feito de energia. O ser humano consome essa energia em todos os momentos, seja comendo, trabalhando, se deslocando ou até mesmo dormindo. Com o passar dos anos, o homem aprendeu a obter, controlar, armazenar e distribuir a energia disponível no planeta de diversas formas, para que esta fosse utilizada conforme suas necessidades e desejos.

Das mais variadas fontes de energia elétrica atualmente conhecidas, como a queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural), hidrelétricas e energia nuclear, as chamadas energias renováveis vem chamando cada vez mais a atenção de governos e instituições. Por serem formas de energia limpas, com reduzida, ou até mesmo sem agressão ao meio ambiente e terem a capacidade de serem repostas naturalmente, sistemas como o de biomassa e as energias eólica solar vem ganhando força e recebendo incentivos tecnológicos e financeiros para seu desenvolvimento. Isto é somado à necessidade de substituir formas convencionais de energia, que geralmente são limitadas e cujo uso e/ou exploração prejudicam o meio ambiente.

Energia renovável não é novidade no Brasil. Hoje, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), mais de 75% da energia elétrica consumida pelos brasileiros provém de fontes renováveis de energia, tendo as usinas hidrelétricas como as principais produtoras de eletricidade, conforme observado na Figura 1. Geração de energia eólica e à base de biomassa vêm incrementando a produção brasileira, enquanto a geração térmica, à base de derivados de petróleo, apresentou queda na oferta interna.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira em 2015



Fonte: adaptado de EPE (2016)

O número de 75% agrada aos olhos, mas já foi maior. No ano de 2011, aproximadamente 90% da matriz elétrica brasileira era composta de fontes renováveis. A redução nesta porcentagem se deu em função da diminuição da oferta hidráulica, em função das baixas nos rios e demais fatores ambientais. Embora a energia hidrelétrica seja renovável e limpa, ela não é inesgotável. Com base nestes dados, fontes alternativas de energia elétrica vêm recebendo incentivos e investimentos, tanto governamentais quanto privados. Destaque para energias eólica e solar que, embora ainda representem baixa participação na matriz energética do Brasil, em 2015 tiveram um crescimento de aproximadamente 50% em capacidade de produção comparado ao ano de 2014 (EPE, 2016).

O Brasil possui grande potencial para gerar eletricidade a partir do sol. De acordo com Pereira et al. (2006), diariamente incidem entre 4,25 a 6,5 kWh/m² no país, fazendo com que a área menos ensolarada do Brasil tenha 40% de radiação solar a mais do que a região mais ensolarada de um dos líderes no uso de energia fotovoltaica (FV), a Alemanha. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), a geração total de energia solar no mundo inteiro em 2015 foi de 253 TWh, equivalendo a 1% da geração de energia global. China, Estados Unidos, Alemanha, Japão e Itália lideram, respectivamente, o ranking de geração de energia solar, correspondendo juntos a 68% do total mundial. Em 2018, acredita-se que o Brasil estará entre os 20 países maiores geradores de energia solar (MME, 2016).

Por apresentar uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, o uso de energia solar em solo brasileiro é considerado mais como fonte complementar de energia, alimentando indústrias, casas e edifícios, aproximando a geração do consumo e evitando perdas de transmissão (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013).

Para se obter o melhor aproveitamento da transformação da radiação solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, o posicionamento do sistema é um dos pontos mais importantes do projeto e instalação. Dentre as formas de posicionamento, a instalação fixa em telhados é a mais comum, seguindo diretrizes para que as placas fotovoltaicas recebam a maior incidência de raios solares de acordo principalmente com a localização geográfica. Há também sistemas automatizados que realizam o giro das placas, acompanhando o ciclo do sol, recebendo mais radiação solar e por consequência gerando mais energia. Porém o custo de aquisição e a potência consumida por esses mecanismos acaba, por muitas vezes, tornando-os desvantajosos para o consumidor final, principalmente a nível residencial, sendo mais comumente utilizados em usinas solares.

1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Universidade de Caxias do Sul (UCS) é uma Instituição Comunitária de Educação Superior (ICES), com atuação direta na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.

Como instituição comunitária, a UCS está em permanente diálogo com a sociedade. Seus interesses são os da coletividade e o resultado de suas ações é totalmente reinvestido na qualificação institucional.

Com atuação no campo do ensino, pesquisa, inovação e extensão, a UCS mantém unidades em nove cidades, atingindo diretamente uma população de mais de 1 milhão de habitantes. Seu Campus Sede está localizado na cidade de Caxias do Sul, um polo de desenvolvimento industrial com reconhecimento nacional. As demais unidades universitárias estão localizadas nas cidades de Bento Gonçalves, Vacaria, Canela, Farroupilha, Guaporé, Nova Prata, Veranópolis e São Sebastião do Caí (UCS, 2016).

Com ênfase no ensino de graduação e pós-graduação, a UCS responde pela formação de cerca de 70 mil profissionais, que têm a possibilidade de aperfeiçoar sua formação nos programas de pós-graduação - Especializações, MBAs, Mestrados e Doutorados oferecidos pela Instituição nas diferentes áreas do conhecimento (UCS, 2016).

O estudo foi desenvolvido nos laboratórios de Engenharia Mecânica localizados no bloco D do Campus Universitário.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A UCS, como instituição pesquisadora e inovadora, também se preocupa com questões socioambientais e busca soluções para minimizar o impacto de suas ações sobre a natureza, entre elas a possibilidade de utilização de energias renováveis. Tal situação se alia à motivação pessoal do acadêmico deste trabalho, que, em todas suas ações, visa contribuir para um desenvolvimento sustentável e em comunhão com o meio ambiente.

Além da consciência sustentável, o uso de placas fotovoltaicas para geração de energia pode ser interessante na redução de custo com energia elétrica para a instituição de ensino.

Projetos de pesquisa com interesse nesta área estão sendo desenvolvidos, visto que a universidade já possui placas fotovoltaicas doadas por uma empresa do ramo de energia solar. Surge, portanto, a oportunidade da instituição em inserir-se como pesquisadora na área de energias renováveis, abrindo espaço para novas pesquisas, trabalhos e desenvolvimentos científicos e tecnológicos associados à esta proposta.

Considerando estas justificativas, este trabalho visa reforçar o uso de energia solar como solução na geração de energia elétrica limpa, através da apresentação de mecanismos de rastreamento solar, que aumentam a eficiência na captação de energia. Aspectos que implicam na seleção desta fonte de energia, bem como na utilização de dispositivos adicionais, como os rastreadores, serão levantados e discutidos, com o propósito de demonstrar os benefícios e dificuldades na escolha pelo uso destes componentes.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é propor um mecanismo de giro mecânico para as placas fotovoltaicas da UCS, possibilitando a transformação do sistema de captação de energia solar em um rastreador solar, visando principalmente melhor eficácia na captação da irradiação solar.

Com a intenção de auxiliar a atingir tal objetivo, metas complementares e específicas deste trabalho estão listadas abaixo:

- a) estudar tipos e princípios de mecanismos de giro que realizem a rotação de sistemas de captação de energia solar através de placas fotovoltaicas, bem como suas restrições e limitações de projeto para o modelo de placa da UCS;
- b) estudar as normas em relação à construção de sistemas estruturais e mecanismos de giro mecânicos;
- c) analisar a posição solar sobre a cidade de Caxias do Sul a fim de obter dados para o posicionamento dos painéis;

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho teve como foco exclusivamente a parte mecânica do mecanismo. Pontos como controle, automação e acionamento do sistema não foram desenvolvidos neste momento, mas servem como sugestões para os setores responsáveis na continuação do projeto. Questões econômicas e financeiras para o desenvolvimento e produção do rastreador solar também não foram abordadas. Estes aspectos poderão ser levantados em estudos futuros, a fim de analisar o tempo de retorno do investimento em função do ganho em eficiência energética.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR

Desde a antiguidade o homem tem usado o sol como recurso, sabendo que o seu potencial ia além da iluminação diária. Instrumentos de guerra e a escolha de posições geográficas estratégicas são alguns exemplos. Com o passar dos séculos e revoluções, fornalhas solares, aquecedores de vapor, caldeiras e demais sistemas foram criados, utilizando como fonte energética nada mais que a energia solar (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

No início, a utilização da energia solar se limitava à obtenção de água quente e aquecimento de ambientes. Segundo Hinrichs e Kleinbach (2003), somente a partir de 1950, com o impulso recebido através de programas espaciais norte-americanos, a geração de energia fotovoltaica (FV), que converte luz solar diretamente em eletricidade, começou a ser desenvolvida em maior escala, trazendo novas possibilidades para o setor de energia elétrica.

Hoje em dia, a produção de células fotovoltaicas não apresenta obstáculos técnicos ou científicos. Através de dados obtidos por satélites, sabe-se que o potencial energético solar que incide no planeta Terra é mais do que suficiente para suprir toda a demanda energética mundial. Então porque ainda energias renováveis, como a solar, são subutilizadas?

Diversas justificativas respondem essa pergunta. Razões econômicas, relacionadas ao custo da geração de energia renovável, estão no topo da lista. Algumas políticas e estratégias governamentais e empresariais também acabam criando barreiras para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes. Há ainda dificuldade no armazenamento deste tipo de energia, que muito depende de fatores ambientais como o tempo e o clima.

Apesar destas condições, a utilização de energias renováveis segue em crescimento. A conscientização social e ambiental tem sido um ponto de grande influência nas mudanças sobre a obtenção de recursos para a sobrevivência humana. Poluição, aquecimento global e esgotamento das fontes de energia consideradas não renováveis, como o carvão e o petróleo, são os principais aspectos que impulsionam pesquisas tecnológicas voltadas à produção de energia de forma sustentável. Obter cada vez mais energia, exigindo menos dos recursos naturais disponíveis, com o menor custo possível, são os objetivos dos profissionais da área.

2.1.1 Por que a energia solar?

Todas as fontes renováveis de energia atualmente conhecidas dependem direta ou indiretamente do sol. Energia eólica, hidrelétrica ou de biomassa necessitam do ciclo solar para que ventos, chuvas e plantas sirvam de combustível para seus sistemas (ROSA; FILHO,

2007). Entre essas fontes disponíveis, além das convencionais como o carvão e petróleo, por que optar pela geração de energia solar?

Atualmente, a maior parte do fornecimento mundial de energia elétrica provém de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, correspondendo a aproximadamente 76,4% na matriz de energia elétrica global (MME, 2015). O aumento dos preços e insegurança no fornecimento, visto que nem todos os países possuem os recursos em seu território, necessitando de importação, combinado com o crescimento na preocupação ambiental relacionada com mudanças climáticas, são os principais desafios deste mercado. Como resultado, órgãos governamentais e empresariais vem crescentemente apoiando o desenvolvimento de fontes alternativas de energia, bem como novas tecnologias para geração de eletricidade.

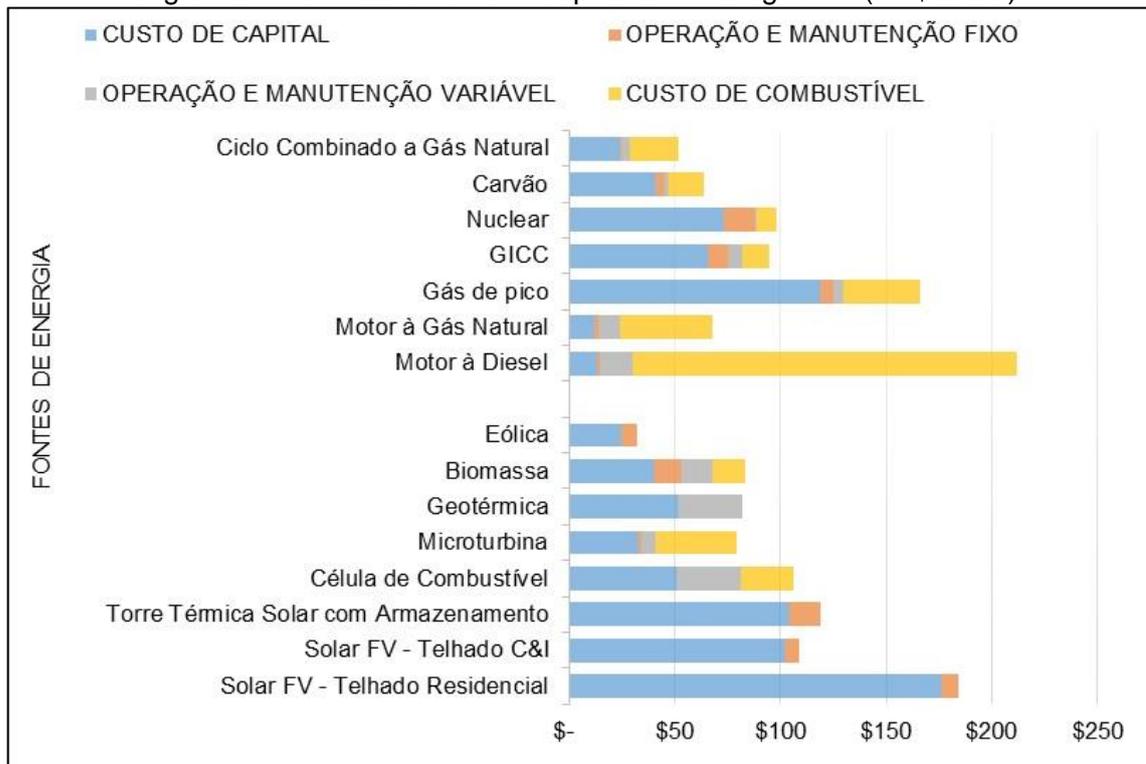
Como parte desta solução, a geração de energia solar emerge com certas vantagens sobre outras formas de energia (ENGINEERING.COM, 2016), entre elas:

- a) impacto ambiental reduzido ou nulo se comparado às outras formas de produção de eletricidade;
- b) independência de combustíveis fósseis, que são recursos caros e alteram de preço conforme a disponibilidade. Este fato, combinado a um sistema solar bem configurado e dimensionado, pode fornecer a longo termo eletricidade a um custo fixo;
- c) flexibilidade de instalação, sendo que sistemas de energia solar podem ser instalados próximo ao consumidor. Sendo um lugar isolado ou de difícil acesso, elimina custos de produção e transmissão através da rede convencional e pode vir a substituir geradores movidos a combustíveis fósseis, como o diesel, por exemplo;
- d) escalabilidade e versatilidade, visto que a quantidade de geração de energia depende do número de módulos solares instalados;
- e) incentivos governamentais que auxiliam na expansão da energia solar, como a sanção de leis que permitem descontos na fatura de energia elétrica, através da disponibilização do excesso de energia produzido localmente para a rede pública

Em contraponto, os custos de implementação e geração de energia solar ainda são maiores do que os demais sistemas de geração de energia elétrica. Isto impede a rápida ampliação de sua utilização, sendo necessária uma mudança de mentalidade, visto que o retorno é considerado a longo prazo.

A Figura 2 apresenta uma comparação dos custos de diversas fontes de energia através de dados obtidos em 2015 nos Estados Unidos (LAZARD, 2015). Foram considerados os limites inferiores de cada aplicação, demonstrando o custo mais baixo possível para a utilização de cada sistema.

Figura 2 - Custo nivelado de componentes energéticos (US\$/MWh)



Fonte: adaptado de Lazard (2015)

Apesar do alto custo de aquisição de um sistema de energia solar, o maior entre as fontes de energia expostas na figura acima, as perspectivas são otimistas para os próximos anos. Nos últimos seis anos, houve decréscimo de 82% nos custos de geração de energia solar nos Estados Unidos, tendência a ser continuada (LAZARD, 2015).

Além da barreira financeira, outros aspectos acabam dificultando a expansão da energia solar na matriz energética mundial: há necessidade de grandes áreas, livres de sombra, para a instalação dos painéis; não há sistemas de armazenamento eficientes em escalas de geração energética em massa e a eficiência dos sistemas é baixa, podendo haver necessidade de fontes energéticas de backup em dias de pouca radiação solar.

2.1.2 Aplicações

Existem dois grandes focos na utilização de energia solar: o aproveitamento térmico e a conversão direta da radiação solar em energia elétrica. Ambas as finalidades seguem parâmetros parecidos para sua instalação e aplicação, tendo a incidência de radiação solar como principal fator para sua eficiência.

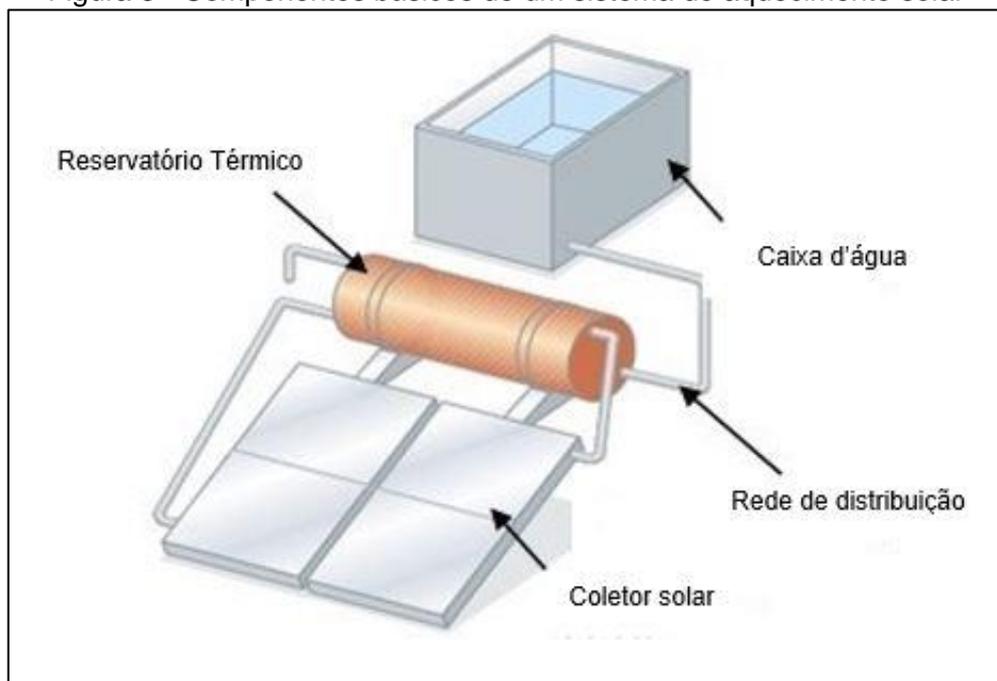
Sistemas de aproveitamento térmico são utilizados principalmente no aquecimento de piscinas e água em edificações residenciais, comerciais e industriais. Esta aplicação tem se mostrado vantajosa técnica e economicamente, especialmente em instalações domésticas,

trazendo uma alternativa aos chuveiros elétricos, que é um dos principais motivos dos altos gastos com a conta de energia elétrica fornecida pela rede pública. No estudo de Basso et al. (2010) prova-se a eficácia do uso de coletores solares para aquecimento da água residencial em zonas rurais, onde o acesso à energia elétrica pode ser restrito e seu custo elevado, mostrando que é possível obter-se temperaturas ideais para uso doméstico utilizando-se um sistema simples e de fácil manutenção.

Segundo Rosa e Filho (2007), um sistema de aquecimento solar usual é composto basicamente de um coletor solar, um reservatório térmico ou boiler e componentes como fonte auxiliar de energia e rede de distribuição de água quente (Figura 3). O reservatório e a fonte auxiliar de energia são necessários, visto que nem sempre os picos de uso de água quente coincidem com o período de insolação, somado com o fato de que em dias nublados a eficiência do sistema diminui.

Os coletores podem ainda ser classificados como planos, sendo que a temperatura da água deve ser inferior a 100 °C, habitualmente instalados nos telhados de residências e edifícios; ou concentrados, em que a captação da incidência solar é realizada em uma área grande e focalizada em uma área menor, que aumenta substancialmente de temperatura, atingindo facilmente temperaturas acima de 100 °C. Este último modelo citado pode ser utilizado para geração de vapor d'água e, conseqüentemente, energia elétrica, necessitando essencialmente de um mecanismo orientador que mantenha os coletores solares sempre perpendiculares com a posição do sol para seu funcionamento, o que encarece o sistema como um todo (CRUZ, 2009).

Figura 3 - Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar



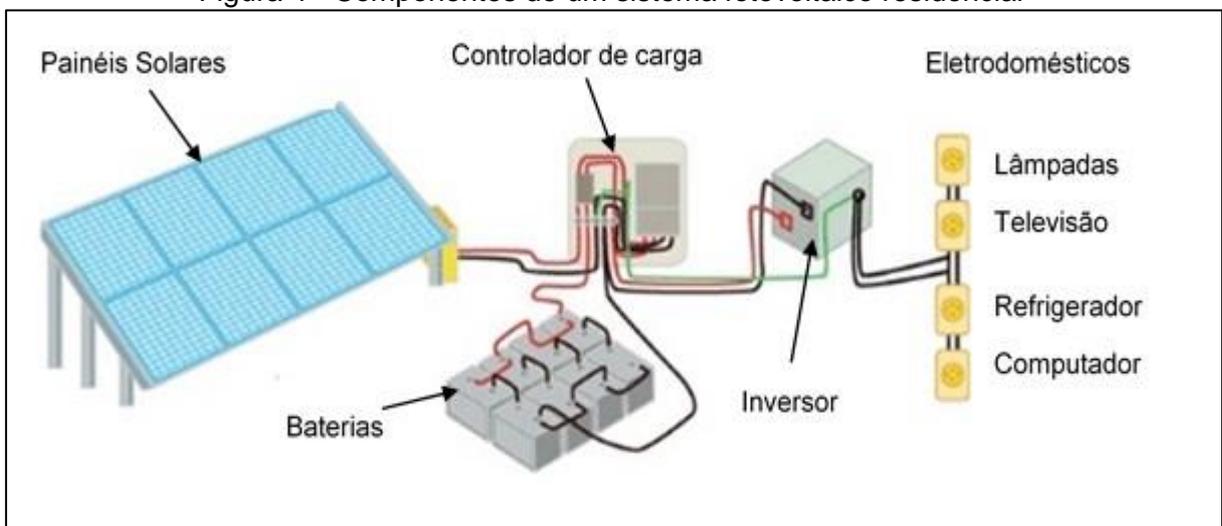
Fonte: adaptado de ANEEL (2005)

A outra aplicação, conversão direta de radiação solar em energia elétrica, acontece através de determinados efeitos que esta radiação ocasiona em certos materiais. Dois efeitos se destacam nesta modalidade: o efeito termoelétrico e o fotovoltaico, objeto de estudo deste trabalho. O efeito termoelétrico baseia-se no princípio do surgimento de uma diferença de potencial na união de dois materiais metálicos, quando esta junção possui uma temperatura mais alta do que as outras extremidades dos fios. Porém seu uso em grande escala tem se mostrado ainda inviável economicamente, visto que os rendimentos obtidos pelo sistema são baixos e os custos dos materiais são elevados, sendo utilizado em maioria na construção de medidores de temperatura (ANEEL, 2005).

Já os sistemas fotovoltaicos (FV) vêm apresentando um maior crescimento na sua utilização, devido a um custo/benefício cada vez mais atraente. Em materiais semicondutores ocorre a excitação dos elétrons com a incidência de luz solar, ocasionando novamente uma diferença de potencial, transferindo estes elétrons de um lado para outro, gerando uma corrente elétrica. O Silício é o material mais utilizado na fabricação dos painéis fotovoltaicos, o que é bom para o Brasil, que possui grandes reservas desta matéria-prima espalhadas em seu território (MME, 2016).

Existem diversas configurações de instalação para sistemas FV, do mais básico ao mais completo, dependendo do grau de utilização do consumidor e das necessidades elétricas a serem supridas. A Figura 4 mostra um esquema simplificado de um sistema residencial usual isolado, no qual toda energia produzida pelos painéis é utilizada no próprio local de instalação e armazenada em baterias para uso posterior. Pode-se ainda interligar o sistema com a rede convencional de energia elétrica, distribuindo a ela o excesso de eletricidade produzido, ou recorrer à rede pública quando o suprimento de energia solar não é suficiente para prover a quantidade de energia elétrica necessária da residência (ROSA; FILHO, 2007).

Figura 4 - Componentes de um sistema fotovoltaico residencial

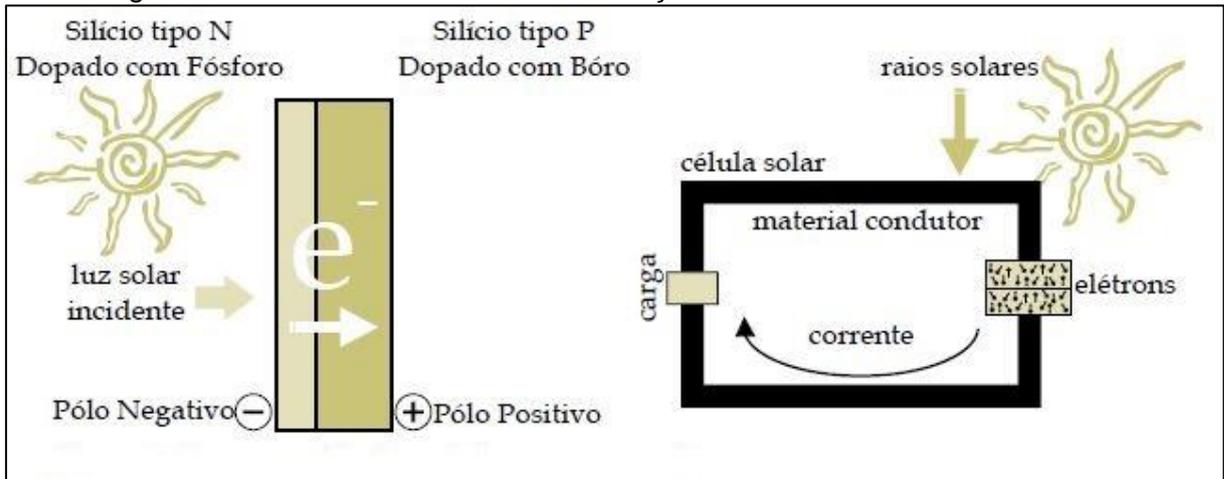


2.1.3 Elementos de um sistema de captação solar fotovoltaico

Entre os componentes básicos necessários na instalação de um sistema FV, conforme a figura 4, tem-se: painéis solares, controlador de carga, baterias e inversor (ROSA; FILHO, 2007).

Nos painéis solares ou fotovoltaicos, a radiação solar é convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Um painel é composto de módulos, os quais são formados por diversas células fotovoltaicas, construídas com um material semicondutor, usualmente o Silício. Para ocasionar o efeito, elementos químicos denominados ‘dopantes’ são adicionados ao Silício, criando uma junção P-N, sendo P o polo positivo e N o negativo. O Fósforo e o Boro em geral são utilizados para essa função, no qual através da excitação provocada pelos fótons da radiação solar, fazem com que o elétron que está “sobrando” na ligação Silício-Fósforo migre para o lado do Silício-Boro, preenchendo a lacuna existente pela falta de elétrons desta ligação, gerando a corrente elétrica. Desta forma, o fluxo de energia elétrica é proporcional à intensidade da luz ou radiação solar.

Figura 5 – Conversão fotovoltaica e formação de corrente elétrica fotovoltaica



Fonte: adaptado de Rosa e Filho (2007)

A célula fotovoltaica tem valor de tensão de aproximadamente 0,5 volts. A corrente gerada em cada célula é proporcional à incidência de radiação solar, podendo chegar a 3 amperes, resultando em uma potência de cerca de 1,5 W (PORTAL ENERGIA, 2004). Para obter valores de tensão e corrente necessários para o funcionamento dos equipamentos, faz-se necessário a conexão de células em série, elevando a tensão, e em paralelo, que aumenta a corrente. Conforme Rosa e Filho (2007), um módulo fotovoltaico normalmente possui 30, 32 ou 36 células conectadas em série, o que varia conforme a aplicação. Já em um painel fotovoltaico, pode-se fazer a combinação de ligações em série e em paralelo dos módulos, a fim de atingir tensão e corrente compatíveis com os demais componentes do sistema.

Outra característica importante e um dos principais focos deste trabalho é o posicionamento dos painéis, que devem ser instalados de forma que recebam o máximo de luz solar durante o dia. Na grande maioria das vezes opta-se por um posicionamento fixo intermediário, já que sistemas que acompanham o ciclo solar adicionam um custo relevante o conjunto. Surge então a oportunidade de estudo de um mecanismo de giro para painéis solares que seja confiável e vantajoso ao consumidor. Para a determinação da posição de instalação dos painéis, leva-se em conta a latitude local e o hemisfério em que o consumidor se encontra, apontando a face dos painéis para o sul, quando se está no hemisfério norte, e para o norte quando a instalação for feita no hemisfério sul (PORTAL ENERGIA, 2004).

Outro componente do sistema é o controlador de carga, um componente eletrônico que controla e distribui o fluxo de energia saindo das baterias para os equipamentos consumidores. Também auxilia no controle de vida das baterias, impedindo que haja sobrecarga ou que se descarreguem por completo (ROSA; FILHO, 2007).

As baterias são responsáveis pela acumulação ou armazenamento da energia elétrica gerada pelos painéis. São necessárias quando não há mais luz solar ou quando o consumo excede a geração elétrica momentânea dos painéis. A quantidade de baterias necessárias depende da carga instalada, a qual depende da faixa de consumo de energia. Juntamente com os painéis fotovoltaicos, as baterias são itens que elevam consideravelmente o preço do sistema (ROSA; FILHO, 2007).

Em seguida tem-se o inversor, um dispositivo eletrônico que transforma a corrente contínua (DC) gerada pelos painéis em corrente alternada (AC) de 110 ou 220 volts, que é o tipo de corrente utilizada pela maioria dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Para a escolha adequada do inversor, leva-se em conta a potência total gerada pelos painéis, que na transformação da corrente pode ser reduzida em 10% devido às perdas na conversão (ROSA; FILHO, 2007).

Fios condutores, fusíveis e demais componentes elétricos completam a instalação de todo o mecanismo, sendo dimensionados de acordo com a severidade da aplicação e o espaço disponível (ROSA; FILHO, 2007).

2.1.4 Potencial energético brasileiro

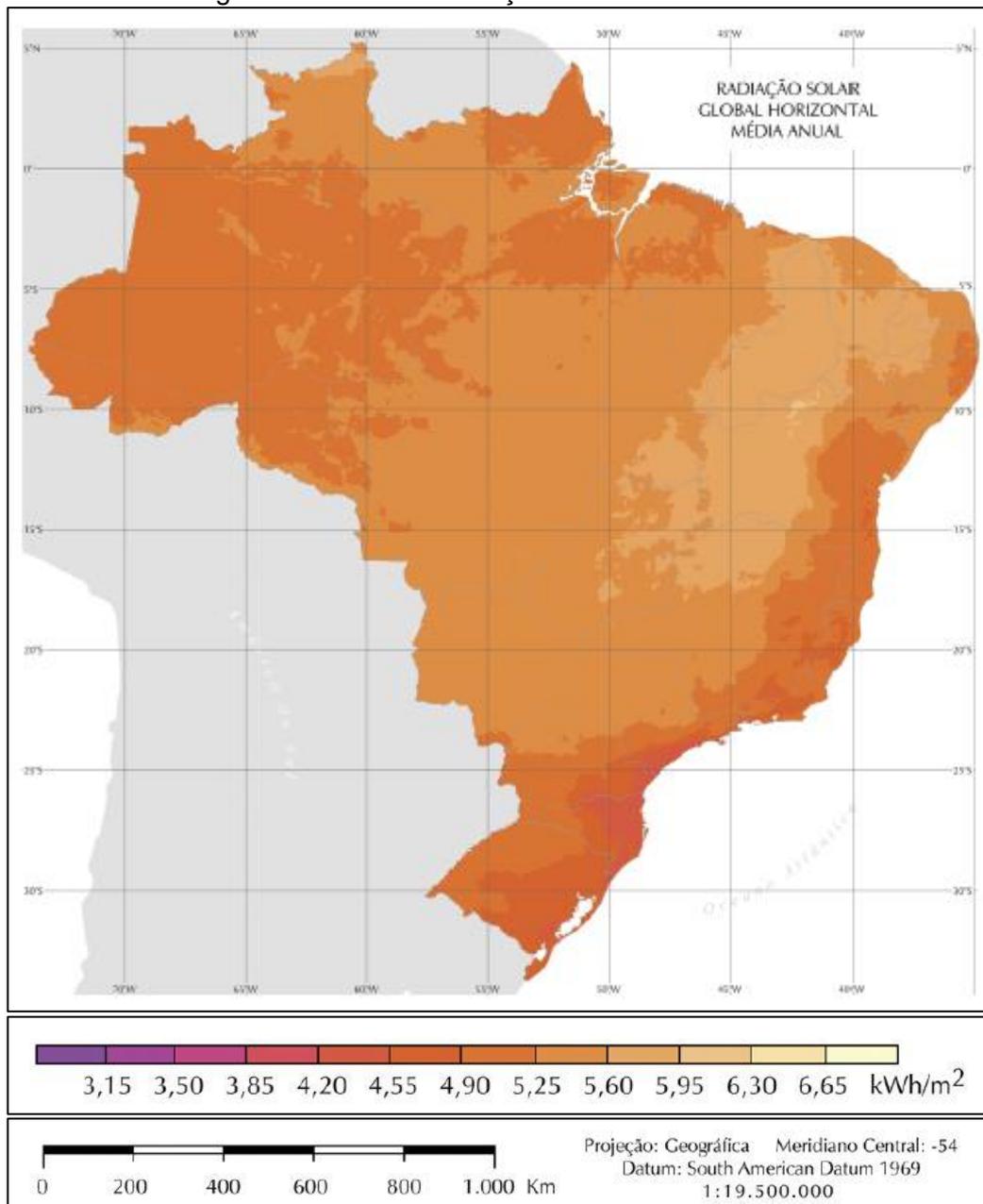
Quando fala-se em energia renovável, pode-se considerar o Brasil um país privilegiado geograficamente. Desde muito cedo, a energia hidráulica, proveniente das hidrelétricas, é a principal fonte de energia elétrica na matriz brasileira, correspondendo em 2015 a 64% do total de energia gerado no país (EPE, 2016).

Na Figura 1 observou-se a pequena participação de 0,01% da energia solar fotovoltaica no fornecimento de energia elétrica no Brasil, correspondendo a 34,3 MW de

capacidade instalada. Embora a parcela solar seja modesta, foi a fonte energética da matriz brasileira que mais apresentou crescimento em geração elétrica, chegando a aproximadamente 266% comparado ao ano de 2014 (EPE, 2016).

O Brasil, que está localizado em sua maior parte na região intertropical, possui um enorme potencial para aproveitamento de energia solar durante o ano inteiro, em razão da alta radiação solar incidente em seu território. O levantamento de Pereira et al. (2006) utilizou dados climatológicos, imagens de satélite e informações de estações de superfície obtidas em 10 anos para mapear o potencial energético solar brasileiro, atingindo os resultados demonstrados na Figura 6.

Figura 6 - Média de radiação solar anual no Brasil



Fonte: adaptado de Pereira et al. (2006)

Verifica-se que a maior insolação ocorre na área mais clara do mapa, no nordeste brasileiro, apresentando grande potencial energético para geração fotovoltaica. O Rio Grande do Sul possui uma média de irradiação solar entre 4,20 a 5,25 kWh/m², valores maiores que em qualquer região da Alemanha, podendo ser observados no Anexo A, onde a energia solar é amplamente disseminada (PEREIRA et al., 2006). Na região amazônica, onde somente 3% da população dispõe de energia elétrica, sistemas FV poderiam ser largamente implementados, devido à considerável distribuição de radiação solar e à pequena variação sazonal, economizando combustíveis fósseis e reduzindo a emissão de gases do efeito estufa. Em áreas urbanas, sistemas FV conectados à rede diminuiriam os custos com energia elétrica, em função da alta demanda em horários de pico, como o uso do ar-condicionado, por exemplo, cujo uso está ligado com a intensidade da radiação solar (PEREIRA et al., 2006). Pode-se considerar que em todo o país a geração de energia fotovoltaica pode alcançar resultados bastante positivos, havendo estudos e incentivos adequados.

2.2 MECANISMOS E SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA PLACAS SOLARES

A engenharia mecânica tem relevante participação em algumas etapas da geração de energia fotovoltaica. Particularmente na instalação dos sistemas FV, um componente de suma importância é a fixação dos painéis, que deve ser pensado e projetado levando em conta itens como segurança, facilidade de instalação, manutenção, vida útil e custo. A eficiência energética entra como elemento extra, visto que alguns mecanismos possibilitam o giro dos painéis solares, buscando sempre a maior incidência de luz solar e, por consequência, gerando mais energia elétrica, caracterizando o escopo deste trabalho.

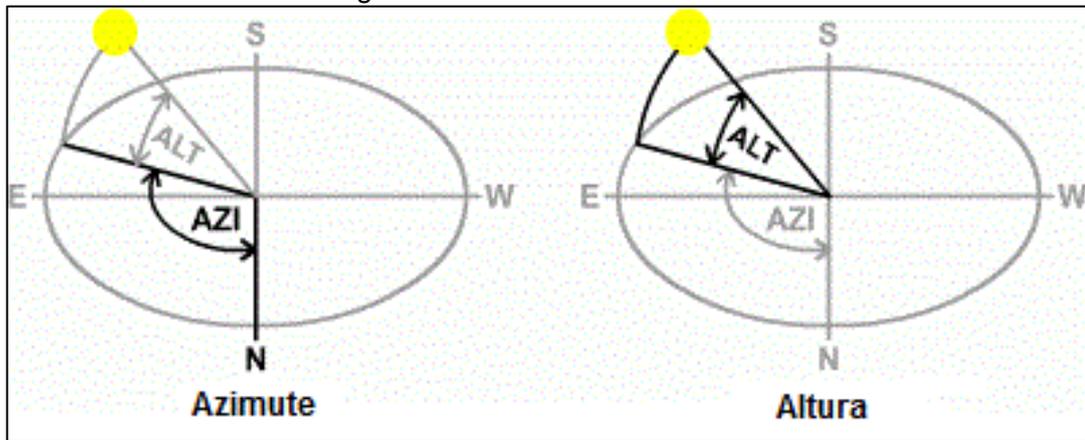
O tipo de fixação a ser utilizada depende principalmente do local de instalação dos painéis, que pode ser em telhado inclinado, telhado plano ou espaço aberto (PORTAL ENERGIA, 2004). Estética é um atributo opcional, havendo modelos compatíveis com a necessidade do consumidor. No caso da escolha por um sistema que efetue o giro dos painéis é preferível um local plano, visto que dependendo da inclinação da base, a rotação do sistema sofreria restrições, ocasionando em perda de eficiência.

2.2.1 Princípios do movimento solar

A função primordial do rastreador solar é possibilitar que os painéis estejam sempre recebendo a maior quantidade de luz solar. Para isso, seu funcionamento deve permitir que o plano dos painéis fique sempre normal à direção de maior incidência de radiação solar. Faz-se necessário conhecer a localização exata do sol ao longo do dia e do ano, caracterizada

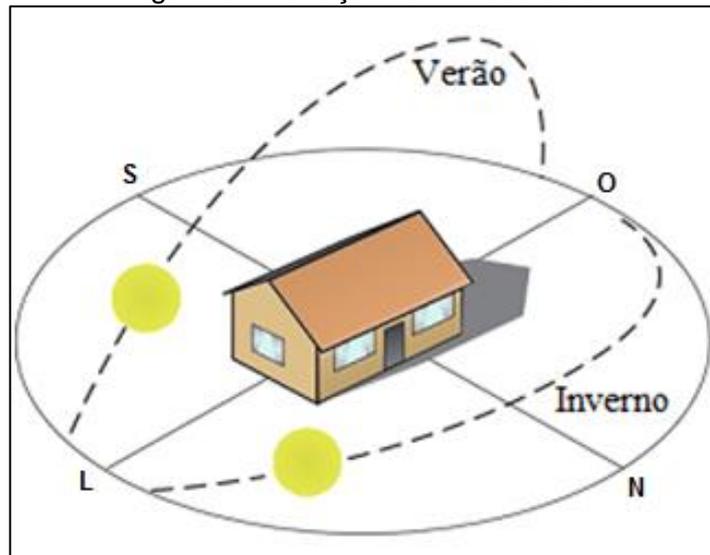
pela sua altura (θ) e seu azimute (Φ), que se alteram de acordo com a posição geográfica de onde será instalado o sistema. A Figura 7 ilustra a interpretação da altura e azimute solares e a Figura 8 exemplifica a variação da altitude solar conforme a época do ano.

Figura 7 – Azimute e Altura Solar



Fonte: adaptado de MPPT Solar (2016)

Figura 8 – Variação da Altitude Solar



Fonte: MPPT Solar (2016)

Sistemas que permitem o giro dos painéis em todas as direções, Leste-Oeste e Norte-Sul, viabilizando o maior rendimento energético possível, são chamados de mecanismos de dois eixos. Sistemas de apenas um eixo, proporcionando somente o acompanhamento diário do sol, também são opções que podem demonstrar um bom custo/benefício, visto que sua construção é simplificada se comparado ao um sistema de dois eixos. Porém não promove a máxima eficiência elétrica dos painéis (FERDAUS et al., 2014).

Outra característica dos rastreadores solares se dá em função da sua tecnologia de acionamento. Rastreadores passivos e ativos são as duas opções mais utilizadas para essa finalidade (OLIVEIRA, 2007).

Na tecnologia passiva, há a transferência de massa de um lado do rastreador para outro, efetuando a rotação. Utiliza-se normalmente um fluido refrigerante com baixa temperatura de vaporização, confinado em reservatórios em lados opostos do mecanismo, que devido à diferença nas temperaturas nos extremos Leste-Oeste dos painéis, faz com que o líquido se mova do reservatório mais aquecido para o outro. O sistema passivo é limitado às aplicações de apenas um eixo e depende das condições climáticas, como a temperatura, para seu funcionamento. Também possui resposta lenta, o que diminui sua precisão (POULEK; LIBRA, 1998 apud OLIVEIRA, 2007).

O rastreador ativo implica no uso de motores elétricos, sensores e circuitos eletrônicos que efetuam a rotação do sistema. Utilizam-se sensores que comparam as diferenças na luminosidade em diferentes pontos do mecanismo, ativando os motores para a realização do giro em busca da maior irradiação solar (OLIVEIRA, 2007). Outra possibilidade é a integração com uma lógica de programação no qual o giro é temporizado, efetuando a rotação do sistema a uma taxa fixa, economizando em gastos com energia. O mecanismo ativo é mais preciso, porém mais complexo e conseqüentemente mais caro (FERDAUS et al., 2014).

A estrutura mecânica é outro ponto a ser analisado e caracteriza parte do objetivo deste trabalho. Garantir a rigidez e confiabilidade do sistema, viabilizar a movimentação dos painéis, selecionar os materiais de acordo com a exigência do sistema e deixá-lo preparado para o tipo de acionamento a ser escolhido posteriormente são alguns dos atributos a serem seguidos.

2.2.2 Rastreadores solares e sua eficiência energética

A busca por soluções de rastreamento para energia solar fotovoltaica é cada vez mais constante dentro das universidades, com estudos como o de Araujo (2015) e Trevelin (2014). Por outro lado, ainda é difícil encontrar modelos a nível comercial no Brasil. O desafio no mercado brasileiro é obter um produto de baixo custo e ao mesmo tempo confiável e eficiente, somado com a necessidade de uma alteração de mentalidade, de benefícios a longo prazo. Estudantes, técnicos e engenheiros buscam novas configurações destes mecanismos, apresentando resultados positivos em relação ao ganho com energia elétrica.

Para uma contextualização mais ampla, foi realizada uma busca no pesquisador da Google pelos termos “*Solar Tracker*” e “Rastreador Solar”. Foram retornados diferentes resultados de empresas, principalmente internacionais, que manufacturam seus sistemas de rastreamento do sol, utilizando painéis fotovoltaicos como fonte de captação de energia elétrica. Há companhias que fornecem atuadores lineares elétricos para efetuar a rotação do sistema em relação à altura do sol, como a Linak ® (2017) e a Array Technologies ® (2017). Já as empresas H-Fang ® (2017) da China e a americana Nextracker ® fazem uso de

engrenagens de rotação para efetuar a mesma função. As Figuras 9 e 10 exemplificam esses dois princípios de sistemas, ambos utilizando energia elétrica gerada pelos próprios painéis fotovoltaicos para seu acionamento e, conforme informações das próprias companhias, garantindo um ganho de 30 a 40% em eficiência energética do sistema.

Logicamente, outras informações devem estar disponíveis na internet, mas o objetivo aqui, com essa pesquisa bastante superficial, foi apenas mostrar os princípios mais utilizados no momento.

Figura 9 – Rastreador solar operado por atuador linear



Fonte: Array Technologies (2017)

Figura 10 – Rastreador solar operado por engrenagens de rotação

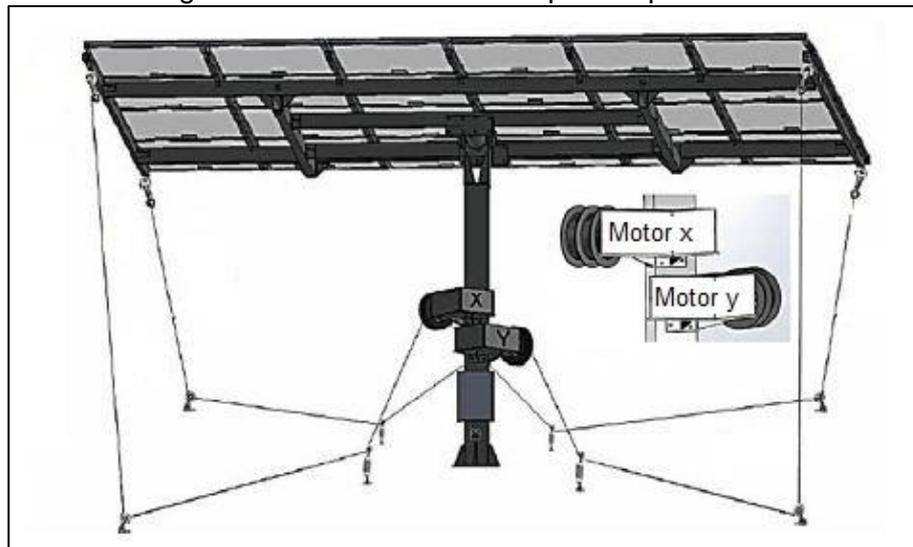


Fonte: Nextracker (2017)

Trazendo a atenção para artigos desenvolvidos na área, no estudo de Lo et al. (2015) foi desenvolvido um rastreador comercial de dois eixos, operado por cabos presos nas quatro

extremidades do suporte dos painéis, ligados a motores elétricos e movidos através de um algoritmo computacional, conforme demonstrado na Figura 11. Os cabos de aço auxiliam na estabilidade da estrutura em relação à força dos ventos, suportando uma velocidade de até 220 km/h. O mecanismo permite a total rotação azimute do sistema (360°) e inclinação de altitude de -40° a 40°, sendo 0° a posição horizontal dos painéis. Em 12 meses de operação, os resultados obtidos foram comparados a um sistema fixo e o ganho médio em energia elétrica foi de 30,1%.

Figura 11 - Rastreador solar operado por cabos

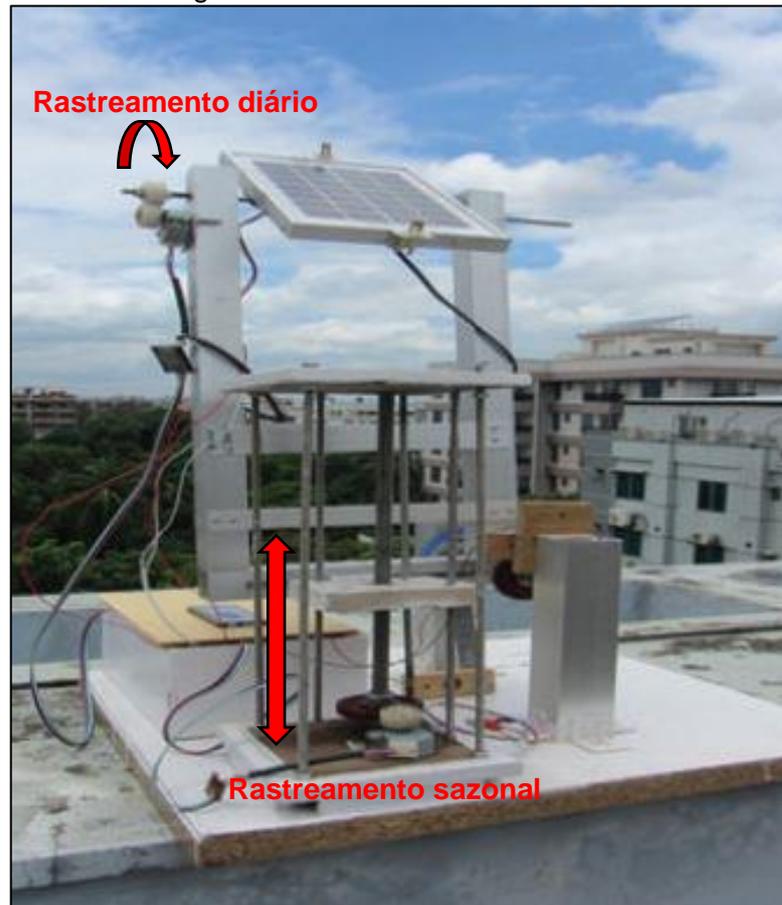


Fonte: adaptado de Lo et al. (2015)

Oliveira (2007) elaborou o estudo de um seguidor solar de um eixo, almejando o baixo custo e eliminando a necessidade de baterias, na qual os módulos eletrônicos recebiam energia elétrica gerada pelas próprias placas solares. Desconsiderando os painéis, a estrutura mecânica do sistema foi o que mais implicou financeiramente na solução, equivalendo a mais de 90% no custo do rastreador. Em contraponto, o máximo benefício energético observado atingiu valores 31% maiores quando comparados a um sistema fixo.

Ferdaus et al. (2014) comparou os resultados de um rastreador solar híbrido de dois eixos com outro solar contínuo, também de dois eixos, e com um sistema fixo. A diferença entre o híbrido e o contínuo se deu na economia com energia elétrica para o acionamento dos motores. No primeiro, o motor responsável pelo rastreamento da posição anual do sol operava apenas uma vez por mês; no contínuo, os dois motores operavam constantemente. O sistema híbrido apresentou gasto com energia elétrica na faixa de 44% menor que o contínuo, enquanto a eficiência energética foi similar, em torno de 4% menor do que um rastreador contínuo. Em relação ao sistema fixo, houve um aumento médio de aproximadamente 25% na geração de eletricidade. A Figura 12 demonstra o protótipo do rastreador solar híbrido desenvolvido pelos pesquisadores.

Figura 12 - Rastreador solar híbrido



Fonte: adaptado de Ferdaus et al. (2014)

Além dos modelos apresentados acima, é possível encontrar também mecanismos artesanais ou em fase de desenvolvimento, em *websites* como o *Youtube*, blogs pessoais e sites de notícias. Em um vídeo da *Incubator Warehouse* (2012), a rotação azimutal de um pequeno sistema de placas fotovoltaicas é efetuada por uma polia anexada a um motor elétrico, a qual gira a base da estrutura em busca da maior radiação solar. Em 2014, o programa de televisão *Jornal Nacional* demonstrou um modelo de rastreador desenvolvido por um pesquisador do Ceará, onde, aparentemente, utilizava os conceitos de rotação por cabos e engrenagens em conjunto, em uma estrutura mecânica robusta. Este mecanismo estava sendo patenteado na época da reportagem (*JORNAL NACIONAL*, 2014).

Há também mecanismos mais sofisticados disponíveis no mercado, como o rastreador da empresa *Smartflower Pacific*® (2017), que além do rastreador solar, fornece as placas fotovoltaicas, baterias, inversores e controladores embutidos no seu sistema, apresentando design inovador, portabilidade e autonomia, como pode ser observado na Figura 13. A empresa, localizada no Hawaii, promete um ganho em eficiência de 40% no uso de seu mecanismo em comparação a sistemas fixos de captação de energia solar, que abre os painéis em forma de 'leque', orientando-os através da combinação de componentes eletromecânicos, como engrenagens e sensores.

Figura 13 – Rastreador Smartflower



Fonte: Smartflower Pacific (2017)

Em todas as pesquisas realizadas, foi observado que o foco da maioria dos mecanismos era o método de acionamento para a rotação da estrutura ou, em outras palavras, a parte elétrica e de automação do sistema. A estrutura mecânica foi pouco aprofundada, com destaque aos diferentes métodos utilizados para realizar o giro das placas, como engrenagens, conjuntos pinhão/cremalheira, cabos, atuadores lineares, polias, etc. Com base nestas informações, nota-se a possibilidade de melhorias nas estruturas mecânicas dos rastreadores solares, com a finalidade de buscar redução no custo de fabricação destes sistemas, sem afetar sua eficácia e viabilizando sua ampliação na utilização em escala comercial.

2.3 REQUISITOS TÉCNICOS PARA ENERGIA E CAPTAÇÃO SOLAR

2.3.1 Mapeamento solar

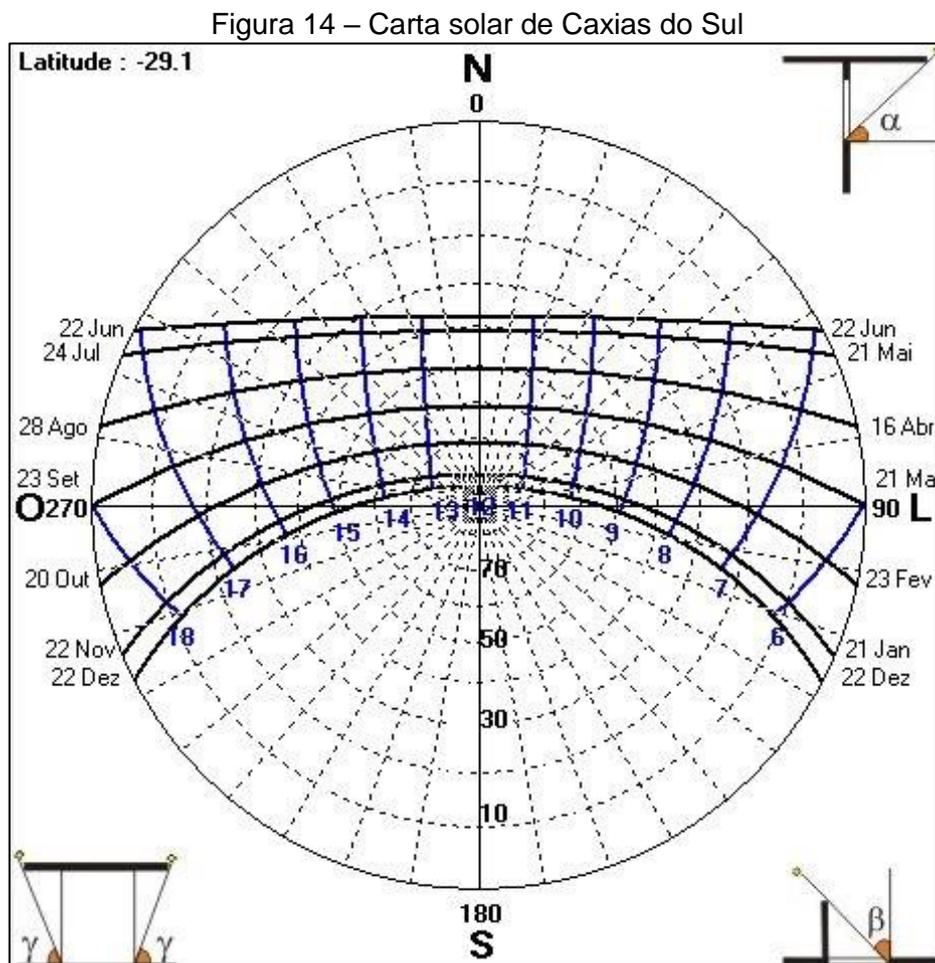
Com o propósito de potencializar a captação de energia solar ao longo do ano, a orientação e a inclinação dos painéis fotovoltaicos devem ser observados. Para mecanismos fixos, há recomendações pré-estabelecidas em relação a estes dois parâmetros, na qual os painéis devem ser orientados em direção à linha do Equador com inclinação igual à latitude do local, admitindo-se uma tolerância de 10° para mais ou para menos, sem que isso interfira consideravelmente na eficiência do sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

Para o conceito e desenvolvimento de rastreadores solares, a orientação e inclinação dos painéis são variáveis, fazendo-se necessário conhecer o movimento solar para

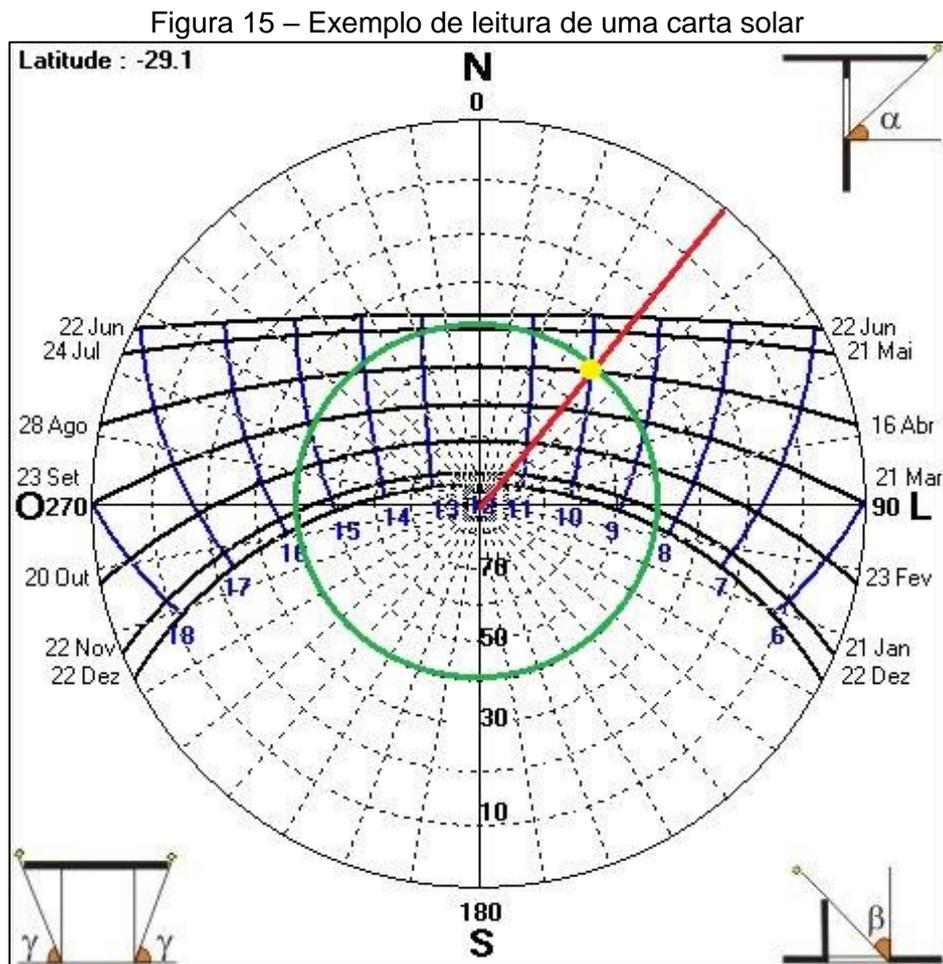
determinada região ou latitude, identificando a altura e azimute do sol durante todos os períodos do ano. Desta maneira é possível projetar um mecanismo de giro que obedeça os ângulos a serem atingidos em função da busca pela maior radiação solar em determinada região.

Uma maneira de se obter esses dados é através de cartas solares. Esta ferramenta reúne as informações de azimute e altura solar de um local estipulado. Sua leitura é associada a transferidores de ângulos e possui três parâmetros principais: o anel externo, representando os ângulos em relação ao Norte (azimute), de 0 a 360 graus; os círculos internos, que indicam a inclinação dos raios solares, de 0 a 90 graus, onde 90° representa quando o sol está na sua maior altura; e a malha, representada pelas linhas pretas e azuis no interior do círculo, variável de acordo com a latitude da região, que define os ângulos de acordo com a data e hora desejadas.

O programa Analisis SOL-AR, desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) permite obter essas informações de acordo com a região, através da indicação da sua latitude. A Figura 14 demonstra os resultados para a cidade de Caxias do Sul – RS, considerando uma latitude de 29°10'S (OLIVEIRA et al., 2013).



Para determinar os ângulos de azimute e altura para data e hora definidas, utilizam-se as linhas retas pontilhadas, associadas à leitura do azimute solar; e os círculos pontilhados, relativos à altura do sol. A Figura 15 ilustra um exemplo de leitura, para o dia 16 de abril, às 10 horas da manhã, tem-se um azimute de 40° e uma altura solar equivalente a 40° em relação ao solo.



Fonte: autor (2016)

Analisando a imagem acima, percebe-se que para a cidade de Caxias do Sul, o azimute tem variações máximas de $\pm 120^\circ$ em relação ao Norte. Se for considerado apenas os horários onde há maior irradiação solar, entre as 9 horas e 15 horas, a variação cai para $\pm 90^\circ$, com altura solar variando entre aproximadamente 20° e 85° .

2.3.2 Diretrizes de construção civil

Pinho e Galdino (2014) citam as normas técnicas brasileiras a serem consideradas no projeto, instalação e utilização de sistemas fotovoltaicos. Quanto aos mecanismos estruturais dos painéis, destaca-se a NBR 5419, que determina condições de projeto, instalação e

manutenção de sistemas de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, protegendo edificações e estruturas contra a incidência direta de raios.

Além desta, a NBR 6123 – Forças devidas aos ventos em edificações também pode ser analisada, visto que as estruturas fotovoltaicas são comumente instaladas no topo de casas e edifícios, sofrendo forças devido à ação estática e dinâmica dos ventos. Em Caxias do Sul, a velocidade do vento médio anual pode chegar a aproximadamente 30 km/h a 100 metros de altura em situações normais (AMARANTE; SILVA, 2002). Em cenários extremos, curtas rajadas de vento de até cerca de 160 km/h a 50 metros de altura foram calculadas na região da serra gaúcha, com recorrência de 50 anos (AMARANTE; SILVA, 2002). O mesmo pode ser ratificado no Anexo B, que demonstra as isopletas da velocidade básica dos ventos em todo o Brasil, onde Caxias do Sul se encontra na região de 45 m/s (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

Para determinar a força devido à ação dos ventos, primeiro aplica-se a Equação 1 para encontrar a velocidade característica do vento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

V_k é a velocidade característica do vento [m/s];

V_0 é a velocidade básica do vento [m/s], determinada através das isopletas, de acordo com a localização;

S_1 é o fator topográfico;

S_2 é relativo à rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 é o fator estatístico, que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura.

De acordo com a NBR 6123, V_0 pode soprar de qualquer direção horizontal. Após encontrar V_k , determina-se a pressão dinâmica através da Equação 2:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (\text{eq.2})$$

Onde:

q corresponde à pressão dinâmica do vento [N/m²]

Por fim, para obter a força da ação dos ventos, aplica-se a Equação 3:

$$F_v = q \times A_s \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

F_v é a força exercida pelos ventos [N]

A_s é a área da superfície de contato com o vetor horizontal do vento [m²]

A construção da estrutura mecânica do rastreador solar deve atender estas normas a fim de garantir a segurança de sua operação. Portanto, além de garantir aumento na eficiência elétrica, o mecanismo deve ser confiável e resistente às condições climáticas.

2.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Através das informações levantadas, a energia solar mostrou-se como uma possível solução contra os prejuízos causados com a geração de energia por meio de combustíveis fósseis. Os benefícios no uso de energia fotovoltaica se sobressaem às desvantagens, mostrando resultados positivos se o sistema for bem planejado e executado. O uso de um mecanismo de giro que acompanhe a maior incidência de radiação solar aumenta a eficiência dos painéis fotovoltaicos na geração de energia elétrica, gerando economia com custos relacionados à energia da rede pública e criando uma mentalidade sustentável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando seguir a tendência de desenvolvimento sustentável, este trabalho teve como principal propósito efetuar o estudo conceitual de um sistema de giro mecânico para os painéis fotovoltaicos da UCS, criando a possibilidade de atingir um maior aproveitamento da energia solar, gerando, conseqüentemente, mais energia elétrica para a Instituição de Ensino.

Observou-se no capítulo anterior a abrangente disponibilidade solar do Brasil. Um dos limitantes cruciais que restringe o crescimento no uso de sistemas que efetuam a captação de energia solar é o custo de implementação do sistema e o tempo de retorno do investimento, considerados elevados principalmente no mercado brasileiro.

Com o objetivo de reduzir este tempo de retorno através do aumento da eficiência dos sistemas de captação de energia solar, o presente estudo propôs um mecanismo de giro mecânico para 2 painéis fotovoltaicos da UCS. Este mecanismo possibilitará a transformação do sistema em um possível rastreador solar.

3.1 CENÁRIO ATUAL

Atualmente, a UCS não usufrui de fontes renováveis para geração de energia elétrica para a própria Instituição. Portanto, é de interesse da Universidade criar ambientes experimentais onde a captação de energia possa ser testada e entendida por pesquisadores e alunos dos cursos do CCET. Desta forma, existe um interesse da instituição de ensino em criar um sistema de captação de energia solar a ser instalado no CCET, incentivando pesquisas e estudos na área de desenvolvimento sustentável.

Para dar início a este trabalho, foram utilizadas como objetos de estudo e fonte de captação de energia solar 2 placas fotovoltaicas disponibilizadas pela UCS, do total de 4 painéis disponíveis, da marca BP Solar, modelo BP3230T, com dimensões unitárias de 1667 x 1000 x 50 (mm), peso de 19,4 kg e potência máxima gerada de 230 W cada uma. As placas encontram-se nos laboratórios do bloco D da instituição de ensino.

A problemática consistiu em elaborar um mecanismo de giro para estas placas que possua duas características primordiais: possibilitar o giro do sistema em dois eixos e considerar as diferentes condições climáticas da região, a fim de possuir dados para o projeto de uma estrutura confiável e resistente.

A rotação do mecanismo foi estudada de forma que os painéis possam acompanhar tanto a altura quanto o azimute solar, deixando-os perpendiculares com a maior incidência de radiação solar. Em relação às condições climáticas para o estudo da estrutura mecânica, as forças dos ventos que ocorrem em Caxias do Sul foram levadas em conta para cálculos posteriores de projeto.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

Com base nas análises dos trabalhos que buscaram uma solução de rastreamento para painéis fotovoltaicos descritos no capítulo anterior na seção 2.2.2, observou-se a possibilidade de melhorias na estrutura e acionamento mecânico dos rastreadores, principalmente em relação ao custo de fabricação deste sistema. Este estudo explorou diferentes alternativas de giro para os painéis fotovoltaicos, estudando os aspectos técnicos destes sistemas. Para atingir os objetivos deste estudo com confiabilidade, o trabalho seguiu a seguinte sequência de atividades:

- a) definir critérios de avaliação para os sistemas de rastreamento solar existentes, de acordo com os objetivos deste estudo;
- b) estudar os mecanismos existentes aplicando os critérios de avaliação pré-estabelecidos, a fim de comparar as características fundamentais para esta proposta;
- c) obter as especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos da UCS, englobando todas as características necessárias para a o planejamento do mecanismo de giro;
- d) propor o sistema de giro do mecanismo sem perder a confiabilidade e rigidez da estrutura, considerando a compatibilidade com o tipo de acionamento a ser escolhido posteriormente, que não foi tratado neste estudo;
- e) elaborar a modelagem 3D do projeto conceitual através do software SolidWorks;

Os critérios de avaliação para os sistemas de rastreamento solar foram definidos em função das características necessárias para o bom funcionamento de todo o mecanismo. Os sistemas avaliados foram os modelos apresentados na seção 2.2.2, com a finalidade de entender suas diferenças construtivas e a possibilidade de adaptação ao modelo de painel fotovoltaico da UCS. Para isso, os seguintes pontos foram analisados:

- a) princípio de giro do mecanismo;
- b) quantidade de componentes do mecanismo de giro e materiais utilizados;
- c) forma de acionamento do mecanismo;
- d) resistência do mecanismo em relação à força dos ventos;
- e) alcance angular do mecanismo nos dois eixos (altura e azimute solar);
- f) complexidade da manutenção do sistema;

Para a obtenção dos dados técnicos das placas fotovoltaicas, foram consultadas as especificações técnicas do modelo, disponibilizadas na internet. As placas foram medidas e pesadas e os dados comparados com as informações das especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

O desenvolvimento da estrutura de fixação dos painéis e do sistema de giro do mecanismo levou em consideração os dados obtidos nos processos de avaliação executados

anteriormente. A proposta para o mecanismo deste trabalho seguiu as diretrizes da melhor configuração observada para o modelo de painel fotovoltaico da UCS.

3.3 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Percebeu-se na seção 2.2.2 deste estudo a variedade de mecanismos existentes ou em fase de desenvolvimento que podem ser utilizados para efetuar o giro de painéis fotovoltaicos, transformando o sistema em um rastreador solar. Conforme o objetivo deste trabalho e os critérios de avaliação estabelecidos na proposta, optou-se por selecionar 3 modelos para análise e, com base nos resultados, identificar a melhor configuração para o modelo de painel fotovoltaico da UCS.

Os mecanismos selecionados são os modelos estudados por Lo et. al (2015), classificado como rastreador “A”; Ferdous et. al (2014), modelo da esquerda, apontado como rastreador “B”; e o sistema que utiliza o produto da empresa Array Technologies® (2017), identificado como rastreador “C”. Os rastreadores estão representados na Figura 16.

Figura 16 – Rastreadores solares selecionados para análise



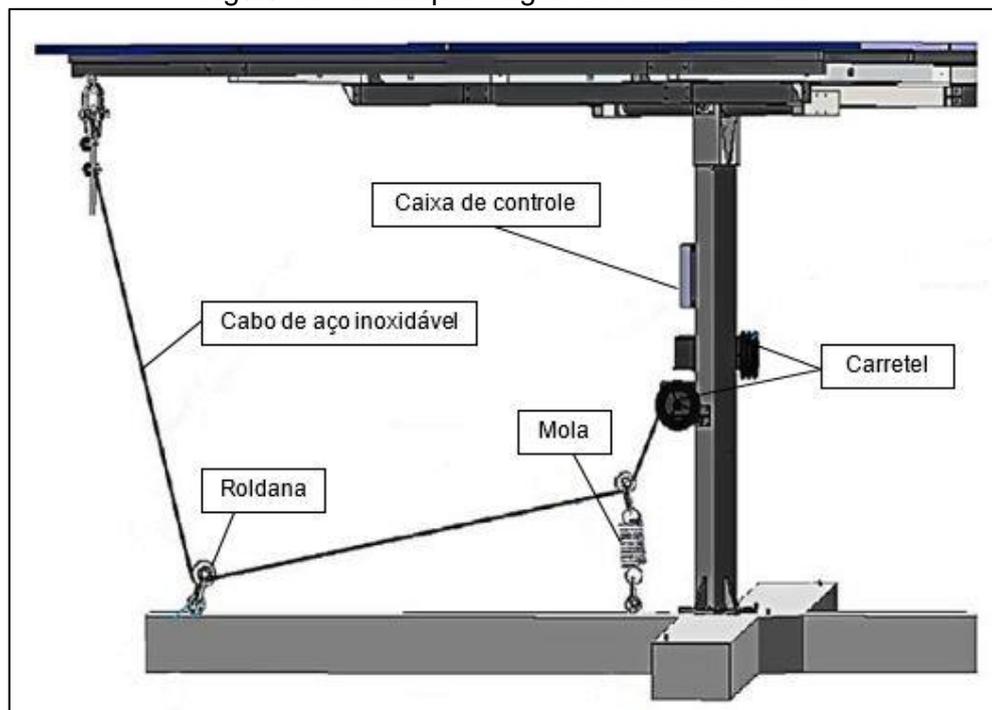
Fonte: autor (2017)

3.3.1 Princípio de giro do mecanismo

Entende-se como princípio de giro o método ou sistema utilizado para realizar a rotação das placas fotovoltaicas. Os rastreadores acima foram selecionados principalmente por sua diferenciação neste quesito, que é um dos fatores que irá implicar diretamente na construção mecânica do mecanismo deste trabalho.

O rastreador “A” utiliza 2 cabos de aço inoxidável, presos diagonalmente nos cantos da estrutura que sustenta as placas, movimentando-as através do giro dos carretéis localizados no poste de sustentação da estrutura. Os cabos também estão fixados ao solo, com a adição de molas e polias, o que ajuda a dar estabilidade e rigidez ao mecanismo. As molas ainda auxiliam no alívio de tensões nos cabos de aço, na ocorrência de ventos fortes. Na conexão do poste com a estrutura das placas há uma junta universal, permitindo a rotação dos painéis fotovoltaicos nos dois eixos, altura e azimute. A Figura 17 ilustra no detalhe estes componentes.

Figura 17 – Princípio de giro do Rastreador “A”

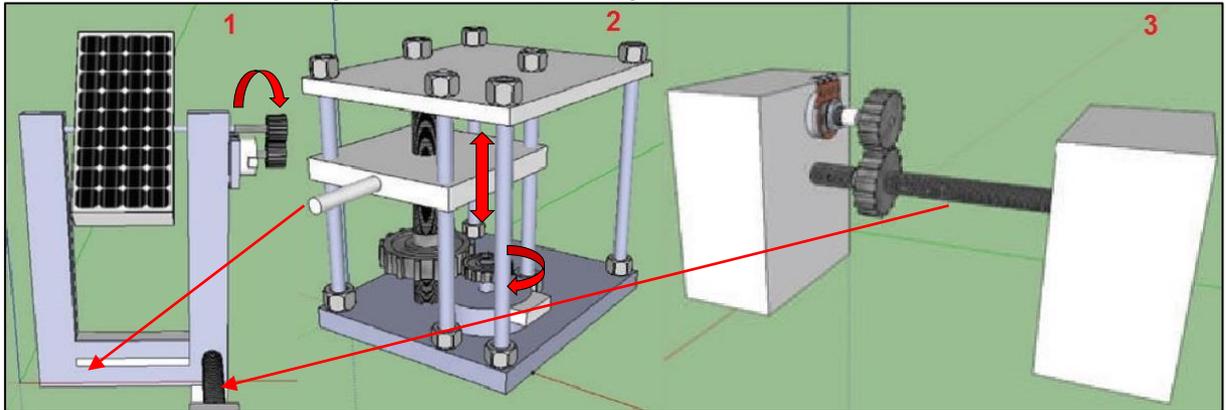


Fonte: adaptado de Lo et al. (2015)

O rastreador “B” possui três pares de engrenagens para desempenhar o giro do sistema. O primeiro rotaciona uma haste que sustenta a placa fotovoltaica no seu ponto médio, fazendo com que o painel acompanhe a altura solar durante o dia. O segundo conjunto é responsável pelo rastreamento sazonal, que transforma o movimento circular das engrenagens em movimento linear vertical. Uma haste circular, conectada à extremidade inferior esquerda da estrutura onde a placa está instalada, movimenta o canto da estrutura

para cima e para baixo, inclinando-a e alterando seu ângulo azimutal. O terceiro par de engrenagens permite esta última rotação, instalado na base da estrutura da placa, na lateral direita. A modelagem do protótipo pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Princípio de giro do Rastreador “B”



Fonte: adaptado de Ferdous et al. (2014)

Por último, o rastreador “C”. Este utiliza dois componentes que funcionam simultaneamente para seguir o movimento diário do sol: um atuador linear elétrico, encarregado por elevar ou baixar os painéis fotovoltaicos; e uma engrenagem de rolamento de giro com eixo sem fim, que rotaciona a estrutura dos painéis buscando o azimute solar. Ambos os componentes podem ser identificados na Figura 19.

Figura 19 – Princípio de giro do Rastreador “C”



Fonte: adaptado de Array Technologies (2017)

3.3.2 Componentes mecânicos dos rastreadores

Nesta etapa, foram destacados demais componentes mecânicos que fazem parte do sistema de giro de cada mecanismo. Os artigos e catálogos disponibilizados para cada rastreador foram utilizados para essa observação analítica, auxiliando na identificação destes componentes, demonstrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Componentes mecânicos dos rastreadores

	Princípio de giro		Estrutura de sustentação dos painéis	
	Componente	Quantidade	Componente	Quantidade
Rastreador "A"	Cabo de aço inoxidável	2	Poste retangular	1
	Carretel de cabo	2	Perfil de sustentação	12
	Mola	4	Junta universal	1
	Polia	4		
	Parafuso de ancoragem	4		
	Rolamento de esferas	2		
Rastreador "B"	Engrenagem cilíndrica de dentes retos	6	Poste retangular	2
	Fuso roscado	1	Chapa de reforço estrutural	4
	Haste circular	9	Quadro de fixação	1
	Quadro de madeira	3		
	Rolamento	2		
Rastreador "C"	Engrenagem de rolamento de giro com eixo sem fim	1	Poste circular	1
	Atuador linear elétrico	1	Perfil de sustentação	9
	Peça estrutural de alumínio	6		

Fonte: autor (2017)

É válido ressaltar que os rastreadores "A" e "C" são de maior porte se comparados ao rastreador "B", que foi projetado para movimentar um único módulo fotovoltaico, com dimensões de 0,165 m de comprimento por 0,23 m de largura. O rastreador "A" suporta 24 módulos, com dimensão total de 6,6 x 6,2 m; O rastreador "C" pode ser utilizado para movimentar até 12 placas de 60 células fotovoltaicas, padrão utilizado pelo fabricante, com dimensão aproximada de 5,0 x 4,25 m.

Relacionado à estrutura de fixação e sustentação dos painéis fotovoltaicos, diferentes materiais foram utilizados na construção do quadro e dos suportes. O rastreador "A" optou por aço galvanizado com revestimento de zinco. O rastreador "B" utilizou alumínio, por se tratar de um protótipo em menor escala, exigindo menor resistência mecânica da estrutura. O rastreador "C" possui aço de alta resistência revestido a pó e alumínio anodizado em seus componentes estruturais.

3.3.3 Forma de acionamento do mecanismo

Esta característica é praticamente unânime em todos os rastreadores pesquisados: o acionamento e a operação dos mecanismos é realizado através de motores elétricos. Visto

que este estudo engloba sistemas que giram em dois eixos, por vezes dois motores são utilizados, como nos rastreadores “A” e “B”. A incógnita se dá em função do método de controle do acionamento, o qual pode ser escolhido de acordo com a exigência ou até mesmo preferência do consumidor. Sensores de luz, instalados nas extremidades das placas, podem comparar a diferença de luminosidade entre si, mandando um sinal a controladores eletrônicos que comandam o giro dos motores, alterando o ângulo de posicionamento das placas. Outra maneira é criar um algoritmo específico para o sistema, colocando as coordenadas do sol durante o ano inteiro para o local de instalação do rastreador em controladores computadorizados, fazendo com que o mecanismo tenha todos os ângulos de rotação programados. Este último método pode não ser tão eficiente, uma vez que em dias com mais nuvens os raios solares podem acabar ficando difusos, de maneira que nem sempre a posição mais adequada dos painéis solares seja a perpendicular com o sol.

O rastreador “C” possui dois componentes elétricos distintos. Um motor elétrico efetua o giro da engrenagem de rolamento com eixo sem fim, rastreando o azimute solar; e um atuador linear elétrico, que controla o ângulo de altura dos painéis, recebe o sinal da caixa de controle e opera independentemente, ajustando a extensão da haste conforme a solicitação do sistema.

Na maioria dos casos, a energia elétrica para acionar estes componentes provém das próprias placas fotovoltaicas do rastreador. Portanto é importante considerar itens para a construção do mecanismo que consumam a menor quantidade de energia elétrica possível, fazendo com que a sobra de eletricidade gerada pelo sistema ainda seja vantajosa para o consumidor.

3.3.4 Resistência à força dos ventos

Além de suportar o peso dos painéis fotovoltaicos, o mecanismo precisa garantir resistência à força dos ventos, visto que a instalação da estrutura é realizada em espaços abertos ou no topo de edifícios. O rastreador deve possuir rigidez suficiente para que não seja danificado pelas condições climáticas. O Quadro 2 traz essas informações para os rastreadores selecionados.

Quadro 2 - Resistência dos rastreadores à força dos ventos

Mecanismo	Resistência aos ventos
Rastreador "A"	Em modo de operação: ventos até 120 km/h
	Em posição de repouso (painéis a 90°): ventos até 220 km/h
Rastreador "B"	não há informação
Rastreador "C"	ventos até 140 km/h

Fonte: autor (2017)

3.3.5 Alcance angular do mecanismo nos dois eixos

Os ângulos atingidos em relação ao azimute e à altura do sol variam de acordo com a configuração e construção do rastreador. Este pode ser projetado especialmente à uma localização, tendo as cartas solares como diretrizes, ou compreender o deslocamento solar de um modo global, não importando o local de instalação do mecanismo. No Quadro 3 encontra-se a faixa de rastreamento dos 3 modelos escolhidos para esta análise.

Quadro 3 - Faixa de rastreamento

Mecanismo	Faixa de Rastreamento	
	Leste-Oeste	Norte-Sul
Rastreador "A"	$\pm 180^\circ$	$\pm 40^\circ$
Rastreador "B"	$\pm 180^\circ$	50°
Rastreador "C"	$\pm 120^\circ$	5° a 60°

Fonte: autor (2017)

Percebe-se que os Rastreadores "A" e "B" permitem o giro completo das placas em relação ao movimento diário do sol, com diferenças no movimento do mecanismo em relação à altura.

3.3.6 Complexidade da manutenção do sistema

Além da limpeza regular dos painéis fotovoltaicos e inspeções relacionadas à instalação elétrica do sistema, é necessário considerar a manutenção relacionada ao rastreador. Dependendo da configuração do mecanismo, alguns componentes mecânicos podem necessitar de manutenção preventiva, a fim de garantir seu perfeito funcionamento.

O Rastreador "A" possui rolamentos de esferas, que exigem lubrificação periódica, da mesma maneira que a engrenagem sem fim do Rastreador "C". As engrenagens do Rastreador "B" precisam estar protegidas para evitar que sujeiras ou outros objetos danifiquem ou impeçam o seu movimento. Por estarem expostos ao ambiente, pontos de oxidação em toda a estrutura devem ser observados e corrigidos, para não comprometer a resistência e a segurança de operação do rastreador.

3.3.7 Análise geral

O objetivo deste tópico foi analisar os rastreadores selecionados conforme suas características, expostas através dos critérios de avaliação estipulados. É comprovado, por meio dos estudos realizados para cada mecanismo, que há um significativo aumento na

eficiência na captação de energia solar, independentemente do sistema utilizado para rastrear o sol.

O Rastreador “A”, operado por cabos, mostrou-se como uma solução eficaz e barata, devido à simplicidade na construção do rastreador. Dentre os mecanismos estudados, é o que apresenta maior resistência à força dos ventos em estado de repouso. Os motores giram os carretéis dos cabos de aço, porém não há informação se estão diretamente conectados ou se há alguma relação de transmissão.

O ponto alto do Rastreador “B” se deu em função da economia de energia elétrica, uma vez que apenas um motor funciona diariamente e o outro apenas uma vez por mês. Consequentemente, o aumento de eficiência na captação energética foi menor, se comparado aos demais. A estrutura do mecanismo é volumosa e a montagem é constituída por muitos componentes, o que aumenta o tempo de instalação e cuidados com manutenção.

O Rastreador “C” constitui de um modelo comercial muito encontrado no mercado internacional. Muitos fabricantes de rastreadores solares utilizam deste sistema, composto por uma engrenagem com eixo sem fim (*slew drive*) e um atuador elétrico. Montagem facilitada devido à utilização de poucos componentes, segurança na operação e precisão no posicionamento são os fatores positivos. O custo é maior, se comparado aos outros, principalmente em razão dos elementos acima serem de maior complexidade e manufaturados por empresas terceirizadas.

Em suma, pode-se afirmar que a construção mecânica do rastreador solar deve considerar três requisitos importantes, que variam de acordo com a quantidade de painéis fotovoltaicos e local de instalação:

- a) faixa de rastreamento angular;
- b) resistência mecânica ao peso dos painéis fotovoltaicos;
- c) resistência mecânica à força dos ventos.

Foi observado também que, para obedecer estes critérios, existem algumas formas de realizar a rotação dos painéis fotovoltaicos. De acordo com o propósito deste trabalho, um sistema foi proposto especialmente ao modelo de painel fotovoltaico da UCS, levando em consideração os levantamentos obtidos nesta análise.

3.4 REQUISITOS TÉCNICOS DE PROJETO PARA O MODELO DE PAINEL DA UCS

Por meio do tópico 4.2 pode-se analisar as peculiaridades de cada rastreador, demonstrando que é possível atingir resultados semelhantes com diferentes configurações construtivas. Nesta seção, foram especificados para o modelo de painel fotovoltaico da UCS e os três requisitos técnicos destacados no tópico 4.2.7.

3.4.1 Força dos ventos para Caxias do Sul

Nesta seção, as equações 1, 2 e 3 foram aplicadas em função dos valores correspondentes à configuração dos painéis fotovoltaicos da UCS e de informações relacionadas à cidade de Caxias do Sul. Para a resolução da Equação 1, será considerado $V_0=45$ m/s, conforme demonstrado no Anexo B. Os coeficientes S_1 , S_2 e S_3 foram definidos de acordo com a situação de aplicação mais severa, fazendo com que o rastreador proposto seja adaptável à diferentes condições e localidades com segurança. Desta forma, seguindo valores expostos na NBR 6123, tem-se:

$S_1 = 1$, relativo à terrenos planos ou fracamente acidentados;

$S_2 = 1,35$, maior valor relacionado à rugosidade do terreno;

$S_3 = 1,10$, considerando o valor mínimo mais alto do fator estatístico.

Assim sendo, temos o cálculo para a velocidade característica do vento para Caxias do Sul:

$$V_k = 45 \times 1 \times 1,35 \times 1,10 = 66,825 \text{ m/s}$$

Utiliza-se V_k para encontrar a pressão dinâmica, através da Equação 2:

$$q = 0,613 \times 66,825^2 = 2737,4 \text{ N/m}^2$$

Por fim, para determinar a força atuante dos ventos sobre a estrutura, considera-se novamente a pior situação, com o posicionamento dos painéis fotovoltaicos a 90° em relação ao solo, de forma que a sua superfície fique perpendicular com o vetor horizontal da força dos ventos. O rastreador deste trabalho compõe-se de 2 painéis fotovoltaicos, porém a Tabela 1 foi criada para termos a dimensão da força dos ventos para a instalação de 1 a 4 painéis, conforme a quantidade disponível para uso na UCS. Para os cálculos de força, a Equação 3 foi aplicada às áreas encontradas, onde o valor para dois painéis fotovoltaicos está destacado.

Tabela 1 – Força dos ventos para 1, 2, 3 e 4 painéis fotovoltaicos

Quantidade de painéis	Área da superfície a 90° [m ²]	Força dos ventos [N]
1	1,667	4563,25
2	3,334	9126,49
3	5,001	13689,74
4	6,668	18252,98

Fonte: autor (2017)

Compilando as informações e contemplando a utilização de dois painéis fotovoltaicos, o mecanismo terá que sustentar o peso de 380,62 N e ainda possuir rigidez suficiente para

resistir à uma força relativa aos ventos de 9126,49 N. No próximo capítulo, a área considerada foi ajustada conforme o posicionamento inicial dos painéis, alterando também a força exercida pelos ventos.

3.4.2 Faixa de rastreamento para Caxias do Sul

Conforme demonstrado na seção 2.3.1 deste trabalho, um dos métodos para se definir a posição solar em determinada região é através do uso de cartas solares, que traz essas informações de acordo com a latitude do local de estudo.

Como Caxias do Sul se encontra na latitude 29,10°S, o sol nunca estará completamente a 90°, mesmo no solstício de verão. Por isso, pode-se considerar que a variação total da altura solar fica entre 0° (nascer do sol) e aproximadamente 85° (meio dia no solstício de verão). Porém, é difícil aproveitar a radiação solar logo após o nascer do sol, devido às interferências do relevo da região, edifícios, e da própria radiação, que ainda é baixa. Para tal, pode-se considerar que o ângulo de altura inicial seja de 20° em relação ao solo, reduzindo a variação para 65°.

Já o azimute, correspondente ao movimento diário do sol, considerando ainda o solstício de verão, possui variações máximas de $\pm 120^\circ$ em relação ao Norte. Para efeito comparativo, no solstício de inverno essa variação cai praticamente pela metade, ficando entre $\pm 65^\circ$. Como premissa, se utilizará os valores máximos de variação para o conceito do rastreador deste trabalho. A Tabela 2 reúne estas informações para melhor entendimento.

Tabela 2 – Faixa de rastreamento para Caxias do Sul

Mecanismo	Faixa de Rastreamento	
	Azimute	Altura
Rastreador UCS	$\pm 120^\circ$	20° a 85°

Fonte: autor (2017)

3.4.3 Painel fotovoltaico da UCS

A UCS dispõe de 4 painéis fotovoltaicos da empresa espanhola BP Solar, modelo BP3230T, com dimensões unitárias de 1667 x 1000 x 50 (mm), peso de 19,4 kg e potência máxima gerada de 230 W. Cada painel possui 60 células policristalinas de silício interligadas em série, padrão mais utilizado comercialmente. O rastreador proposto neste trabalho irá comportar 2 dos 4 painéis fotovoltaicos disponíveis. Tal condição foi estipulada com o propósito de ter a possibilidade de comparar resultados caso os 2 painéis restantes forem instalados fixamente. Suas características mecânicas são demonstradas na Tabela 3, seu dimensional no Anexo C e uma foto real do painel na Figura 20.

Quadro 4 – Características mecânicas do painel fotovoltaico

Características Mecânicas	
Células solares	60 células policristalinas de silício 6" (156 x 156 mm) em série
Proteção frontal	Vidro de alta transmissão de 3,2 mm
Encapsulante	EVA
Proteção traseira	Poliéster branco
Quadro	Alumínio anodizado prata (Universal II)
Diodos	IntegraBus™ com 6 diodos Schottky
Caixa de junção	Potted (IP 67); certificado para satisfazer o teste de inflamabilidade UL 1703
Cabos de saída	Cabo de 4 mm ² com conectores com trava MC4
	Comprimentos de cabo assimétricos: (-) 1250 mm/ (+) 800 mm
Dimensões	1667 x 1000 x 50 mm
Massa	19,4 kg

* Todas tolerâncias dimensionais entre $\pm 0,1\%$, salvo indicação.

Fonte: adaptado de BP Solar (2010)

Figura 20 – Painel fotovoltaico da UCS



Fonte: autor (2017)

Um painel fotovoltaico foi medido e pesado, com o objetivo de comparar os dados com o exposto na ficha técnica disponibilizada pelo fornecedor. O dimensional atendeu as características expostas na Tabela 3. Já a massa do painel não foi obtida com precisão, visto que foi utilizada uma célula de carga segurada manualmente, apresentando oscilações entre 17,5 kg e 18,15 kg. Portanto, para fins de cálculo, será mantido o valor teórico de 19,4 kg.

Considerando então a massa exibida no Quadro 4, obtêm-se o peso de 190,31 N para um painel fotovoltaico. Como o rastreador proposto comportará 2 painéis, o peso do conjunto será de 380,62 N.

4 PROPOSTA DE RASTREADOR SOLAR DA UCS

4.1 CÁLCULO DA FORÇA DOS VENTOS

No capítulo anterior, foi realizado o estudo das características mecânicas dos rastreadores solares selecionados para este estudo. Esta análise serviu como referência para o desenvolvimento da proposta de rastreador solar para a UCS, que será apresentado nesse capítulo. Desta forma, como dados de entrada foram considerados os parâmetros para forças atuantes no sistema, como o peso dos painéis e a força dos ventos. A faixa de rastreamento solar necessária para Caxias do Sul também foi estipulada. A Tabela 3 reúne estas informações.

Tabela 3 – Dados de entrada para a proposta

Dados de Entrada	
Faixa de rastreamento - Azimute	$\pm 120^\circ$
Faixa de rastreamento - Altura	20° a 85°
Peso dos painéis	380,62 N
Força dos ventos	9126,49 N

Fonte: autor (2017)

Para o peso e a força dos ventos, foi considerada a instalação de 2 painéis fotovoltaicos sobre o rastreador. Entretanto, como foi estabelecido que o posicionamento inicial dos painéis seria de 20° (ou 70° em relação ao solo), uma correção no valor da força dos ventos faz-se necessário. Desta maneira, os painéis não estarão completamente perpendiculares com o vetor horizontal da força dos ventos, e a área a ser considerada para o cálculo da força se altera. A Tabela 4 recalcula a força e a Figura 21 ilustra a alteração na altura dos painéis, responsável pela correção.

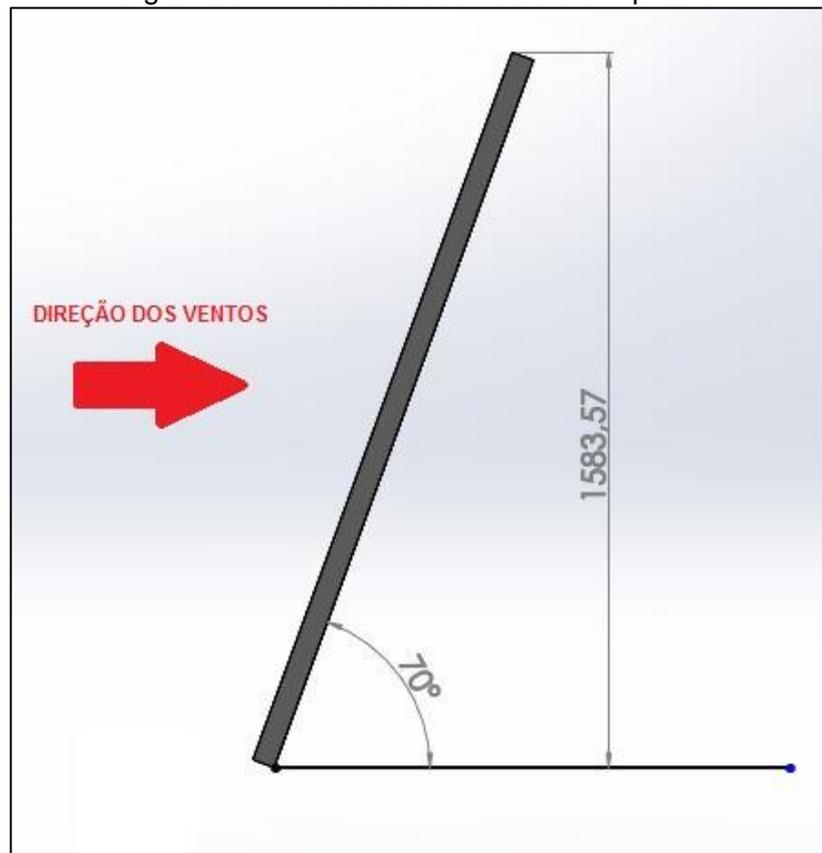
Tabela 4 – Correção da força dos ventos devido à inclinação dos painéis

Correção da força dos ventos	
Área a 90° [m ²]	3,334
Área a 70° (considerada) [m ²]	3,167
Força dos ventos corrigida [N]	8669,73

Fonte: autor (2017)

A força dos ventos diminui conforme a inclinação dos painéis fotovoltaicos aumenta, tornando-se mínima quando eles estão na sua altura máxima, aproximadamente a 85° próximo do meio dia. A nova força dos ventos calculada de aproximadamente 8,7 kN foi ser considerada para o dimensionamento dos componentes do rastreador solar, juntamente com a força exercida pelo peso dos painéis fotovoltaicos, estrutura e demais componentes do rastreador.

Figura 21 – Posicionamento inicial dos painéis



Fonte: autor (2017)

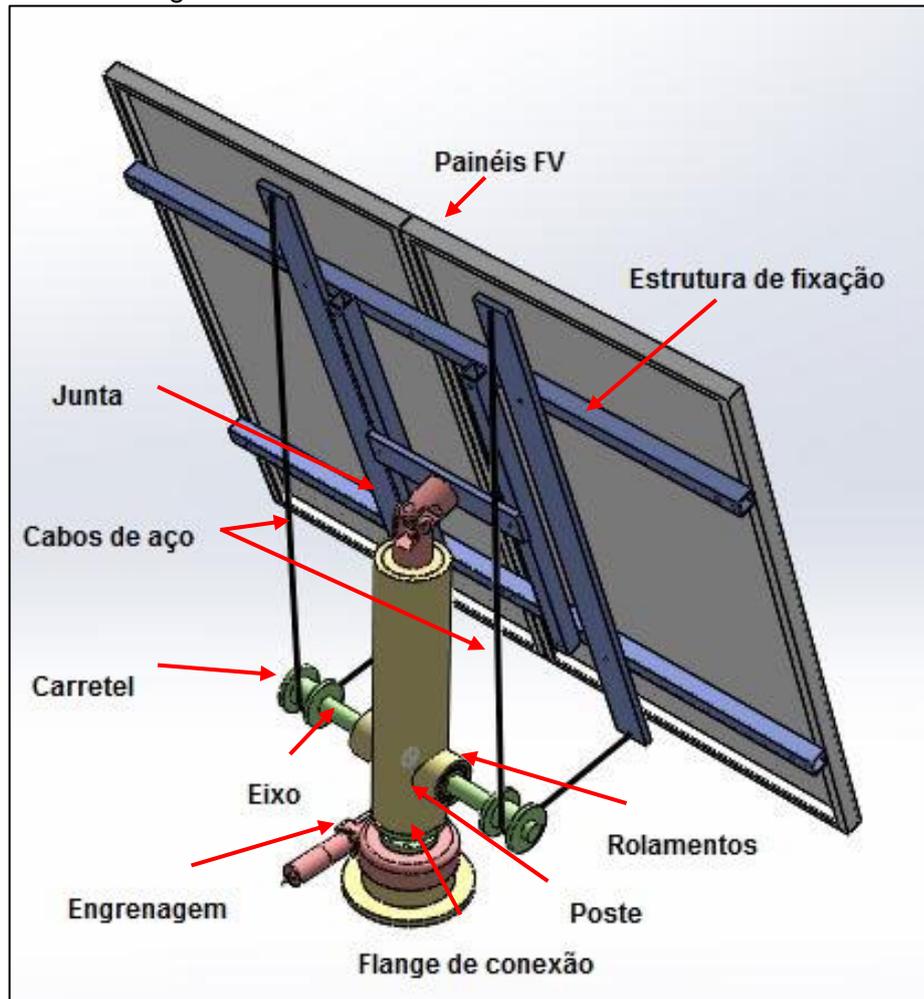
4.2 MODELAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO RASTREADOR SOLAR

Através dos conceitos estudados para o princípio de giro do mecanismo, foram avaliadas possibilidades de implementação aos painéis fotovoltaicos da UCS. O processo de desenvolvimento do rastreador levou em consideração a simplicidade na montagem e manufatura dos componentes, através da utilização de produtos comerciais; e a segurança de operação, em função das forças envolvidas.

4.2.1 Modelamento do conceito do rastreador solar

Primeiramente, um mecanismo que fizesse o ajuste da altura dos painéis por meio de cabos de aço foi proposto. A extensão e o recolhimento dos cabos, presos em carretéis no centro do poste, fariam com que os painéis acompanhassem a variação de altura do sol, em função da junta universal que faz a conexão da estrutura dos painéis com o poste. O acompanhamento do azimute se daria em função de uma engrenagem com eixo sem fim instalada na base do poste, possibilitando a rotação de todo o sistema em 360°. O modelamento parcial encontra-se na Figura 22, que demonstra seus componentes principais.

Figura 22 – Primeiro modelo rastreador solar UCS



Fonte: autor (2017)

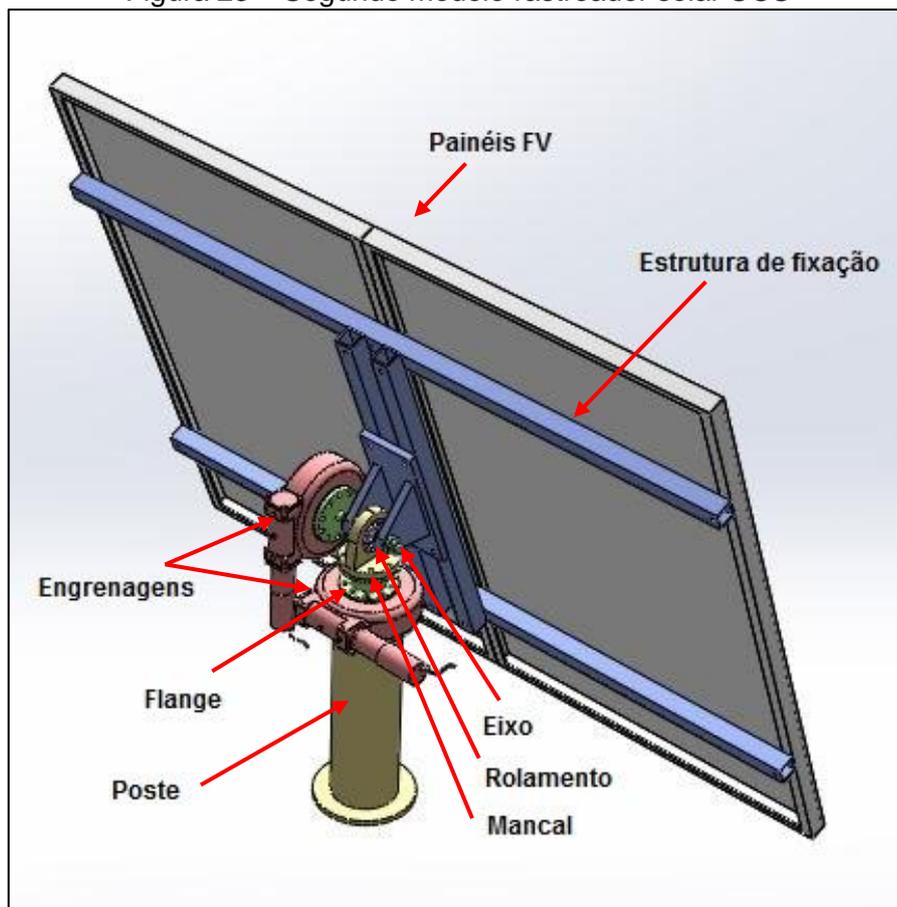
Algumas observações podem ser feitas com relação a essa solução proposta:

- a) a junta universal, que conecta a estrutura dos painéis ao poste, poderia ser substituída por uma junta simples, visto que este componente só deve permitir o movimento dos painéis em uma direção;
- b) os tubos e chapas utilizados para a estrutura de fixação dos painéis seriam produtos com dimensões comerciais, montados com elementos de fixação (parafusos, porcas, arruelas...), facilitando a montagem e instalação do mecanismo no local desejado.
- c) a realização do giro do eixo que interliga os carretéis seria um ponto a ser aprofundado. O motor não poderia estar conectado diretamente em uma das extremidades do eixo, pois a força dos ventos e o peso dos painéis seriam totalmente transferidos ao eixo do motor, o que não é recomendado. Seria então necessário um método de transmissão, seja ele por engrenagens, correia, polia, etc. Tal solução seria possível, porém adicionaria custo e manutenção ao mecanismo;

- d) o motor para acionamento do eixo deveria ser fixado no poste em alguma região acima da engrenagem, pois este componente deveria girar juntamente com a estrutura. Algum suporte deveria ser pensado, em conjunto com o método de transmissão de giro para o eixo;
- e) a engrenagem com eixo sem fim mostra-se eficiente para a função, devido a segurança, altos torques obtidos e precisão no posicionamento, relativo à relação de transmissão.

Com base nestas constatações, a proposta foi alterada, com ênfase no princípio de giro. A engrenagem com eixo sem fim é uma solução muito utilizada para rastreadores solares, em consequência das características acima citadas. Optou-se então pelo uso de duas destas engrenagens para efetuar a rotação do sistema, acompanhando tanto o azimute quanto a altura solar, chegando no modelo exposto na Figura 23:

Figura 23 – Segundo modelo rastreador solar UCS



Fonte: autor (2017)

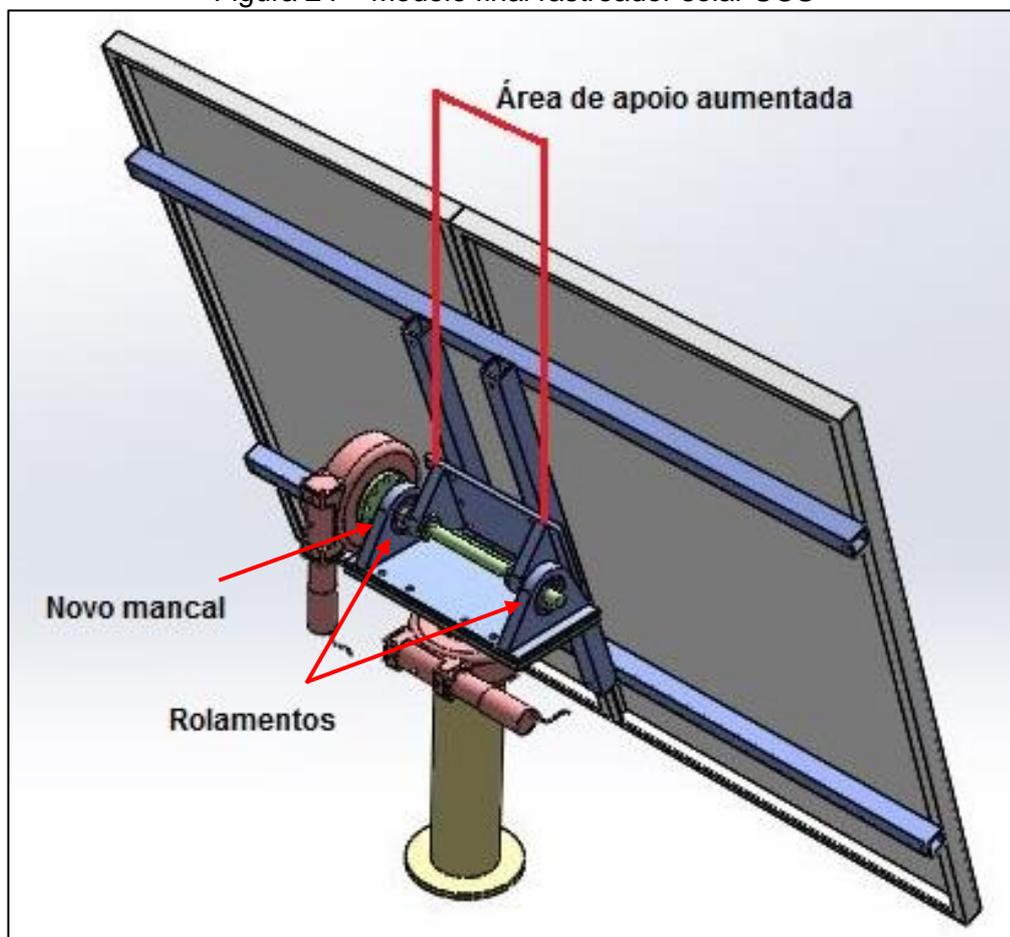
Desta maneira, alguns pontos apresentaram melhora se comparado ao modelo anterior:

- a) todas as forças envolvidas serão transmitidas às engrenagens de eixo sem fim, garantindo a estabilidade do sistema. A engrenagem de rotação azimutal, que

- antes se encontrava na base do poste, foi deslocada para cima, exigindo menos torque para a realização do movimento;
- b) a estrutura de fixação foi simplificada, utilizando-se menos material para a sua construção;
 - c) a altura do mecanismo diminuiu, favorecendo aspectos construtivos do poste e a resistência aos ventos do rastreador em relação ao solo;
 - d) a montagem do sistema também tornou-se mais simples, exigindo pouco ferramental para a instalação do rastreador;
 - e) o consumo de energia elétrica dos motores é reduzido, em razão da alta relação de transmissão das engrenagens, o que também traz precisão no movimento e posicionamento dos painéis.

Todavia, foi ponderado que a utilização de apenas um mancal de rolamento para suportar a estrutura poderia propiciar danos ao mecanismo, principalmente na ocasião de ventos fortes. Portanto, foi considerado o uso de dois mancais, aumentando o espaçamento entre os suportes de fixação da estrutura e, conseqüentemente, aumentando também o eixo de transmissão de controle de altura. O resultado destas alterações encontra-se na Figura 24.

Figura 24 – Modelo final rastreador solar UCS



Fonte: autor (2017)

Desta forma, o Quadro 5 foi elaborado, demonstrando os componentes mecânicos do rastreador proposto.

Quadro 5 – Componentes mecânicos do rastreador UCS

	Princípio de giro		Estrutura de sustentação dos painéis	
	Componente	Quantidade	Componente	Quantidade
Rastreador UCS	Engrenagem com eixo sem fim	2	Poste circular	1
	Eixo de transmissão	1	Perfil de sustentação	4
	Mancal de rolamento	2	Mancal de sustentação	1
	Rolamento de esferas	2		
	Suporte de transmissão	1		

Fonte: autor (2017)

Em contrapartida, são necessários alguns cuidados com o controle do movimento do rastreador. Com essa configuração de giro, ambas as engrenagens permitem o giro completo da estrutura em que estão conectadas. A engrenagem responsável pelo acompanhamento da altura solar dos painéis necessitaria de sensores para limitar o seu giro entre os valores determinados, caso contrário o giro completo da estrutura entraria em conflito com o poste.

Outra premissa é com relação na detecção de fortes rajadas de vento. Nesse caso, seria conveniente o rastreador posicionar os painéis paralelos ao chão, i.e. 90°C. Esta posição é adotada como posição de repouso, evitando assim danos à estrutura e aos componentes, por mais que estejam dimensionados para suportar as forças calculadas para a pior situação.

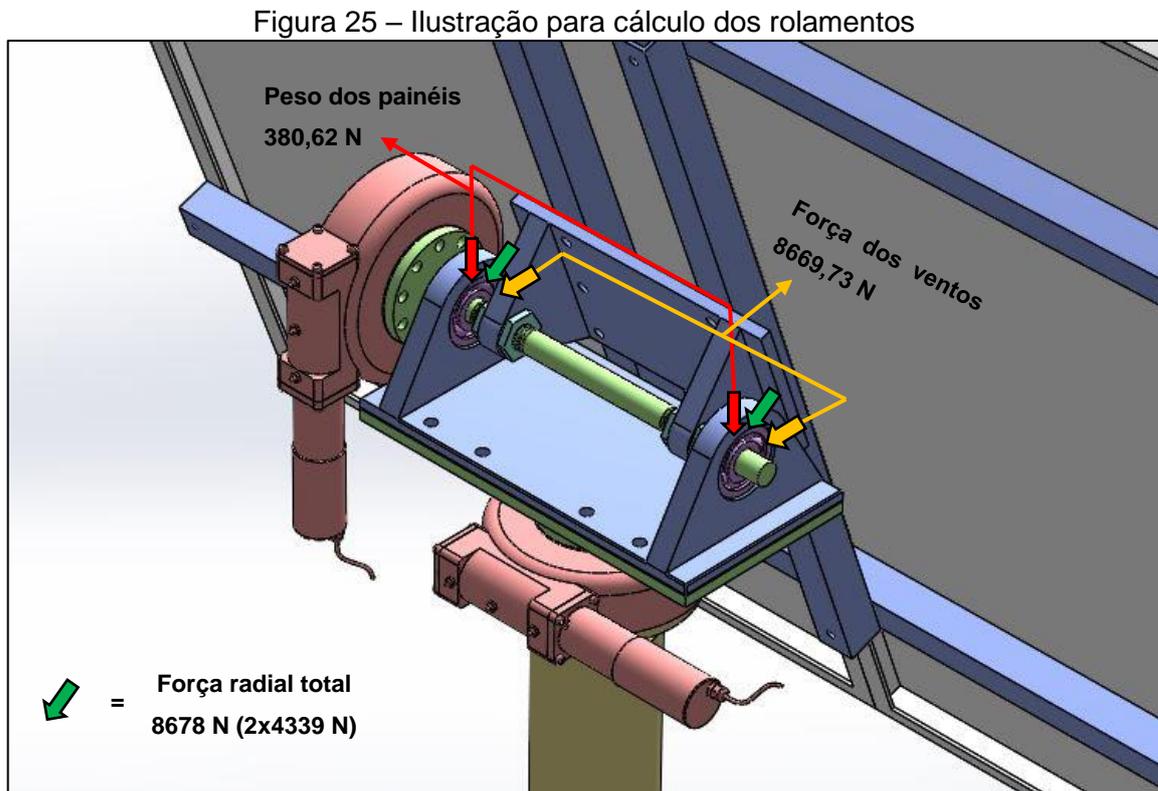
Com o conceito desenvolvido, alguns componentes-chave devem ser definidos e dimensionados, como por exemplo, a escolha dos rolamentos e o torque exigido pelas forças que atuam no mecanismo. Isso é discutido na próxima seção.

4.2.2 Dimensionamento dos rolamentos e torque do sistema

Após compreender as forças que atuam sobre o sistema, é importante que os componentes estejam dimensionados de acordo com as exigências para o funcionamento seguro do mecanismo. Logo, as forças sobre os rolamentos que suportam os painéis e o torque demandado em consequência do movimento e da força dos ventos foram calculadas abaixo.

Para os rolamentos, foi considerado que há apenas a ocorrência de forças radiais. Como a maior força dos ventos (8669,73 N) é dada num vetor horizontal e o a força devido ao peso das placas (380,62) em um vetor vertical, chegou-se em um valor de força radial total de aproximadamente 8678 N. Essa força é considerada estática, devido à rotação lenta do sistema, e estará distribuída em dois rolamentos, fazendo com que cada um deles tenha que

suportar no mínimo 4339 N. Considerando um fator de segurança equivalente a 2 vezes esta força, rolamentos rígidos de uma carreira de esferas com diâmetro interno a partir de 17mm são opções para essa finalidade (SKF, 2017). A distribuição das forças é demonstrada na Figura 25.



Fonte: autor (2017)

Em relação ao torque, uma condição severa foi estipulada, onde uma rajada de vento atingisse a extremidade superior da estrutura, exigindo que o torque da engrenagem suporte essa carga. A área afetada pela tensão dinâmica dos ventos ($2737,4 \text{ N/m}^2$) foi dividida pela metade, chegando no valor de $1,584 \text{ m}^2$. Multiplicando os fatores, a força encontrada foi de 4336 N , aplicada no centro da parte superior dos painéis, que se encontra a uma distância de $473,11 \text{ mm}$ do centro do eixo de transmissão, conforme exposto na Figura 26. Com isso, calcula-se um torque de aproximadamente $2,05 \text{ kNm}$ na engrenagem responsável pelo ajuste da altura das placas, valor considerado relativamente baixo para o uso de engrenagens com eixo sem fim, justificando e facilitando ainda mais a seleção deste componente. Consultando catálogos de empresas que desenvolvem este produto, engrenagens simples com uma única linha de giro e com dimensões reduzidas poderiam ser utilizadas para esta finalidade (IMO, 2011).

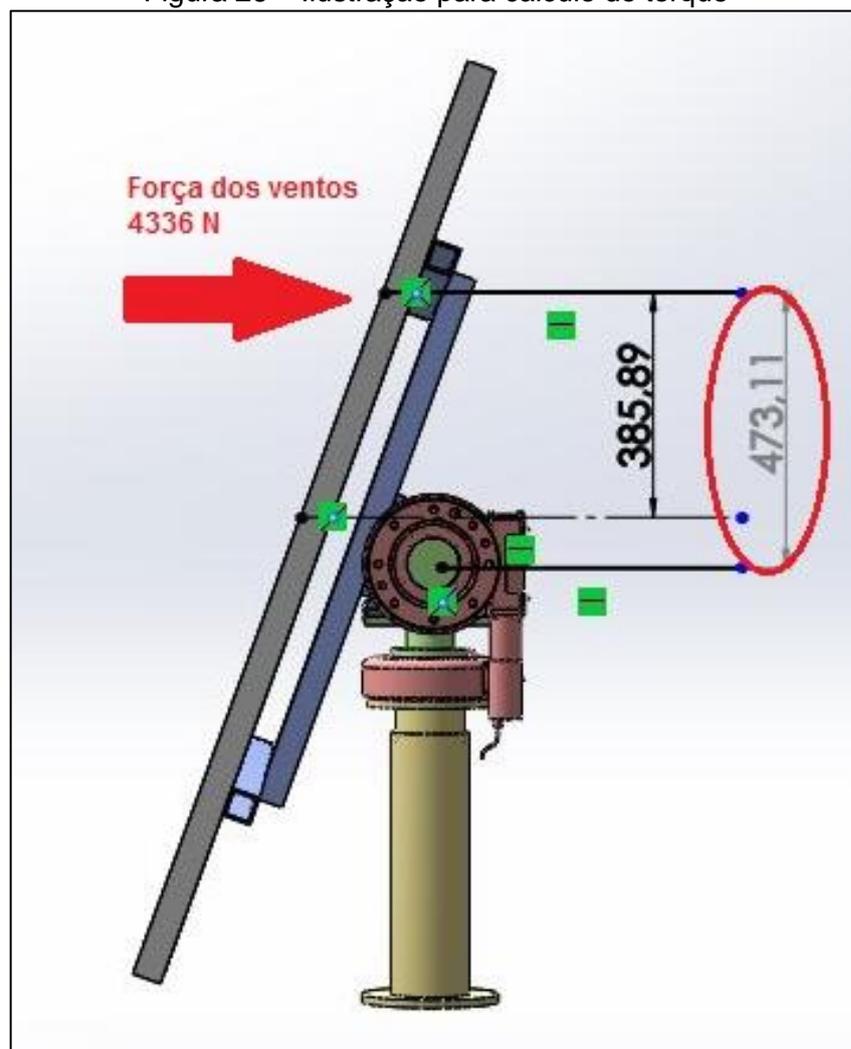
Outra ponderação em relação à engrenagem se dá em função da relação de transmissão. Considerando o dia com maior tempo de iluminação do ano, i.e. solstício de verão em Caxias do Sul, e tomando como referência a inclinação inicial dos painéis de 20° ,

tem-se uma variação no azimute solar de aproximadamente 210° que ocorrem em um intervalo de 10 horas, entre as 7 da manhã e as 5 da tarde. Assim, teríamos uma rotação do sistema em relação ao azimute de, em média $0,000972$ rpm. A relação de transmissão das engrenagens com eixo sem fim é dada em proporções elevadas, em consulta a catálogos de fabricantes do produto. O mecanismo não estará em movimento contínuo. Portanto, supondo-se que o sistema realize o giro a cada 5 minutos, e utilizando-se uma engrenagem com relação $62:1$, com velocidade de rotação de saída de $0,12$ rpm (KMI, 2017), a engrenagem teria que funcionar por apenas aproximadamente 2,5 segundos para efetuar o giro necessário para o acompanhamento do sol, uma vez que:

$$5 \text{ min} \times 0,000972 \text{ rpm} = 0,00486 \text{ rotações}$$

$$\frac{0,00486 \text{ rotações}}{0,12 \text{ rpm (da engrenagem)}} = 0,04 \text{ min} \sim 2,5 \text{ segundos}$$

Figura 26 – Ilustração para cálculo do torque



Fonte: autor (2017)

Com esta configuração de rastreador solar, peças e itens de fácil acesso e manufatura podem ser utilizados na construção do mecanismo. A manutenção se daria em função da lubrificação dos rolamentos e engrenagens e verificação periódica dos elementos de fixação.

4.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi demonstrado o processo de desenvolvimento conceitual de uma primeira proposta para o rastreador solar a ser instalado na UCS. A força dos ventos foi recalculada em função da inclinação inicial dos painéis, dados para a seleção dos rolamentos foram levantados e o torque em uma situação de alta exigência foi estimado.

O desenvolvimento resultou em 3 modelos, que evoluíram conforme o modelamento e observação de aspectos que poderiam ser melhorados. Assim, chegou-se em um modelo final, utilizando duas engrenagens com eixo sem fim, dois mancais de rolamento, um eixo de transmissão para acompanhamento da altura solar, um flange para permitir o giro azimutal e elementos estruturais como tubos e chapas de aço, que fazem a conexão entre os elementos do rastreador.

Conforme a proposta deste trabalho, os projetos elétrico, eletrônico e sistemas de controle e automação do mecanismo não foram desenvolvidos. Contudo, as engrenagens utilizadas no rastreador fornecem o motor de acionamento já dimensionado para sua função. O uso de sensores de luminosidade, a fim de posicionar os painéis perpendicularmente à maior radiação solar, é imprescindível para o bom funcionamento do mecanismo. Demais sistemas de controle automatizado podem vir a implementar a proposta, principalmente na obtenção de dados de saída, como potência gerada, movimentação do rastreador e consumo elétrico dos componentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia solar mostra-se como forte aliada na redução dos impactos ambientais causados na geração de energia elétrica, seguindo o caminho da sustentabilidade e consciência verde. Com o objetivo de maximizar o potencial e eficiência na captação de energia solar por painéis fotovoltaicos, rastreadores solares são alternativas às instalações fixas, podendo apresentar aumentos de até 40% na produção de energia elétrica.

Uma das principais colaborações deste trabalho foi levantar soluções mecânicas de rastreamento solar já existentes, definindo-as conforme suas características principais. Princípio de giro, alcance angular e resistência à força dos ventos se destacaram como principais fatores que influenciam na escolha dos componentes do sistema.

Através das pesquisas realizadas, foi possível identificar a variedade de mecanismos que exercem a função de rastrear a altura e o azimute solar. Pesquisas e desenvolvimentos acadêmicos constantemente buscam alternativas em relação ao princípio de giro de rastreadores solares, mostrando-se equivalentemente eficientes à modelos comerciais.

A opção pelo uso de duas engrenagens com eixo sem fim para a proposta do rastreador solar da UCS se deu em função principalmente da segurança de operação e simplicidade na montagem. O baixo consumo elétrico dos motores, devido à alta relação de transmissão deste componente, também é um fator que agrada, visto que a energia para o acionamento deles provém das próprias placas fotovoltaicas do rastreador.

Um dos pontos a ser aprimorado se daria em função da estrutura do mecanismo, que compreende os perfis de sustentação das placas, chapas, mancais, flanges e poste. O dimensionamento ótimo, combinado com a escolha do material para a manufatura destes componentes, poderia significar redução no peso de toda o mecanismo, contribuindo para um valor de torque reduzido, podendo significar redução de custo na aquisição das engrenagens.

Por ainda apresentar custos elevados de aquisição, o uso de rastreadores solares em áreas residenciais não foi muito evidenciado nas pesquisas realizadas. A maioria dos mecanismos remetiam a locais comerciais e industriais, com capacidade de instalação a partir de 12 painéis fotovoltaicos. Este foi outro fator de motivação para a realização deste trabalho, com a tentativa de tornar o sistema fotovoltaico mais atraente ao consumidor.

Para a continuação do desenvolvimento desta proposta, seria imprescindível a colaboração de especialistas em elétrica e automação, com o objetivo de dimensionar e especificar o controle e acionamento do rastreador. Também é sugerido que os 2 painéis fotovoltaicos restantes fossem fixamente instalados, a fim de obter dados para comparação de captação de energia elétrica. Desta forma, também seria possível prever o tempo de retorno financeiro do investimento para a construção do rastreador, justificando ou não a sua implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L., **Atlas Eólico**: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SEMC, 2002.

ANEEL, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2ª ed., Brasília: ANEEL, 2005.

ANDRADE, J., **Conforto Higrotérmico**. Disponível em: <http://www.slideshare.net/pedrofagu2/aula-3-carta-solar>. Acesso em: 22 out. 2016.

ARAÚJO J. D. B., **Protótipo de Rastreador Solar de um Eixo Baseado em Microcontrolador**, 2015, 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ARRAY TECHNOLOGIES, **DA Tracker**. Disponível em: <http://arraytechinc.com/duratrack-da-tracker>. Acesso em: 30 mar. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 6123**: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BASSO, L. H. et al., Análise de um Sistema de Aquecimento de Água para Residências Rurais, Utilizando Energia Solar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.14-21, jan./fev. 2010.

BP SOLAR, **230 W Photovoltaic Model BP3230T**. 2010. Disponível em: www.solarelectricsupply.com/pdf/BP/BP3230T.pdf. Acesso em: 11 abr. 2017

CABRAL, I. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R., Energia Solar – Análise Comparativa entre Brasil e Alemanha. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Salvador, 25 nov. 2013. Anais...

CRUZ, G. F. H., **Estudo da Utilização da Energia Solar no RS**. 2009. 106 f. Projeto de Diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2009.

DLR, **Direct Normal Irradiation Map**. Disponível em: <http://www.dlr.de>. Acesso em 5 dez. 2016.

DUTRA, J. C. N. et al., Uma Análise do Panorama das Regiões Missões e Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul sob o Prisma da Energia Eólica e Solar Fotovoltaica como Fontes Alternativas de Energia. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, v. 34, n. 124, p. 225-243, jan./jun. 2013.

ECYCLE, **O que é energia solar e como funciona o processo de geração de eletricidade via radiação solar?**. Disponível em: <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/69-energia/2890-o-que-e-energia-solar-como-funciona-radiacao-solar-painel-residencial-fotovoltaica-csp-heliotermica-nuclear-eolica-biomassa-desvantag> . Acesso em: 10 set. 2015.

ENGINEERING.COM, **Why Solar?**. Disponível em: <http://www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/WhySolarEnergy/tabid/3893/Default.aspx>. Acesso em: 10 set. 2016.

EPE, **Balço Energético Nacional 2016**: Ano base 2015, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 4 set. 2016.

FERDAUS, R. A. et al., Energy Efficient Hybrid Dual Axis Solar Tracking System. **Journal of Renewable Energy**, Bangladesh, jul. 2014.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 7-23, out./dez. 2013.

GELLER, H. S., **Revolução Energética**: Políticas para um futuro sustentável, Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.

H-FANG, **HFANG Solar Catalogue**. Disponível em: <http://www.h-fang.com.cn/Upload/downloads/HFANG_Catalog_S_E2.pdf>. Acesso em 30 mar. 2017.

HINRICHES, R. A.; KLEINBACH, M., **Energia e Meio Ambiente**, 3ª ed., São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KMI, **Product Catalogue**. Disponível em: <<http://www.kinematicsmfg.com/wp-content/themes/kinematics/techspecs/common/catalog.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2017

KREITH, F; KREIDER, J. F., **Principles of Solar Engineering**, Washington, EUA: Hemisphere Publishing Corporation, 1978.

IMO, **Slew Drive Product Catalogue**, 2011. Disponível em: <http://www.imo.de/uploads/tx_ffimodlCenter/ST211-GB_01.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017

INCUBATOR WARE HOUSE, **Home-made Solar Tracking System with no electronics for solar panel or solar oven**. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HkhVomoD47g>>. Acesso em: 2 abr. 2017

JORNAL NACIONAL, **Pesquisador do Ceará cria painel que reduz custo de placas de energia solar**. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2014/11/pesquisador-do-ceara-cria-painel-que-reduz-custo-de-placas-de-energia-solar.html>>. Acesso em: 2 abr. 2017.

LAZARD, **Lazard Levelized Cost of Energy Analysis – Version 9.0**. 2015. Disponível em: <<https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf>>. Acesso em: 4 out. 2016.

LINAK, **Solar Tracking**. Disponível em: <<http://www.solar-tracking.com>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

LO, S. et al., Design, operation and performance evaluation of a cable-drawn dual-axis solar tracker compared to a fixed-tilted system. **Energy Science and Engineering**, Hsinchu County, Taiwan, p. 549-667, ago. 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Energia Solar no Brasil e no Mundo**: ano ref. 2015, jul. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+no+Brasil+e+no+Mundo+%E2%80%93+Ano+de+Refer%C3%Aancia+%E2%80%93+2015/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c?version=1.1>>. Acesso em: 4 set. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Resenha Energética Brasileira**: Exercício de 2014, jun. 2015. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+++Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>>. Acesso em: 12 out. 2016.

MPPT SOLAR, **Orientação e Inclinação dos Painéis Solares**. Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/orientacao-inclinacao-paineis-solares-fotovoltaicos.html>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

NEXTRACKER, **NX Horizon**. Disponível em: <<https://www.nextracker.com/product-services/nx-horizon/>>. Acesso em: 30 mar. 2017

OLIVEIRA, C. A. A., **Desenvolvimento de um Protótipo de Rastreador Solar de Baixo Custo e Sem Baterias**. 2007. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

OLIVEIRA, J. S. et al., Disponibilidade de Irradiância Solar para Geração de Energia Elétrica na Alemanha e no Estado do Rio Grande do Sul, **Disciplinarum Scientia** - Série: Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 205-212, 2013.

PEREIRA, E. B. et al., **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos: INPE, 2006.

PIANEZZOLA, G., **Mapas de Complementaridade dos Potenciais Solar e Eólico no Estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

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

PORTAL ENERGIA, Energias Renováveis, **Energia Fotovoltaica**: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. 2004. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2016.

_____, Energias Renováveis, **Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/category/energiasolar/>>. Acesso em: 4 set. 2016.

ROSA, C. A.; FILHO, G. L. T., **Série Energias Renováveis: Solar**, Organizado por Geraldo Lúcio Tiago Filho, Itajubá: FAPEPE, 2007.

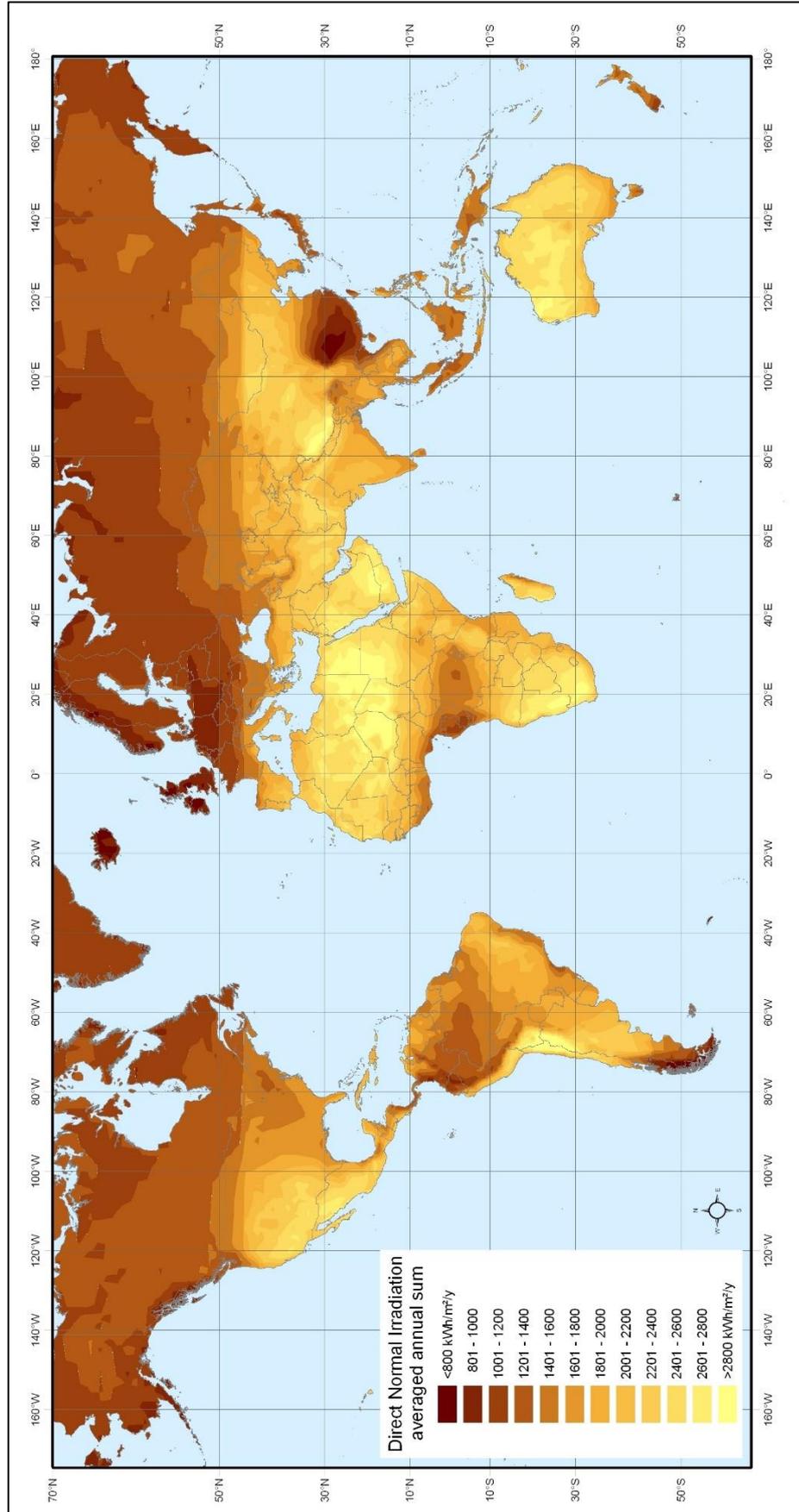
SKF, **Rolamentos de esferas**, 2015. Disponível em: < http://www.skf.com/binary/82-121486/10000_2-PT-BR---Rolling-bearings.pdf >. Acesso em: 16 jun. 2017.

SMARTFLOWER PACIFIC, **Smartflower -the world's first all-in-one solar system**. Disponível em: < <https://www.smartflowerpacific.com/downloads/brochure.pdf>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

TREVELIN F. C., **Estudo Comparativo entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**, 2014, 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

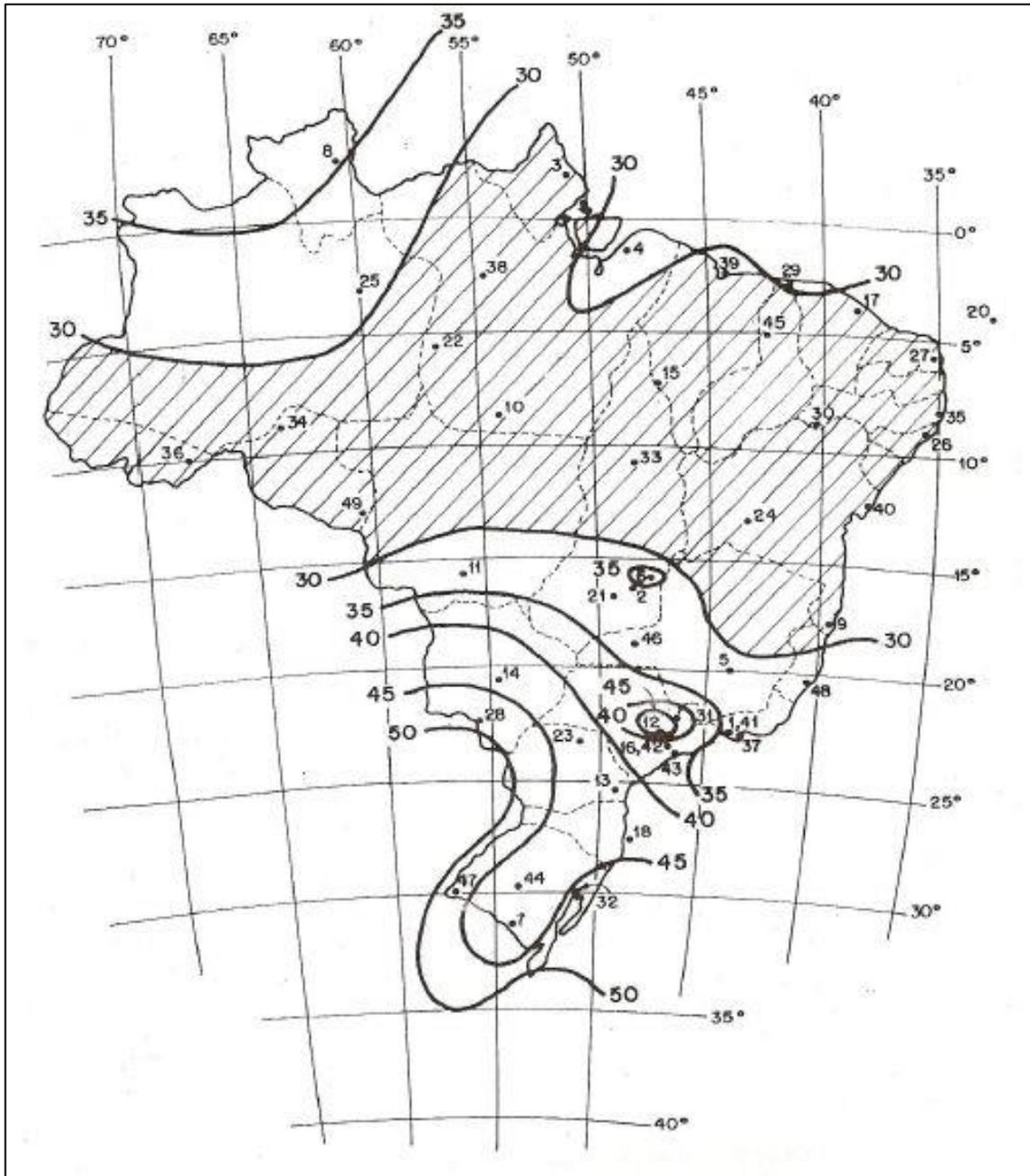
UCS - UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, **Institucional**. Disponível em: <<http://www.ucs.br/site/institucional/>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

ANEXO A – POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR MUNDIAL



Fonte: DLR (2016)

ANEXO B – ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA

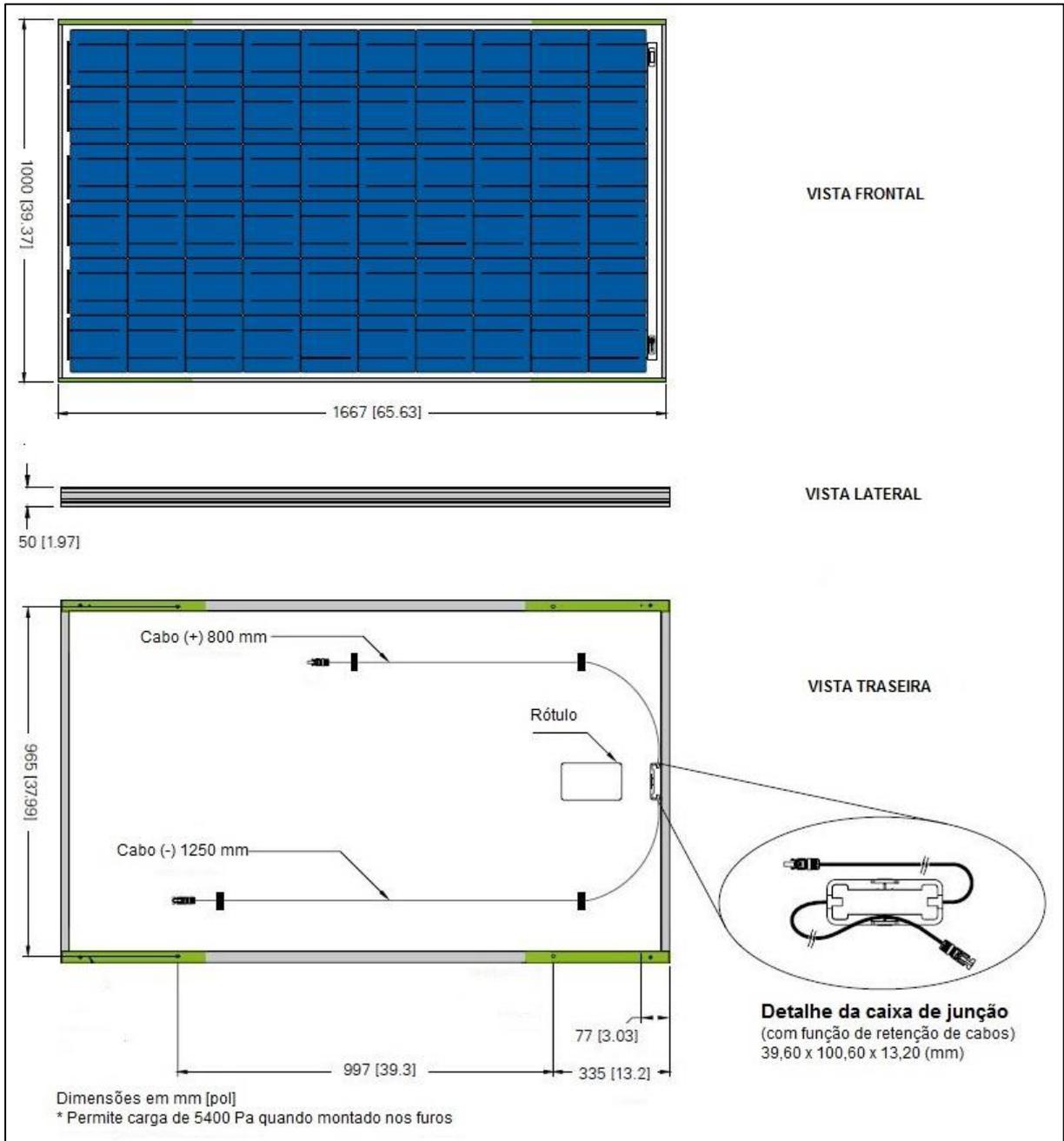


V_0 = em m/s

V_0 = máxima velocidade média medida sobre 3 s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano

Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988)

ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO PAINEL FOTOVOLTAICO



Fonte: adaptado de BP Solar (2010)