



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JOSÉ ITANOR DO COUTO ROCHA FILHO**

**SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR DE UM EIXO COM DIFERENTES  
ESTRATÉGIAS DE SEGUIMENTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**FORTALEZA**

**2016**

JOSÉ ITANOR DO COUTO ROCHA FILHO

SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR DE UM EIXO COM DIFERENTES  
ESTRATÉGIAS DE SEGUIMENTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Daher

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R573s Rocha Filho, José Itanor do Couto.  
Sistema de seguimento solar de um eixo com diferentes estratégias de seguimento para módulos fotovoltaicos / José Itanor do Couto Rocha Filho. – 2016.  
113 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.  
Coorientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.
1. Seguimento solar. 2. Energia solar. 3. Sistemas fotovoltaicos. I. Título.

CDD 621.3

---

JOSÉ ITANOR DO COUTO ROCHA FILHO

SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR DE UM EIXO COM DIFERENTES  
ESTRATÉGIAS DE SEGUIMENTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr-Ing. Sérgio Daher

Aprovada em: 15/07/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr-Ing. Sérgio Daher (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Elissandro Monteiro do Sacramento  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Itanor e Rogéria.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que sempre me ajudou nos momentos mais difíceis e jamais me abandonou.

À minha família, pelo apoio e compreensão em vários momentos.

Ao meu orientador, o professor Paulo Cesar Marques de Carvalho, e ao meu coorientador, o professor Sérgio Daher, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, fornecendo sugestões, transmitindo ensinamentos e solucionando problemas.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas do Laboratório de Energias Alternativas, Daniel, Doglasse, Márcio e Renata pela colaboração em etapas do desenvolvimento do trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro com o fornecimento da bolsa auxílio.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, que transmitiram valiosos conhecimentos e experiências ao longo do curso de graduação e das disciplinas cursadas durante o mestrado.

Aos meus amigos, pelo incentivo fornecido.

A todos que participaram deste trabalho, diretamente ou indiretamente.

“Mais vale as lágrimas de um derrotado, do que a vergonha de nunca ter lutado.”  
(Desconhecido)

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.” (Albert Einstein)

## RESUMO

Neste trabalho é feito o desenvolvimento de um sistema de seguimento solar de um eixo para um módulo fotovoltaico (FV) na cidade de Fortaleza/CE, com componentes e estratégias visando se ter um reduzido consumo de energia elétrica. Para o posicionamento do módulo foram utilizadas três estratégias de seguimento do Sol. Na primeira, a movimentação do módulo é feita de forma pré-definida, definindo-se os horários em que é feita a atualização da posição do módulo e o valor do incremento na posição angular do mesmo a cada posicionamento. Na segunda, foi utilizado um algoritmo matemático para se fazer o cálculo da posição do Sol a cada instante durante o dia, sendo o posicionamento do módulo feito de acordo com os ângulos solares obtidos. Na terceira, foram utilizados sensores de luminosidade no módulo para se fazer a detecção da posição do Sol em relação ao mesmo e mantê-lo alinhado com o Sol durante o dia. Por meio de experimentos, foram obtidos e analisados os ganhos na geração de energia elétrica fornecidos pelo módulo com seguimento com cada uma das estratégias utilizadas, em diferentes condições climáticas, em relação a um módulo FV fixo. A estratégia que proporcionou o seguimento com maior precisão e forneceu os maiores ganhos diários líquidos foi aquela baseada no algoritmo solar, com valores entre 127,98 Wh (52,71%) e 38,55 Wh (22,08%), sendo obtido na média ponderada um valor de 48,87%. Com a estratégia utilizando os sensores de luminosidade os ganhos obtidos foram similares, com um valor de 47,15% na média ponderada. Com o seguimento pré-definido, com menor precisão, verificou-se uma redução no ganho, com valor máximo de 96,60 Wh (41,05%), em um dia de céu claro. Variando-se os intervalos de tempo entre cada atualização de posição do módulo, permitindo que o módulo apresentasse maiores desvio angulares em relação ao Sol, verificou-se que para desvios de até  $1^\circ$  a queda no ganho energético foi reduzida, apresentando valores maiores com desvios a partir de  $3,7^\circ$ . Os altos índices de irradiação solar diária, com valor médio de  $5,45 \text{ kWh/m}^2$  durante os dias de experimentos, na cidade de Fortaleza, de latitude  $-3,74^\circ$ , contribuíram para a obtenção de valores consideráveis de ganho. O consumo de energia elétrica do sistema de seguimento foi reduzido, apresentando um valor máximo de 4,274 Wh/dia para a estratégia com seguimento pré-definido e mínimo de 2,495 Wh/dia para a estratégia com o algoritmo solar. Os ganhos significativos obtidos, mesmo com estratégias com menor precisão no acompanhamento do Sol, mostram o potencial para o uso de seguimento solar em módulos fotovoltaicos em Fortaleza.

**Palavras-chave:** Seguimento solar. Energia solar. Sistemas fotovoltaicos.

## ABSTRACT

This document presents the development of a solar tracking system of one axis to a photovoltaic module (PV) in the city of Fortaleza/CE, with components and strategies targeting to obtain a reduced consumption of electricity. For module positioning, three sun tracking strategies were used. In the first, the module movement is made of pre-defined form, defining the times that the module position is updated and the value of the increase in its angular position at each positioning. In the second, a mathematical algorithm was used to make the calculation of the position of the sun in every moment during the day, and the module positioning was made in accordance with the obtained solar angles. In the third, light sensors were used in the module to make detection of the position of the sun in relation to the module and keep it aligned with the sun during the day. Through experiments, were obtained and analyzed gains in power generation provided by the tracking module with each of the strategies used in different climatic conditions, in relation to a fixed PV module. The strategy that made the sun tracking with more accuracy and provide the highest daily liquid gains was that based on the solar algorithm, with values between 127.98 Wh (52.71%) and 38.55 Wh (22.08%), being obtained in the weighted average a value of 48.87%. With the strategy using the light sensors the gains were similar, with a value of 47.15% in the weighted average. With pre-defined tracking, with less accuracy, there was a reduction in gain, with a maximum value of 96.60 Wh (41.05%) in a day of clear sky. By varying the intervals of time between each module positioning, allowing the module to present higher angular deviation from the sun, it was found that for deviations below to  $1^\circ$  the drop in energy gain was reduced, with higher values for deviations bigger than  $3.7^\circ$ . The high rates of daily solar irradiation, with an average value of  $5.45 \text{ kWh/m}^2$  during the days of experiments, in the city of Fortaleza, latitude  $-3.74^\circ$ , contributed to obtain considerable values of gains. The electricity consumption by the tracking system was reduced, with a maximum value of 4.274 Wh/day for the strategy with predefined tracking and minimum of 2.495 Wh/day for the strategy with the solar algorithm. The significant gains, even with strategies with smaller precision on the tracking of the Sun, shows the potential for the use of solar tracking in photovoltaic modules in Fortaleza.

**Keywords:** Solar tracking. Solar energy. Photovoltaic systems.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<i>1.1.1 Objetivo geral.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2 Objetivos específicos .....</i>	<i>14</i>
<b>1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 ENERGIA SOLAR .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>21</b>
<i>2.2.1 Efeito fotovoltaico.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2 Células e módulos fotovoltaicos .....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2.1 Parâmetros elétricos.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.2.2 Fatores que influenciam nas características elétricas .....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.3 Sistemas fotovoltaicos.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2.4 Geração fotovoltaica no Brasil.....</i>	<i>30</i>
<b>2.3 POSIÇÃO DO SOL .....</b>	<b>32</b>
<i>2.3.1 Os movimentos da Terra.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.2 Ângulos para o seguimento solar.....</i>	<i>34</i>
<b>2.4 SEGUIDORES SOLARES.....</b>	<b>41</b>
<i>2.4.1 Princípios de funcionamento .....</i>	<i>42</i>
<i>2.4.2 Classificação com relação ao número de eixos rotativos.....</i>	<i>43</i>
<i>2.4.2.1 Seguidores de um eixo .....</i>	<i>44</i>
<i>2.4.2.2 Seguidores de dois eixos.....</i>	<i>45</i>
<i>2.4.3 Classificação com relação ao tipo de controle.....</i>	<i>47</i>
<i>2.4.3.1 Seguidores passivos.....</i>	<i>47</i>
<i>2.4.3.2 Seguidores ativos.....</i>	<i>48</i>
<i>2.4.3.2.1 Controle em malha aberta.....</i>	<i>49</i>
<i>2.4.3.2.2 Controle em malha fechada .....</i>	<i>50</i>
<b>3. ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE SEGUIMENTO SOLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 LABORATÓRIO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2 MÓDULOS FV .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3 SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR .....</b>	<b>64</b>
<i>4.3.1 Microcontrolador.....</i>	<i>64</i>
<i>4.3.2 Circuito “driver” para o motor.....</i>	<i>66</i>
<i>4.3.3 Motor de passo .....</i>	<i>67</i>
<i>4.3.4 Sistema de transmissão mecânica.....</i>	<i>68</i>
<i>4.3.5 Estrutura de suporte do módulo FV .....</i>	<i>69</i>
<i>4.3.6 Potenciômetro .....</i>	<i>71</i>
<i>4.3.7 Sensores LDR .....</i>	<i>73</i>
<i>4.3.8 Fonte de alimentação .....</i>	<i>77</i>
<b>4.4 AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS .....</b>	<b>78</b>

<b>4.4.1 Piranômetro .....</b>	<b>78</b>
<b>4.4.2 Placa de medição e condicionamento de sinais.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.3 Cargas .....</b>	<b>81</b>
<b>4.4.4 Data Logger .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5 ESTRATÉGIAS DE SEGUIMENTO .....</b>	<b>83</b>
<b>4.5.1 Controle em malha aberta.....</b>	<b>84</b>
<b>4.5.1.1 Seguimento de forma pré-definida .....</b>	<b>84</b>
<b>4.5.1.2 Seguimento com algoritmos de cálculo da posição do Sol .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5.2 Controle em malha fechada .....</b>	<b>87</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>
<b>5.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS .....</b>	<b>89</b>
<b>5.1.1 Seguimento baseado no algoritmo solar.....</b>	<b>89</b>
<b>5.1.2 Seguimento baseado nos sensores LDR .....</b>	<b>97</b>
<b>5.1.3 Seguimento de forma pré-definida.....</b>	<b>99</b>
<b>5.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA DE SEGUIMENTO.....</b>	<b>102</b>
<b>5.3 GANHO ENERGÉTICO LÍQUIDO.....</b>	<b>105</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>108</b>
<b>6.2 ARTIGOS PUBLICADOS.....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana, sendo a energia elétrica uma das principais fontes de luz e força do mundo moderno. Em termos de suprimento energético, a eletricidade tornou-se uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável para o desenvolvimento socioeconômico e o alcance de avanços tecnológicos em muitos países (ANEEL, 2008).

Há um crescente aumento da demanda energética no mundo, provocado principalmente pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento tecnológico e industrial da sociedade. A matriz energética, composta principalmente por fontes primárias, dentre as quais se destacam petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio e energia hidráulica, tem passado por profundas alterações nos últimos anos. A prevalência do consumo dos combustíveis fósseis vem sendo profundamente questionada, não apenas por ser um recurso esgotável, mas também pelas preocupações ambientais. O aumento da emissão de gases de efeito estufa e da poluição do ar, que causam danos à qualidade de vida e não contribuem para a preservação do meio ambiente, são alguns dos fatores que contribuíram para a busca por alternativas energéticas baseadas em fontes menos agressivas e menos poluentes.

Com isso, a cada dia se torna mais importante uma maior utilização das fontes de energia limpas e renováveis, como a solar, a eólica, a hidráulica e a geotérmica, visando um desenvolvimento sustentável e preservacionista.

A energia solar, em especial a energia solar fotovoltaica (FV), cuja utilização tem se acentuado nos últimos anos em função de grandes avanços tecnológicos, é uma das fontes de energia que se mostra mais limpa e sustentável, sendo originária de uma fonte praticamente inesgotável e acessível em todos os pontos do mundo, não dependendo de água de chuvas, não realizando emissão de gases de efeito estufa ou de gases ácidos e não sendo necessária a formação de lagos para reservatórios, sendo o desmatamento somente realizado em grandes instalações, as quais, geralmente, são construídas em áreas desérticas ou semiáridas. Essa forma de geração de energia elétrica ainda apresenta vantagens como modularidade, baixos custos de manutenção e longa vida útil, o que facilita muito a instalação de sistemas de captação da energia do Sol em lugares fora do alcance da rede de energia elétrica (CRESESB, 2014).

Entretanto, o alto custo dos equipamentos utilizados para conversão da energia solar em energia elétrica pronta para uso, apesar dos constantes avanços na área que levaram ao barateamento desta tecnologia, e a baixa eficiência das células fotovoltaicas, em que analistas comerciais apontam para um eventual gargalo ao desenvolvimento de células mais eficientes, são alguns obstáculos para uma maior utilização da energia solar (APPLEYARD, 2009).

Porém, com os avanços que tem se verificado nas tecnologias de aproveitamento desse tipo de energia e o crescente interesse na sua utilização, cada vez mais tem se desenvolvido tecnologias que aumentem o rendimento na geração de energia elétrica, fazendo com que se torne uma fonte de energia mais atrativa.

Entre essas tecnologias estão os seguidores solares, que, dependendo da aplicação e das condições climáticas, conseguem fornecer ganhos importantes (entre 10% e 100%) na geração de energia elétrica pelo sistema FV com custos reduzidos, em comparação com o custo dos módulos FV (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

Um seguidor solar faz com que a superfície de captação solar acompanhe o movimento do Sol durante o dia, fazendo com que os raios solares incidam de forma perpendicular na superfície, o que proporciona que mais energia solar possa ser aproveitada.

A instalação de sistemas de seguimento solar em grandes centrais fotovoltaicas conectadas à rede vem crescendo, pois esta tecnologia proporciona aumentos ainda maiores na produção de energia elétrica quando atuando sobre um conjunto de módulos fotovoltaicos. Também há um aumento na utilização de seguidores solares em instalações autônomas, pois os custos envolvendo a eletrônica de controle e mecânica desta tecnologia vem sendo reduzidos devido ao desenvolvimento de novas tecnologias.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Desenvolver e avaliar os ganhos energéticos de um sistema de seguimento solar de um eixo, com diferentes estratégias de seguimento, para um módulo FV na cidade de Fortaleza/CE.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

a) realizar um estudo de aspectos relacionados à energia solar, como características da irradiação solar, movimentos da Terra e cálculo da posição do Sol, assim como assuntos pertinentes ao uso da geração fotovoltaica e os diferentes tipos de seguidores solares existentes;

b) fazer uma revisão bibliográfica dos diversos sistemas de seguimento solar desenvolvidos, até o presente momento, por pesquisadores ao redor do mundo;

c) desenvolver um sistema de seguimento solar de um eixo para um módulo fotovoltaico, com componentes e ajustes visando reduzir o consumo de energia elétrica;

d) avaliar os ganhos energéticos fornecidos pelo sistema de seguimento com diferentes estratégias de seguimento, com controle em malha aberta ou em malha fechada da posição do módulo FV, na cidade de Fortaleza/CE;

e) verificar qual estratégia proporcionou os maiores ganhos energéticos;

f) analisar qual a precisão necessária para o seguimento do Sol, verificando se há uma queda acentuada nos ganhos obtidos quando o módulo se encontrar desalinhado em relação ao Sol;

g) analisar o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento desenvolvido.

### **1.2 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, como se segue.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema abordado, comentando justificativa, objetivos e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o melhor entendimento dos demais capítulos, com informações relacionadas à radiação solar, movimentos da Terra, posição do Sol, geração fotovoltaica e tipos de sistemas de seguimento solar.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica de diferentes trabalhos, envolvendo o uso de sistemas de seguimento solar, realizados por pesquisadores no mundo.

No capítulo 4 é feita a apresentação do sistema de seguimento solar desenvolvido e das estratégias de seguimento utilizadas.

O capítulo 5 apresenta e comenta os ganhos obtidos com o sistema de seguimento com cada uma das estratégias propostas, além de calcular o consumo de energia elétrica do mesmo.

O capítulo 6 fala das conclusões obtidas com a realização deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O presente capítulo tem como objetivo fornecer uma base de conhecimento teórico para uma melhor compreensão dos demais capítulos deste trabalho. Este capítulo está organizado em quatro seções distintas.

A primeira seção aborda aspectos gerais da energia solar, como características e formas de uso, comenta sobre a irradiação proveniente do Sol, explicando os tipos e a variação conforme a latitude, além de descrever alguns instrumentos de medição solar.

A segunda seção fala sobre a geração fotovoltaica (FV), comentando vantagens, desvantagens, técnicas de melhoria na eficiência de um sistema FV, a forma da conversão da energia solar em elétrica, tipos de células FV, características elétricas dos módulos FV, componentes de um sistema FV, além de comentar sobre a geração FV no Brasil.

A terceira seção comenta sobre a importância de se ter o conhecimento da posição do Sol para um sistema de seguimento solar, abordando os movimentos da Terra e os ângulos para se fazer o seguimento do Sol.

A quarta seção comenta sobre os seguidores solares, abordando a motivação para a sua utilização, os princípios de funcionamento, classificação, tipos de estruturas, formas de controle, estratégias de seguimento e principais componentes.

### **2.1 Energia solar**

A energia é um elemento essencial para o desenvolvimento industrial e socioeconômico de um país. No entanto, a relação entre a energia e a poluição ambiental é um dos maiores desafios que o mundo enfrenta atualmente. Neste contexto, a utilização da energia solar, que é favorável ao meio ambiente, se torna importante para o desenvolvimento de forma sustentável.

A energia do Sol constitui a maior fonte de energia presente no nosso planeta, podendo ser considerada inesgotável e uma fonte de energia limpa. Anualmente, o Sol fornece cerca de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia para a atmosfera terrestre, o que corresponde a algo em torno de 10.000 vezes o consumo de energia na Terra durante o mesmo período (CRESESB, 2006).

A intensidade da irradiância na superfície do Sol é aproximadamente  $6,33 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup> e é liberada a uma taxa relativamente constante. Sabendo-se que a irradiância

se espalha com o quadrado da distância, ao percorrer a distância aproximada de  $1,496 \times 10^{11}$  m (ou 1 UA – Unidade Astronômica) que separam o Sol da Terra, a potência que chega a um metro quadrado da superfície terrestre é reduzida ao valor médio de 1367 W, que é denominado de constante solar (ALVES, 2008).

Devido a órbita ligeiramente elíptica, a intensidade da irradiância solar recebida fora da atmosfera terrestre varia  $\pm 3,4\%$ , com irradiância máxima ocorrendo no periélio, quando o Sol está na distância mínima da Terra (entre 3 e 5 de janeiro), e mínima no afélio, quando o Sol está na distância máxima da Terra (por volta do dia 5 de julho) (ALVES, 2008).

A energia solar pode ser definida como aquela energia proveniente do Sol, seja na sua forma de calor (energia térmica) ou de luz (energia luminosa). Visando o aproveitamento desta fonte de energia, pode-se dividir seu modo de utilização em sistemas FV e sistemas heliotérmicos. No primeiro grupo se realiza um processo de aproveitamento da energia solar para conversão direta em energia elétrica, através da utilização de células FV. O segundo grupo utiliza basicamente a conversão de energia solar em calor, onde posteriormente poderá ser convertida em outra forma de energia (MMA, 2016).

A geração FV ocorre por meio de efeitos da luz sobre determinados materiais, como o silício, decorrente da excitação dos elétrons na presença de luz, gerando energia elétrica diretamente. Diferentemente da energia termosolar, a FV pode produzir eletricidade mesmo com irradiação difusa (MMA, 2016).

Ao se analisar os aspectos do recurso solar, deve-se ter em mente primeiramente os seguintes conceitos (OLIVEIRA, 2008):

a) Irradiância: fluxo de energia por unidade de tempo que atravessa uma determinada área, sendo medido em  $W/m^2$ ;

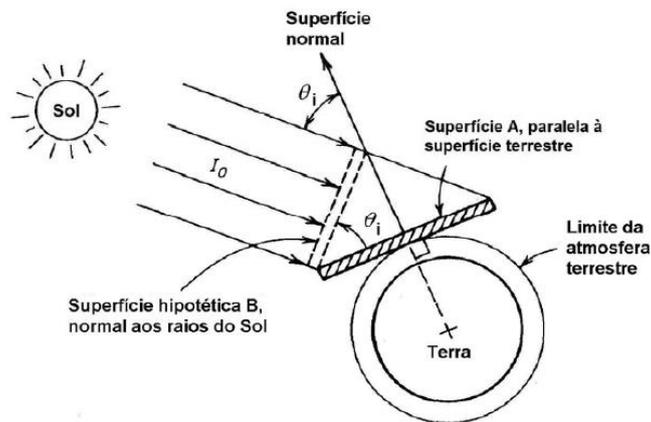
b) Irradiação: é a quantidade de energia que atravessa uma determinada área durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área. É igual à integração da irradiância no intervalo de tempo em questão, sendo medido, normalmente, em  $J/m^2$  ou  $Wh/m^2$ .

Um conceito sempre usado nos modelos de irradiância solar é que a irradiância solar extraterrestre é aquela incidente sobre uma superfície horizontal, considerando-se uma superfície plana fora da atmosfera terrestre paralela ao solo, onde a face desta superfície (normal ao raio central) fica voltada para o Sol e recebe o máximo possível de irradiância solar ( $I_{b0,n}$ ). Se a superfície não é normal aos raios solares, a

irradiância sobre ela será reduzida com o cosseno do ângulo entre o vetor normal e o vetor que aponta diretamente para o centro do sol (ALVES, 2008). Este conceito é ilustrado na Figura 2.1.

Na Figura 2.1 pode-se ver que a taxa em que a energia incide em ambas as superfícies é a mesma. Porém, a área da superfície A é maior em relação à sua projeção, a superfície hipotética B, fazendo com que a quantidade de energia incidente por unidade de área em A seja menor que em B.

Figura 2.1 – Efeito cosseno sobre o conceito de irradiância extraterrestre



Fonte: (ALVES, 2008) (adaptado)

A irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície paralela ao solo é dada por (2.1) (ALVES, 2008).

$$I_{bo,h} = I_{bo,n} \cos \theta_i \quad (2.1)$$

Em que:

$I_{bo,h}$ : irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal, em  $W/m^2$ ;

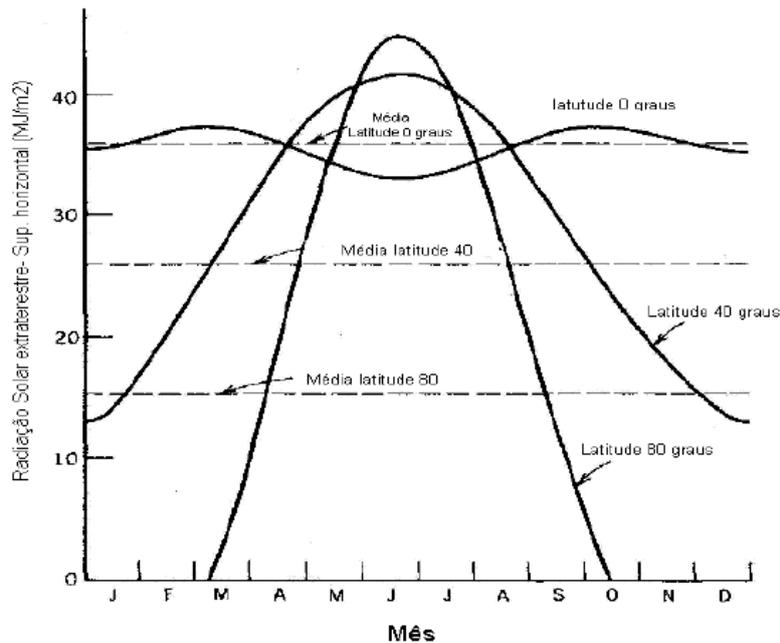
$\theta_i$ : ângulo entre as superfícies A e B, que é o mesmo ângulo que os raios solares fazem com a normal à superfície terrestre, conhecido como ângulo de incidência.

A redução da irradiância pelo cosseno do ângulo formado pelos raios solares e a reta normal à superfície da Terra é conhecida como efeito cosseno, que é um conceito extremamente importante na otimização da orientação de coletores solares (ALVES, 2008).

Devido ao efeito cosseno, a irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal varia ciclicamente com a rotação da Terra em torno de seu eixo.

Com o uso de valores conhecidos para os ângulos Terra-Sol, podem ser feitos os cálculos da irradiância solar extraterrestre incidente sobre uma superfície horizontal em localidades de diferentes latitudes durante um ano, e os resultados permitem aferir conclusões importantes sobre a entrega de energia pelo Sol à Terra neste período (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Variação sazonal da radiação solar extraterrestre diária incidente sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre



Fonte: (PAIVA, 2009)

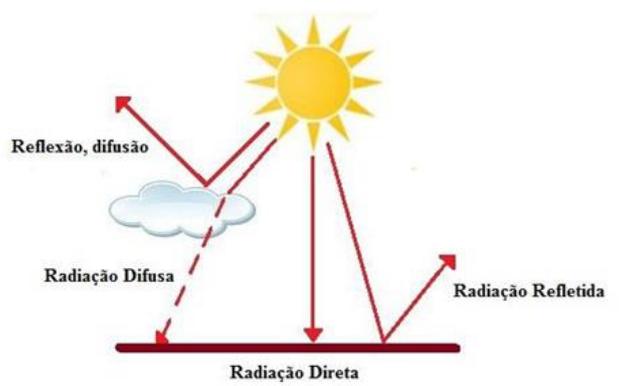
Integrando-se os valores diários de irradiância ao longo do ano, encontram-se resultados maiores para o Equador e menores para os pólos, os quais perdem boa parte da energia disponível devido ao efeito cosseno (PAIVA, 2009).

Supondo-se uma superfície que não esteja em posição horizontal (paralela ao solo), mas em posição sempre perpendicular à direção dos raios solares incidentes, e ainda considerando-se que esteja acima da atmosfera terrestre, a irradiância solar total que atinge no período de um ano é essencialmente a mesma, independente da latitude. Isto se deve ao fato que, em qualquer lugar da Terra ocorrem, anualmente, 4.380 horas de luz do Sol, o que resulta em uma duração média de 12 horas para um dia de luz solar (PAIVA, 2009).

Nem toda a irradiação solar (luz e calor) que atinge as camadas mais externas da atmosfera terrestre consegue chegar ao nível do solo. A maior parte é refletida de volta

ao espaço ou absorvida pela atmosfera, e somente uma pequena parcela chega à superfície. Esta parcela pode ser dividida em duas componentes, a componente direta e a componente difusa, conforme ilustrado na Figura 2.3 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Figura 2.3 – Ilustração das componentes da irradiação solar ao nível do solo



Fonte: (FOCUSOLAR, 2016)

Se a superfície de incidência da irradiação solar apresentar alguma inclinação com a horizontal, haverá mais uma parcela que será refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, terreno rochoso). Denomina-se de albedo ( $\rho$ ) o índice de reflexão dessas superfícies (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Em um dia de céu claro, a irradiação solar direta representa por volta de 80% a 90% da quantidade total de energia solar atingindo a superfície da Terra. O bloqueio local da componente direta produz sombras. Em um dia nublado ou com nevoeiro, no qual não se pode ver o Sol, a componente direta é essencialmente zero e não existem sombras. A componente direta é de grande interesse para os projetistas de sistemas de energia solar de altas temperaturas porque esta pode ser concentrada em pequenas áreas utilizando-se espelhos ou lentes, o que não é possível com a componente difusa (ALVES, 2008).

A componente difusa da irradiação solar é a que permite às pessoas enxergarem na sombra. Sem esta componente, o céu apareceria negro e as estrelas seriam visíveis o dia todo. Os primeiros astronautas descreveram este fenômeno quando o observaram a partir da Lua, onde não há atmosfera para espalhar a irradiação solar (ALVES, 2008).

A irradiação difusa é o resultado do espalhamento da irradiação solar, ao atravessar a atmosfera, em direção ao solo pelas partículas, denominados aerossóis, e moléculas de gases. A intensidade do espalhamento depende da quantidade de água e

poeira na atmosfera e também da altitude do observador em relação ao nível do mar (ALVES, 2008).

O cálculo para se determinar a irradiação solar  $I$  em uma determinada superfície pode ser feito através de (2.2).

$$I = I_b \cos\theta_i + I_d + I_r \quad (2.2)$$

Onde  $I_b$  representa a irradiação direta do Sol,  $I_d$  a irradiação difusa,  $I_r$  a irradiação refletida pelo entorno, e  $\theta_i$  o ângulo de incidência dos raios solares em uma determinada superfície.

A disponibilidade da irradiação solar, também denominada de energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local, estação do ano (variável com a longitude), horário do dia e condições climáticas, sendo dado necessário para o dimensionamento de sistemas FV, pois demonstra o recurso solar disponível (CRESESB, 2006). Para a medição da quantidade de energia solar disponível num dado local e a duração dessa disponibilidade, de acordo com CRESESB (2006), existem instrumentos, como:

- a) piranômetro: mede a irradiância global, com o uso de uma termopilha, possuindo modelos de primeira (2 % de precisão) e segunda classe (5 % de precisão);
- b) actinógrafo: mede a irradiância global, sendo considerado instrumento de terceira classe (15 a 20 % de precisão);
- c) pireliômetro: mede a irradiância direta;
- d) heliógrafo: registra a duração do brilho solar.

## 2.2 Geração fotovoltaica

A principal forma de geração de energia elétrica através da energia do Sol se dá pelo uso de módulos FV. Nas últimas décadas houve uma enorme aposta na geração FV, algo que veio a inovar o sistema de produção energética e aproveitar os recursos que a natureza fornece. A utilização da geração FV somente é possível graças à evolução do conhecimento científico e ao desenvolvimento tecnológico ocorrido neste percurso histórico. Esses progressos levaram ao desenvolvimento, por exemplo, de módulos FV com tempo de vida e eficiência cada vez melhor.

A utilização da geração FV tem crescido em todo o mundo, movida pelas metas de desenvolvimento sustentável e pela diminuição dos custos dos equipamentos envolvidos neste tipo de geração, apresentando um balanço positivo entre as vantagens e as desvantagens da sua utilização.

Como vantagens deste tipo de tecnologia, pode-se citar:

a) fonte de energia limpa, renovável e inesgotável, com impactos ambientais reduzidos, não havendo emissão de poluentes;

b) os módulos FV são de fácil instalação e se adequam a locais de difícil acesso, pois a sua instalação em pequena escala não obriga a um enorme investimento em linhas de transmissão;

c) modularidade, podendo ser utilizada em aplicações tanto de baixa como de alta potência;

d) os módulos e os demais equipamentos envolvidos possuem baixa necessidade de manutenção;

e) a vida útil dos módulos pode superar os 30 anos (SolarThermic, 2016);

f) a variabilidade intraanual, em relação à média de longo prazo, da fonte de energia é menor do que a observada em outras formas de geração, como a hidroelétrica e a eólica, reduzindo as incertezas quanto a disponibilidade energética da fonte (EPE, 2012).

Entre as desvantagens desse tipo de geração, tem-se que:

a) a captação da energia incidente depende de fatores como tempo, clima e orientação do painel em relação ao Sol, com redução da geração em dias chuvosos e nublados e não aproveitamento da fonte de energia no período noturno;

b) o custo de compra e instalação dos equipamentos envolvidos ainda é elevado, apesar da tecnologia ter evoluído nos últimos anos;

c) a eficiência das células FV é baixa;

De modo a reduzir essas desvantagens e procurar tornar a geração FV mais atrativa e competitiva, pode-se fazer uso de determinadas estratégias, como:

a) maximizar a transferência de energia do módulo para a carga: faz-se uso de técnicas de procura de ponto de máxima potência, com os seguidores MPPT (do inglês *Maximum Power Point Tracker*), da curva característica de tensão por corrente do módulo, de modo a garantir o casamento de impedância entre o módulo e a carga, fazendo com que se possa extrair a máxima potência disponível a cada momento do módulo;

b) aumentar a eficiência das células FV: uma melhora no rendimento dos módulos ocorre com um aumento na eficiência das células componentes. Por isso, constantemente têm sido feitas pesquisas em busca de materiais que promovam esse aumento na eficiência;

c) aumentar a captação da energia incidente no módulo: a irradiação solar incidente em um módulo FV pode ser maximizada através do uso do seguimento solar, que tem como objetivo procurar manter o módulo perpendicular aos raios solares incidentes.

### **2.2.1 Efeito fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico (*foto* vindo do grego para luz e *volt* da unidade no sistema internacional para tensão elétrica), inicialmente relatado pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, denominada de célula FV, produzida pela absorção da irradiação solar (ALVES, 2008).

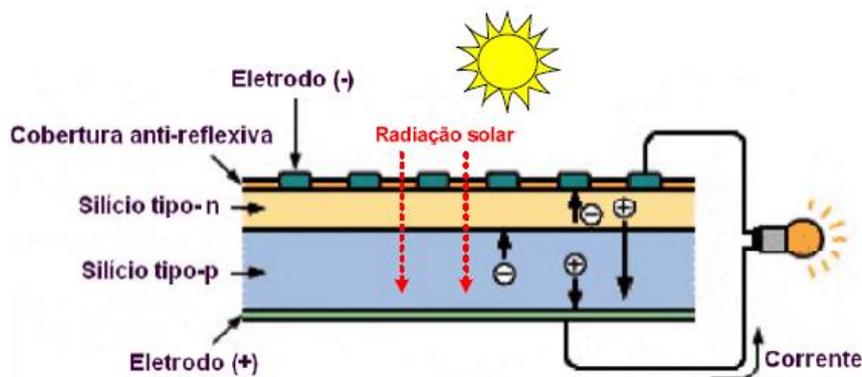
Uma célula FV é constituída da justaposição de duas camadas de material semicondutor tetravalente (em geral, o silício) dopadas. Uma camada possui dopagem de átomos trivalentes (em geral, o boro), chamada camada tipo-p (positivamente carregada), e a outra possui dopagem de átomos pentavalentes (em geral, o fósforo), chamada camada tipo-n (negativamente carregada) (ALVES, 2008).

Essa justaposição forma uma junção pn no *gap* de energia no silício. À temperatura ambiente, existe energia suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso no fósforo estejam livres e para que todas as lacunas nos átomos de boro possam se deslocar. Na junção pn os elétrons livres do lado n migram para o lado p, criando-se uma falta de elétrons no lado n e um aumento de elétrons no lado p. Este processo alcança o equilíbrio quando o campo elétrico criado impede a passagem de elétrons livres remanescentes no lado n para o lado p (ALVES, 2008).

Essa neutralidade elétrica é rompida no momento que fótons, presentes na irradiação solar, com energia superior ao *gap* incidirem nessa junção, onde o campo elétrico seja diferente de zero, havendo assim uma excitação dos elétrons presentes neste material e, conseqüentemente, com a movimentação de cargas, ocorrerá o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades do silício, que, ao serem conectadas por um fio externo, fará com que circule uma corrente elétrica contínua através desse fio, como

ilustrado na Figura 2.4. Essa é a base do funcionamento de uma célula FV (ALVES, 2008).

Figura 2.4 – Estrutura de uma célula fotovoltaica em corte, com a indicação do fluxo de elétrons



Fonte: (ALVES, 2008)

Um fator limitador do processo de conversão de energia solar em eletricidade é o seu espectro de irradiação. Apenas uma parcela deste espectro, em uma faixa inferior a 1 $\mu$ m é capaz de excitar os elétrons em células de silício. Outro fator limitador é que cada fóton só consegue excitar um elétron. Logo, fótons com energia maior que a energia do *gap* haverá um excesso de energia que será transformado em calor, que poderá prejudicar o funcionamento da fotocélula. Além disto, nem todos os elétrons excitados contribuirão para a corrente. Em células de silício, o limite teórico de conversão é de 27% (PAIVA, 2009).

### 2.2.2 Células e módulos fotovoltaicos

Uma célula FV pode ser fabricada usando diversos tipos de semicondutores, porém na maioria das vezes é utilizado o silício, pois tem se mostrado o mais confiável e o mais barato para a maioria das aplicações de energia solar, sendo o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre. O silício pode ser classificado de acordo com a sua estrutura molecular em monocristalino, policristalino ou silício amorfo, sendo este último constituinte de uma célula de filme fino (CRESESB, 2006).

Um módulo FV é formado por um arranjo de células associadas eletricamente e encapsuladas. Tendo em vista que uma célula FV produz pouca energia, com tensão em torno de 0,4 V e densidade de corrente da ordem de 30 mA/cm<sup>2</sup>, as células podem ser associadas em série e/ou paralelo, dependendo dos parâmetros elétricos (tensão, corrente

e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina. Ao se juntar células em série há um aumento da tensão e ao se juntar em paralelo há um aumento da corrente (PAIVA, 2009).

### 2.2.2.1 Parâmetros elétricos

A potência de um módulo FV é expressa pela potência de pico (Wp), especificada em condições padrões de teste, ou STC (*Standard Test Conditions*): irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula de 25 °C e massa de ar de 1,5 (distância que a luz percorre na atmosfera, onde a massa de ar igual a 1 significa uma atmosfera) (CRESESB, 2014).

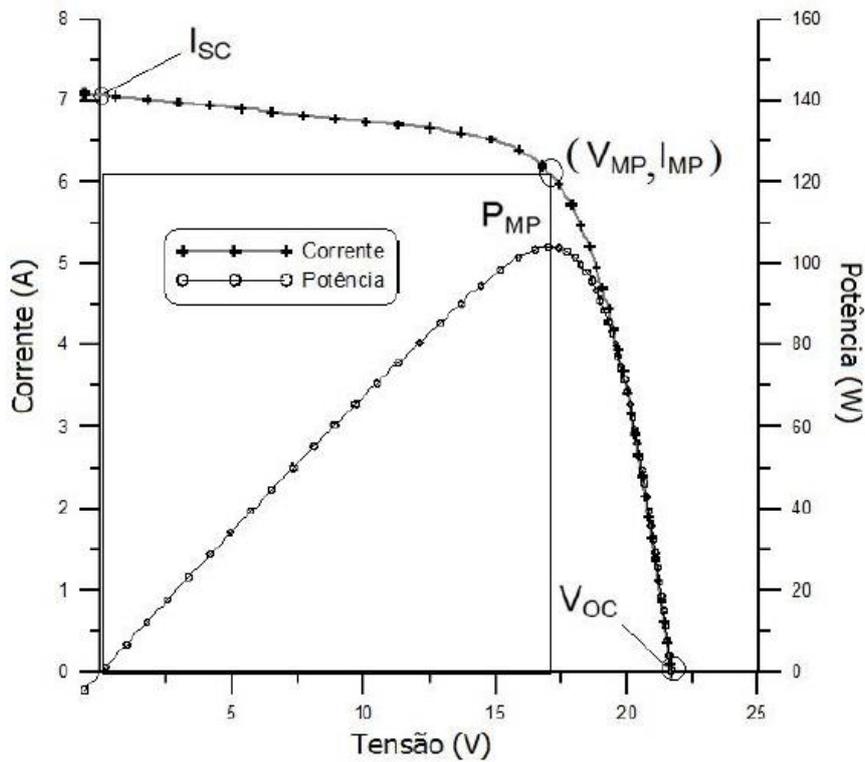
A Figura 2.5 ilustra um exemplo de característica corrente *versus* tensão (I x V) e potência *versus* tensão (P x V) de um módulo FV, onde pode se observar alguns outros parâmetros importantes de um módulo (CRESESB, 2006):

- a) V<sub>OC</sub> (tensão de circuito aberto): valor de tensão de saída do módulo sem nenhuma carga conectada (circuito aberto). Maior valor de tensão fornecida pelo módulo;
- b) I<sub>SC</sub> (corrente de curto-circuito): valor de corrente de saída do módulo quando os terminais de saída são curto-circuitados. Maior valor de corrente fornecida pelo módulo;
- c) P<sub>MP</sub> (ponto de máxima potência): máxima potência do módulo;
- d) I<sub>MP</sub> (corrente de máxima potência): valor de corrente para o qual há a produção da máxima potência pelo módulo;
- e) V<sub>MP</sub> (tensão de máxima potência): valor de tensão para o qual há a produção da máxima potência pelo módulo.

Outro parâmetro importante de um módulo é o seu fator de forma FF (ou de preenchimento), que é uma grandeza que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I x V. Quanto melhor a qualidade das células mais próximo da unidade será este fator (CRESESB, 2014), de acordo com (2.3).

$$FF = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (2.3)$$

Figura 2.5 – Curva característica I x V e curva de potência P x V de um módulo FV de 100 Wp



Fonte: (CRESESB, 2014)

Também é importante se ter conhecimento da eficiência ( $\eta$ ) do módulo FV, que representa a taxa de aproveitamento na conversão da energia solar em elétrica, obtido por (2.4) (CRESESB 2014).

$$\eta = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{G * A} * 100 \text{ [%]} \quad (2.4)$$

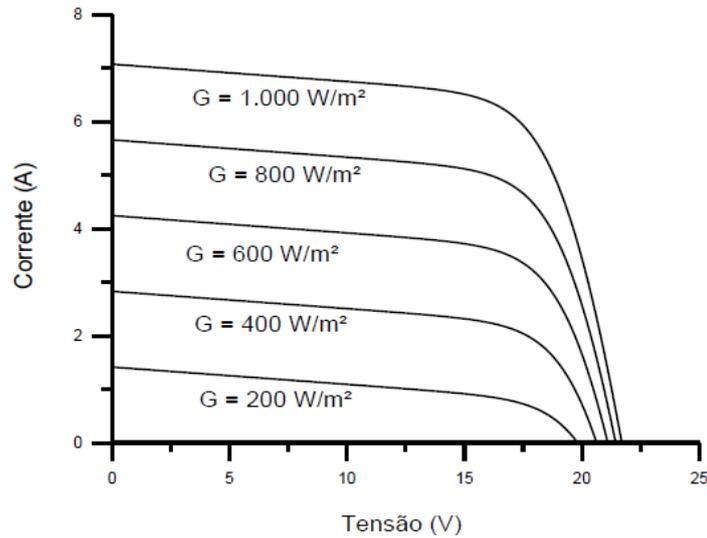
O parâmetro A indica a área do módulo em  $m^2$ , obtida a partir das dimensões fornecidas na folha de dados do fabricante, de acordo com normas técnicas. A variável G indica a irradiância solar incidente sobre o módulo, em  $W/m^2$ , sendo igual a  $1000 W/m^2$  quando se desejar obter a eficiência em condições STC (CRESESB, 2014).

### 2.2.2.2 Fatores que influenciam nas características elétricas

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um módulo FV são a irradiância solar incidente e a temperatura das células (CRESESB, 2014).

A corrente gerada pelo módulo aumenta com o aumento da irradiação solar incidente, conforme pode-se observar pela Figura 2.6, onde a corrente de curto circuito tem um aumento linear (CRESESB, 2014).

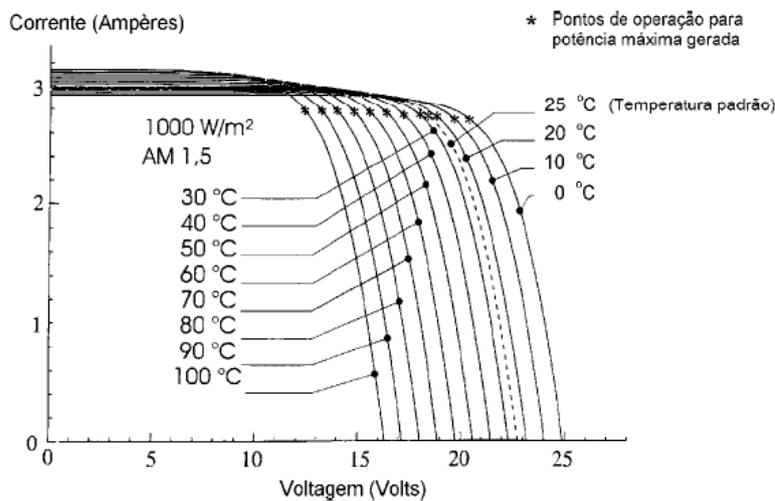
Figura 2.6 – Efeito causado pela variação da irradiação solar sobre a curva característica de um módulo FV de 36 células de silício cristalino a 25°C



Fonte: (CRESESB, 2014)

O aumento da temperatura das células de um módulo faz com que haja uma queda importante na tensão e uma elevação muito pequena da corrente, reduzindo assim os valores dos pontos de máxima potência, como ilustrado na Figura 2.7 (CRESESB, 2006).

Figura 2.7 – Efeito causado pela variação da temperatura nas células de um módulo FV



Fonte: (CRESESB, 2006)

Outro fator que deve se levar em consideração é a possibilidade de sombreamento na superfície do módulo em determinado instante. Esse sombreamento pode acontecer quando há perdas de orientação em sistemas que utilizam seguidores solares, quando não é respeitada a distância mínima entre as *strings*, ou filas, de módulos em um arranjo FV, ou quando há um depósito de sujeira sobre o vidro.

As células FV que estão sofrendo o sombreamento, e recebendo uma menor irradiância solar, passam a se comportar como um fator limitador à passagem de corrente elétrica, já que a sua corrente irá limitar a corrente de todo o conjunto de células em série. Isso ocasiona perdas na eficiência dos módulos e pode causar aquecimento na parte sombreada, com consequentes danos ou a destruição do módulo, já que a potência gerada que não está sendo entregue é dissipada (CORTEZ, 2013).

Para contornar esse problema de aquecimento, os módulos são normalmente protegidos com diodos de desvio (*by-pass*), que oferecem um caminho alternativo para a circulação da corrente e, assim, limitam a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas. Isso reduz simultaneamente a perda de energia e o risco de dano irreversível das células afetadas, o que inutilizaria o módulo (CRESESB, 2014).

Por último, vale ressaltar que com o tempo ocorre a degradação de potência dos módulos. Para módulos de silício cristalino instalados em campo a queda é de 0,5 % a 1 % ao ano (CRESESB, 2014).

### **2.2.3 Sistemas fotovoltaicos**

Um sistema FV pode ser definido como o conjunto de dispositivos e equipamentos responsáveis por fazer a conversão da energia incidente do Sol em energia elétrica. Os componentes de um sistema FV podem variar dependendo da aplicação e das características das cargas a serem alimentadas. Os principais componentes são (EPE, 2012):

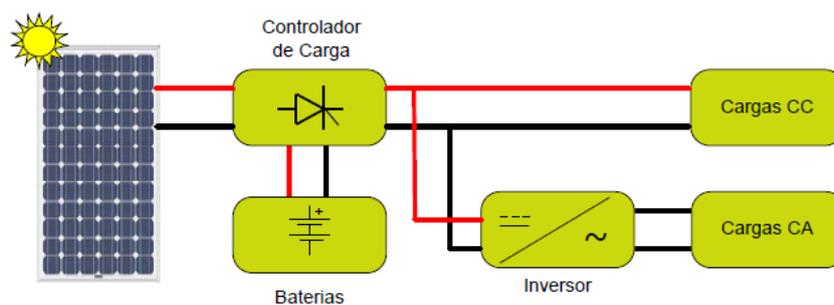
- a) arranjo FV: módulo ou conjunto de módulos FV, que geram energia elétrica em corrente contínua;
- b) banco de baterias: responsável pelo armazenamento de parte da energia gerada pelo arranjo FV;
- c) controlador de carga: dispositivo com função de gerenciar o processo de carga e descarga das baterias, evitando sobrecarga ou descarga excessiva e, consequentemente, aumentando a sua vida útil;

d) inversor: responsável pela conversão da corrente contínua fornecida pelo arranjo FV em corrente alternada, quando demandado pela carga, por manter a sincronia com a rede elétrica em um sistema conectado à rede, fazer o reconhecimento de defeitos internos a instalação e proteções de sobretensão e sobrecorrente, além de realizar o ajuste contínuo do ponto de máxima potência em função da temperatura e irradiação, e fazer a adequação do comportamento dinâmico da geração em resposta às necessidades específicas da rede elétrica ou da carga.

Os sistemas FV podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte solar ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos (CRESESB, 2014).

Os sistemas isolados, ou autônomos, em geral, possuem dispositivo para armazenamento da energia gerada. Essa energia pode ser armazenada em baterias ou em outras formas de armazenamento, como na forma de energia potencial gravitacional, quando a água é armazenada em tanques de sistemas de abastecimento ou de irrigação, ou como o ar comprimido e a produção de hidrogênio (CRESESB, 2014). Um exemplo de sistema autônomo é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Sistema de geração fotovoltaica isolado



Fonte: (ALVES, 2008)

Nos sistemas híbridos há a presença de outras fontes de geração interligadas, como aerogeradores e grupos geradores à diesel, para suprir a demanda em horários de menor geração de energia por parte dos módulos FV. São usados em sistemas de médio e grande porte, pois sua complexidade operacional e de manutenção é maior.

Nos sistemas conectados à rede, o arranjo FV é ligado diretamente à rede elétrica, sem unidade de armazenamento, por meio de inversores, que devem atender

requisitos de qualidade e segurança, para não degradar a qualidade do sistema elétrico conectado. A regulação não permite a operação ilhada desses sistemas, ou seja, em caso de falta de energia na rede, o sistema FV deixa de funcionar (CRESESB, 2014).

#### ***2.2.4 Geração fotovoltaica no Brasil***

Com relação ao Brasil, primeiramente analisando-se o potencial para o desenvolvimento da geração FV, tem-se que devido à sua localização geográfica, o país possui uma extensa área com potencial para exploração da irradiação solar com condições favoráveis durante praticamente o ano inteiro, principalmente no nordeste, que possui em média 2500 horas por ano de insolação (FUNCEME, 2010), em regiões secas de baixa latitude e no litoral leste, com valores médios anuais de irradiação entre 1200 e 2400 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Estes valores são superiores à maioria dos países europeus, como Alemanha (1250 kWh/m<sup>2</sup>/ano), França (entre 900 e 1650 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e Espanha (entre 1200 e 1850 kWh/m<sup>2</sup>/ano) (EPE, 2012).

Se fosse aproveitada a energia solar captada em menos de 3% da área urbanizada, seria possível cobrir 10% da demanda atual de energia elétrica do Brasil (MOREIRA; MILLIKAN, 2012).

Outro ponto forte para o desenvolvimento da geração FV no país é a presença de aspectos favoráveis para o estabelecimento de uma indústria FV, segundo CGEE (2010). O primeiro deles é o fato do país deter uma das maiores reservas mundiais de quartzo de qualidade, mineral de onde o silício é extraído. Outro ponto forte é o fato de já possuir indústrias estabelecidas de beneficiamento do silício, embora apenas até o grau metalúrgico, insuficiente para utilização em aplicações solares. Segundo CGEE (2010), o Brasil detém tecnologia para a fabricação de células e módulos FV.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) possui uma planta piloto em operação, que produz módulos com tecnologia competitiva e depende de um mercado consumidor para aumentar a escala de produção (EPE, 2014).

Um último ponto forte é o fato de já existir indústria de componentes elétricos e eletrônicos no país e a mesma poder se adaptar, atendendo às especificações, rapidamente e sem grandes dificuldades para fornecimento de disjuntores, acumuladores, inversores e conectores, em resposta a demanda da geração FV (EPE, 2014).

A tecnologia FV é madura, confiável e tecnicamente viável. No entanto, a falta de um mercado consolidado no país faz seu custo de geração ainda ser alto em

comparação aos valores médios praticados no mercado elétrico nacional, embora sua utilização possa resultar em uma série de benefícios (MOCELIN, 2014).

O apoio governamental é muito decisivo na diversificação da matriz energética, uma vez que novas tecnologias geralmente são caras e pouco difundidas, devendo o governo estimulá-las.

Apesar da falta de incentivos e de políticas públicas que estimulem a disseminação de sistemas FV, o prognóstico aponta para o fato de haver interesse de empresas e instituições no desenvolvimento do setor e na difusão do uso de sistemas FV, principalmente sua aplicação em centros urbanos, o que permitiria atingir maior parte da população (NEGREIROS, 2015).

Aliado a este interesse, a expansão da energia solar FV no Brasil apresenta avanços principalmente nas esferas da regulamentação e da normatização (NEGREIROS, 2015). Desde a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 1996, vários decretos, leis e resoluções tiveram relação direta ou indireta com o incentivo ao uso de energias renováveis no Brasil. Nos últimos anos, o contexto político-regulatório sinalizou avanços que favorecem particularmente a implantação da tecnologia FV, destacando-se neste contexto a atuação da ANEEL, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), cujos esforços para publicação de resoluções, normas técnicas e portarias trouxeram regras claras para as concessionárias de energia e garantias técnicas e comerciais para os consumidores, promovendo um cenário de segurança jurídica para investidores (NEGREIROS, 2015).

Neste contexto, pode-se destacar a aprovação da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, que dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica. Além dessa lei da universalização, a Resolução ANEEL nº 493, de 05 de junho de 2012, que regulamenta o uso de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica por Fontes Intermitentes (SIGFIs) e de Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDIs) para cumprimento das metas de universalização, e a Resolução nº 482/2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração (potência instalada até 75 kW) e minigeração (potência instalada entre 75 kW e 5 MW) distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e as regras para o sistema de compensação das concessionárias, são exemplos dos avanços ocorridos na esfera normativa. Com isso, é esperado um crescimento da geração descentralizada de fontes alternativas, devido ao sistema de compensação de energia gerada (NEGREIROS, 2015).

A tecnologia FV ainda não é competitiva com a rede elétrica, exceto em casos como sistemas para locais isolados ou localizados em centros urbanos com altos índices de irradiação e preço da tarifa elétrica elevado, como ocorre no Brasil em períodos de bandeira vermelha (MOCELIN, 2014).

Porém, os sistemas FV do tipo conectados à rede têm ganhado importância devido à sua potencial competitividade no futuro, associada com facilidades como modularidade e integração à arquitetura da edificação. Além disso, a geração descentralizada promove um consumo mais eficiente da eletricidade, pois evita o desperdício na transmissão e distribuição de energia por meio de longas linhas desde as usinas hidroelétricas e termelétricas até os principais locais de consumo (EPE, 2014).

A trajetória de aumento de eficiência e queda dos custos de implantação de sistemas FV em nível internacional contribui igualmente para aumentar a potencialidade de implantação efetiva no Brasil. Espera-se que a queda de preços deixe para trás a barreira econômica para o uso de sistemas solares pelo lado da demanda, diminuindo os entraves econômicos a curto e médio prazo.

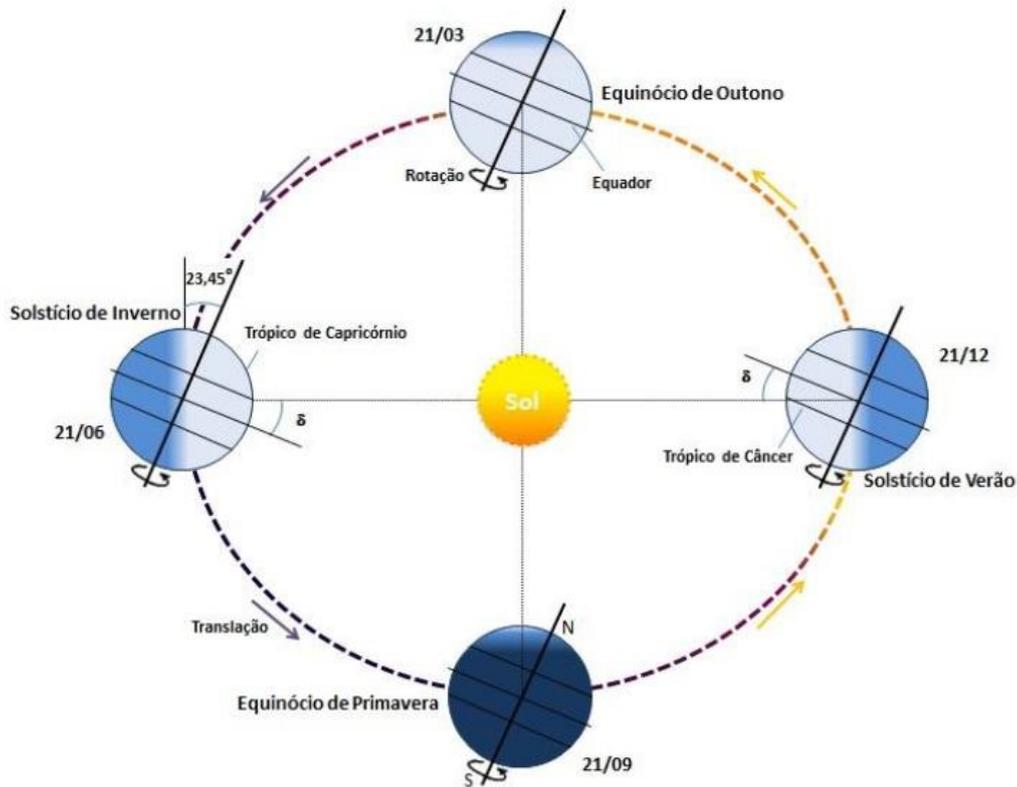
## **2.3 Posição do Sol**

Em qualquer sistema de uso da energia solar, e principalmente em sistemas de seguimento solar, é fundamental se ter o conhecimento da posição aparente do Sol em relação à Terra na localidade da superfície terrestre onde o sistema está instalado, de modo a procurar orientar o sistema solar da forma que promova o máximo de eficiência na captação dessa energia ao longo do dia. Para isso é importante conhecer quais os movimentos da Terra durante um dia e ao longo do ano.

### ***2.3.1 Os movimentos da Terra***

A Terra diariamente gira em torno do seu eixo, no movimento de rotação, e completa um giro em uma trajetória elíptica ao redor do Sol a cada 365,25 dias, no movimento de translação, como ilustrado na Figura 2.9. A rotação da Terra sobre o seu próprio eixo produz os dias e as noites, e a inclinação deste eixo em relação ao plano elíptico produz as estações, à medida que a Terra gira em torno do Sol.

Figura 2.9 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de  $23,45^\circ$ , indicando as estações do ano no hemisfério Sul



Fonte: (CRESESB, 2014)

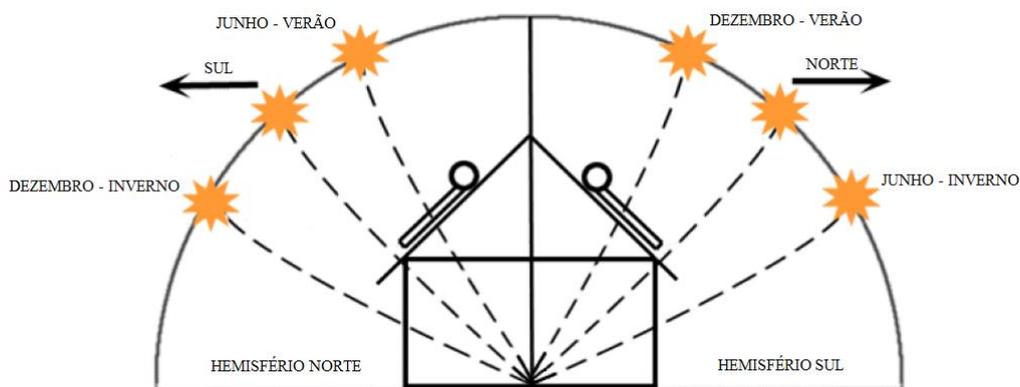
Os dias 21 de março e 21 de setembro são definidos como dias de equinócio e os dias 21 de junho e 21 de dezembro são definidos como dias de solstício. Nos dias de equinócio, a incidência da irradiação solar distribui-se uniformemente pelo hemisfério norte e hemisfério sul, ou seja, em qualquer lugar sobre a Terra, o Sol é visível (dia) durante exatas 12 horas e o tempo durante o qual não é visível (noite) também são exatas 12 horas. As datas apresentadas na Figura 2.9 podem variar um ou dois dias de acordo com o ano de interesse (NASCIMENTO, 2015).

Ao longo do ano, a distância entre a Terra e o Sol varia. A distância média Terra-Sol é de  $1,496 \times 10^{11}$  m (ou 1 UA – Unidade Astronômica). A Terra atinge a distância máxima, de  $1,52 \times 10^{11}$  m (ou 1,02 UA), do Sol no afélio (por volta do dia 4 de julho), e a distância mínima, de  $1,47 \times 10^{11}$  m (ou 0,98 UA), no periélio (por volta do dia 3 de janeiro) (ALVES, 2008).

Com isso, a irradiância solar extraterrestre é afetada, apresentando uma variação de intensidade durante o ano, com valor máximo de  $1412 \text{ W/m}^2$  e valor mínimo de  $1325 \text{ W/m}^2$  (GREENPRO, 2004).

Os movimentos de rotação e translação da Terra, aliados a outros fatores, como a latitude local, faz com que haja uma variação do ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre durante o dia e ao longo do ano, resultando em uma variação na quantidade de energia captada pelo sistema de uso da energia solar. Com isso, de modo a obter um maior aproveitamento da irradiação solar, deve-se ajustar a inclinação da superfície de captação solar de acordo com a latitude local e o período do ano, de modo que esses equipamentos estejam sempre recebendo a maior quantidade de energia possível no momento. No hemisfério sul, por exemplo, deve-se orientar o sistema de captação solar para o norte com um ângulo de inclinação similar ao da latitude local (ANEEL, 2002). O declive da superfície de captação, em condições ideais, deveria ser superior à latitude do local no inverno e inferior no verão, como se pode ver na Figura 2.10 para uma dada localidade.

Figura 2.10 – Variação da posição do Sol nos hemisférios em diferentes períodos do ano para uma dada localidade

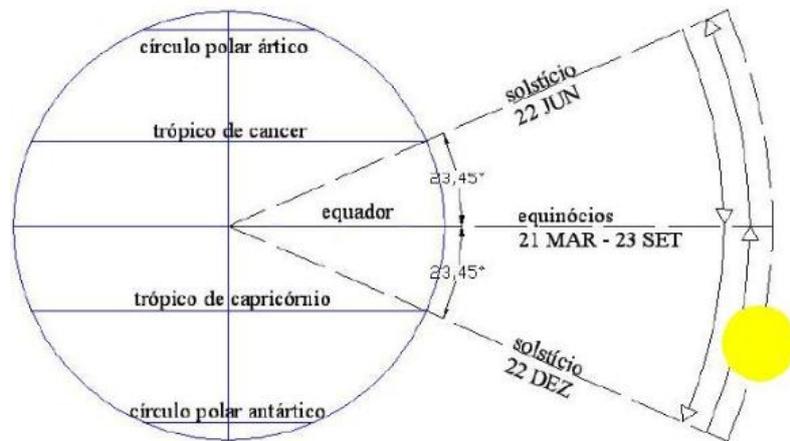


Fonte: (CORTEZ, 2013) (adaptado)

### 2.3.2 Ângulos para o seguimento solar

O eixo polar da Terra possui uma inclinação de  $23,45^\circ$  em relação à normal do plano da órbita terrestre, como ilustrado na Figura 2.9. Essa inclinação do eixo polar causa uma variação da trajetória do Sol entre o norte e o sul no decorrer do ano, ocasionando uma variação do ângulo de incidência dos seus raios em relação ao plano do equador. Esse ângulo é denominado de declinação ( $\delta$ ) e é mostrado na Figura 2.9. Por exemplo, um observador na linha do equador da Terra vê o Sol entre os dias 21 de março e 23 de setembro sempre ao norte, enquanto que, em todos os outros dias do ano, vê ao sul, como mostrado na conforme Figura 2.11.

Figura 2.11 – Movimento anual aparente do Sol na direção norte-sul, associado à variação da sua declinação



Fonte: (SHAYANI, 2006)

O ângulo de declinação pode ser calculado para cada dia do ano de forma aproximada por (2.5) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360 (nd + 284)}{365} \right] \quad (2.5)$$

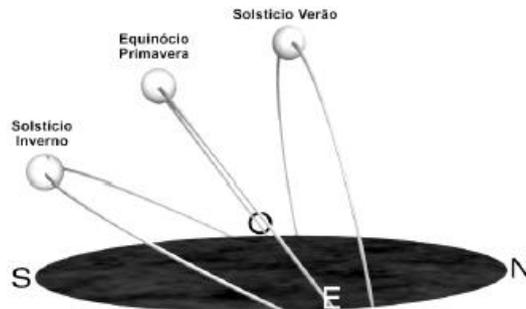
Onde  $nd$  é o número do dia no ano, variando de 1 a 365 para o período de 1° de janeiro a 31 de dezembro.

Como exemplo, calculando o valor de  $\delta$  para o dia 29 de setembro, que é o 273° dia do ano ( $nd = 273$ ), obtém-se que  $\delta = -3,82^\circ$ . Citando como exemplo a latitude da cidade de Fortaleza/CE, que é  $-3,75^\circ$  (MAPS OF WORLD, 2016), quer dizer que, no dia 29 de setembro de cada ano, o Sol estará aproximadamente acima desta cidade no horário próximo ao meio-dia, ou seja, um objeto qualquer estará acima da própria sombra.

Devido à declinação solar e aos movimentos de rotação e translação, em trajetória elíptica, da Terra, a duração do dia, ou período de visibilidade do Sol durante cada dia, varia conforme região e período do ano, entre 0 e 24 horas. Essa variação é mais intensa nas regiões polares e nos períodos de solstício (21 de junho, quando a declinação alcança seu valor máximo de  $23,45^\circ$ , e 21 de dezembro, quando a declinação tem o valor mínimo de  $-23,45^\circ$ ) e menos intensa em regiões próximas à linha do Equador e nos períodos de equinócio (23 de setembro e 21 de março), quando a declinação é igual a

zero. A Figura 2.12 mostra a variação ao longo do ano do movimento diário do Sol, devido a declinação solar, para uma dada localidade.

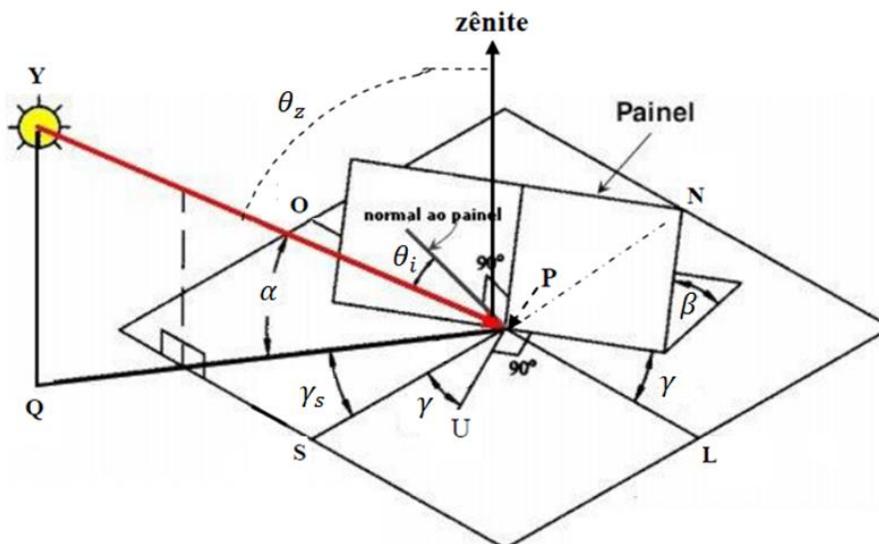
Figura 2.12 – Variação ao longo do ano do movimento diário do Sol, devido a declinação solar, em uma dada localidade



Fonte: (TREVELIN, 2014)

Para a determinação da posição do Sol durante o dia e ao longo do ano, faz-se uso de determinados ângulos formados entre um plano, por exemplo um painel FV, em uma orientação particular num dado instante, a irradiação direta incidente, que é a posição relativa do Sol em relação ao plano, e os eixos cardeais norte-sul e leste-oeste. A Figura 2.13 ilustra esses ângulos.

Figura 2.13 – Representação de ângulos formados entre um painel FV, os eixos cardeais e o raio incidente do Sol



Fonte: (RIBEIRO; PRADO; GONÇALVES, 2012) (adaptado)

A partir da Figura 2.13, tem-se que (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

a)  $\alpha$ : ângulo de altitude, ou altura, solar, formado entre a projeção P-Q do raio incidente do Sol no plano horizontal, formado pelos eixos cardeais, e a reta Y-P do próprio raio incidente, no sentido horário.  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ;

b)  $\theta_z$ : ângulo de zênite, ou ângulo zenital, formado entre a reta Y-P do raio incidente do Sol e a reta normal (zênite) ao plano horizontal dos eixos cardeais, no sentido horário. É o complemento do ângulo de altura solar;

c)  $\gamma_s$ : ângulo de azimute solar, formado entre o eixo norte-sul e a projeção P-Q do raio incidente do Sol. É positivo e contado no sentido horário em direção ao oeste e é negativo e contado no sentido anti-horário em direção ao leste.  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ ;

d)  $\gamma$ : ângulo de azimute da superfície, formado entre o eixo norte-sul e a projeção P-U da reta normal ao painel. É positivo e contado no sentido horário em direção ao oeste e é negativo e contado no sentido anti-horário em direção ao leste.  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ;

e)  $\theta_i$ : ângulo de incidência, formado entre o raio incidente e a reta normal à superfície do painel;

f)  $\beta$ : ângulo de inclinação do painel em relação ao plano horizontal;

A posição do Sol pode ser obtida a partir dos valores dos ângulos de azimute solar  $\gamma_w$  e da altura do Sol  $\alpha$ . O ângulo da altura solar  $\alpha$  pode ser obtido por (2.6) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\text{sen}\alpha = \text{sen}\varnothing \text{sen}\delta + \text{cos}\varnothing \text{cos}\delta \text{cos}w \quad (2.6)$$

Onde  $\varnothing$  representa a latitude local e  $w$  o ângulo horário, o ângulo do Sol em relação ao meio dia, que é calculado por meio de (2.7) (ALVES, 2008).

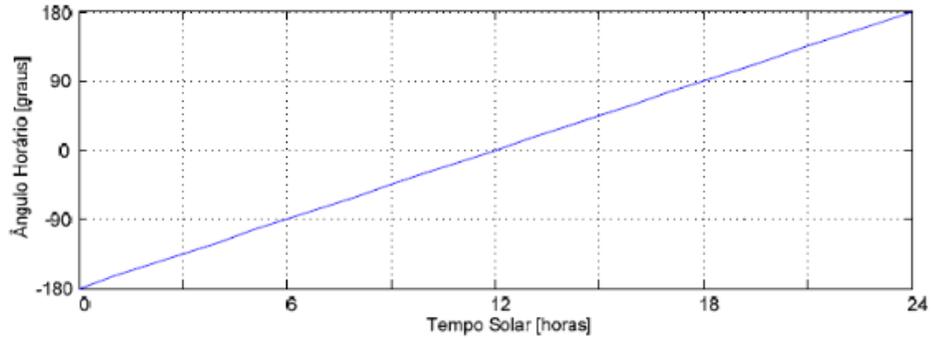
$$w = 15(h - 12) \quad (2.7)$$

Onde  $h$  é a hora local, expressa em fração de horas, de 0 hora até as 24 horas.

O ângulo horário começa a ser contado a partir do meio dia, ou seja, às 12 horas tem seu valor igual a zero, com valores positivos à tarde e negativos pela manhã. A

cada hora o ângulo horário aumenta  $15^\circ$ , completando um ciclo de  $360^\circ$  a cada 24 horas, podendo variar de  $-180^\circ$  até  $+180^\circ$ , conforme ilustra a Figura 2.14.

Figura 2.14 – Variação do ângulo horário durante o dia



Fonte: (ALVES, 2008)

O ângulo de zênite pode ser obtido através de uma das seguintes equações (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\cos\theta_z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos w \quad (2.8)$$

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (2.9)$$

O ângulo de azimute solar  $\gamma_s$  pode ser calculado através de (2.10) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\gamma_s = f(w) * \left| \cos^{-1} \left( \frac{\sin\alpha \sin\phi - \sin\delta}{\cos\alpha \cos\phi} \right) \right| \quad (2.10)$$

Onde  $f(w)$  é igual a 1, se  $w$  for positivo, e é igual a -1, se  $w$  for negativo.

O ângulo de incidência  $\theta_i$  é um parâmetro importante na determinação da quantidade de irradiação direta que está incidindo sobre o painel, pois como visto em (2.1), quanto maior for esse ângulo menor será a irradiação solar direta colhida pelo sistema. Esse ângulo de incidência pode ser obtido, de forma simplificada, por meio de (2.11) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\cos\theta_i = \cos\beta \cos\theta_z + \sin\beta \sin\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.11)$$

A Tabela 2.1 mostra as perdas percentuais na captação da irradiação direta envolvendo determinados ângulos de incidência.

Tabela 2.1 – Perdas na captação da irradiação direta em função do ângulo de incidência

ângulo de incidência (i)	Perda (1-cos(i))
0°	0%
1°	0,015%
3°	0,14%
8°	1%
15°	3,40%
23,4°	8,30%
30°	13,40%
45°	30%
60°	>50%
75°	>75%

Fonte: (MORAES, 2012)

A partir do conhecimento desses ângulos anteriormente citados, pode-se ter uma melhor noção da posição do Sol durante o dia e ao longo do ano e, assim, pode-se fazer o projeto de um sistema de seguimento solar de maneira mais eficiente, de modo que os raios solares sempre incidam no sistema de captação solar com um ângulo que maximize a produção de energia elétrica ou térmica a partir da energia do Sol.

Também é importante ter conhecimento de alguns fatores que influenciam na capacidade de ganho que o sistema de seguimento solar pode fornecer em um dado momento do dia e em um determinado local. Um desses fatores é a massa de ar.

A massa de ar pode ser definida como a razão entre o caminho ótico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar (ABNT, 2006). A massa de ar “m” pode ser calculada por diferentes fórmulas. Uma das mais simplificadas é a (2.12) (VIANELLO; ALVES, 1991).

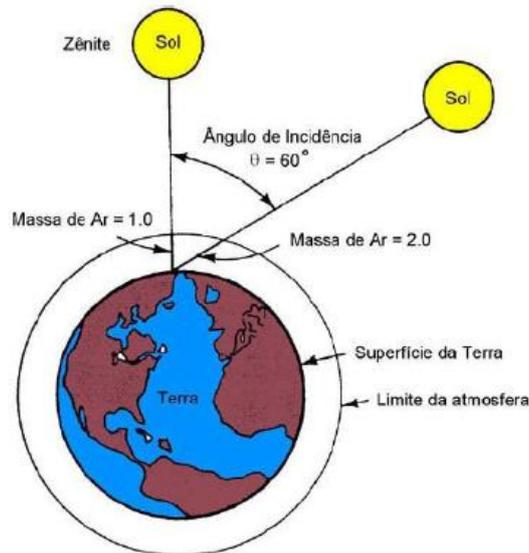
$$m = \frac{35}{\sqrt{1224 \cos^2 \theta_z + 1}} \quad (2.12)$$

Considerando que  $1224 \cos^2 \theta_z \gg 1$ , (2.12) se torna (2.13).

$$m \cong \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.13)$$

A partir de (2.13), pode-se ver que quanto menor for o ângulo de zênite  $\theta_z$ , menor será a massa de ar. Na Figura 2.15, pode-se ver que quando a massa de ar é maior, o caminho que os raios solares percorrem é maior antes de chegar na superfície terrestre, atravessando uma camada da atmosfera mais espessa e sofrendo mais com os efeitos da absorção e espalhamento.

Figura 2.15 – Espessura da massa de ar que é atravessada pelo Sol durante o dia



Fonte: (CRESESB, 2006)

Com isso, mesmo sabendo que, para um mesmo dia, os raios solares são enviados pelo Sol com a mesma intensidade durante todo o tempo, durante períodos do dia em que o ângulo de zênite é maior, como no começo da manhã e no final da tarde, haverá uma menor intensidade dos raios solares do que aquela emitida pelo Sol ao meio-dia.

Com isso, pode-se ver que a capacidade de aumento na captação da energia solar pelo sistema de seguimento solar varia ao longo do dia, devido a, entre outros fatores, a influência da massa de ar.

Outro fator importante é a latitude do local de instalação do sistema de seguimento solar. Conforme análise feita por Shayani (2006), quanto menor for o módulo

da latitude do local, maior será a capacidade de aproveitamento da irradiação solar, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Capacidade média de aproveitamento da irradiação solar por uma superfície de captação horizontal, em diversas latitudes

Latitude	Capacidade de aproveitamento [%]	Média anual do ângulo zenital [graus]
0°	97,23	13,5°
-10°	95,75	16,8°
-15°	93,92	20,1°
-20°	91,37	24,0°
-40°	74,48	41,9°
-60°	48,62	60,9°
-80°	16,88	80,3°
-90°	0	90°

Fonte: (SHAYANI, 2006)

Isso ocorre porque, devido à declinação solar, o ângulo de zênite médio anual é proporcional ao módulo da latitude. Com isso, quanto menor for o módulo da latitude, menor será o ângulo de zênite médio ao longo do ano e, conseqüentemente, menores serão os efeitos de atenuação da massa de ar. Isto fará com que uma maior parte da irradiação global seja composta pela irradiação direta, ao se diminuir a presença da componente difusa.

Portanto, como visto, a capacidade de aumento na captação da irradiação solar pelo sistema de seguimento varia conforme o período do dia e conforme o local de instalação do sistema.

## 2.4 Seguidores solares

Diversos pesquisadores se preocupam em aumentar o rendimento de um sistema FV, com estudos diversos que abrangem: associação de células (série e/ou paralela); associação de módulos (HECKTHEUER, 2001); efeito de sombreamento sobre módulos e células; inclinação de painéis em diferentes latitudes e períodos do ano (KACIRA *et al.*, 2004); (SHAYANI, 2006); seguimento do Sol para maior incidência direta dos raios solares sobre os módulos (POULEK *et al.*, 1998) (OLIVEIRA, 2007) (KARIMOV *et al.*, 2005); concentradores óticos que aumentam a quantidade de energia radiante sobre uma área determinada de módulos (POULEK *et al.*, 2000); novas tecnologias de seguidores MPPT (seguidor do ponto de máxima potência); e outros estudos que são desenvolvidos em centros e laboratórios de pesquisas (OLIVEIRA, 2008).

Uma das técnicas que merece destaque é o uso de sistema de seguimento solar, ou seguidores solares, que, dependendo da aplicação, com relativa simplicidade e baixos custos já conseguem fornecer ganhos importantes na energia solar captada pela superfície de captação solar.

A instalação de sistemas de seguimento solar em grandes centrais de geração FV conectadas à rede elétrica vem crescendo, pois o aumento de produção energética destas em relação aos sistemas fixos é significativo, como por exemplo, as centrais de Serpa em Portugal (MASO, 2007), Almaraz na Espanha (MECASOLAR, 2008), Alto do Rodrigues no Rio Grande do Norte, Nellis nos Estados Unidos da América, Monte Alto na Espanha, Erlasse na Alemanha e tantas outras (WIKIPEDIA, 2008). Sistemas de seguimento solar também estão sendo usados em grande número de instalações autônomas, pois a eletrônica de controle e mecânica usada nestes equipamentos teve seus custos reduzidos devido a novas tecnologias, que dispensam manutenções caras e altamente especializadas (OLIVEIRA, 2008).

#### ***2.4.1 Princípios de funcionamento***

Como visto anteriormente, quando os raios solares atingem uma superfície de uma forma não perpendicular, a intensidade luminosa se distribui em uma área maior, e assim a potência da incidência solar por metro quadrado diminui nesta superfície.

Os seguidores solares, também conhecidos como rastreadores, têm como objetivo aumentar a captação da irradiação solar pela superfície de captação, ao procurar sempre manter o plano da superfície perpendicular à irradiação solar incidente, situação mais favorável para o aproveitamento da energia incidente.

Um seguidor solar atua de forma a reduzir o ângulo de incidência da Figura 2.13, ao fazer o seguimento do movimento do Sol, basicamente, de duas formas: movimentando a superfície de captação solar em torno de um eixo, de modo a compensar variações na posição solar durante o dia, seja no movimento de leste a oeste ou seja no movimento de mudança da altura solar; ou movimentando a superfície em torno de dois eixos, de forma a acompanhar tanto o deslocamento do Sol na direção leste-oeste quanto a mudança da altura solar, que ocorre durante o dia e ao longo do ano.

O seguimento de leste a oeste é feito fazendo com que o ângulo de azimute da superfície seja igual ao ângulo de azimute solar, ao rotacionar a superfície em torno de um eixo paralelo ao eixo norte-sul. Já o seguimento para acompanhar a mudança da altura

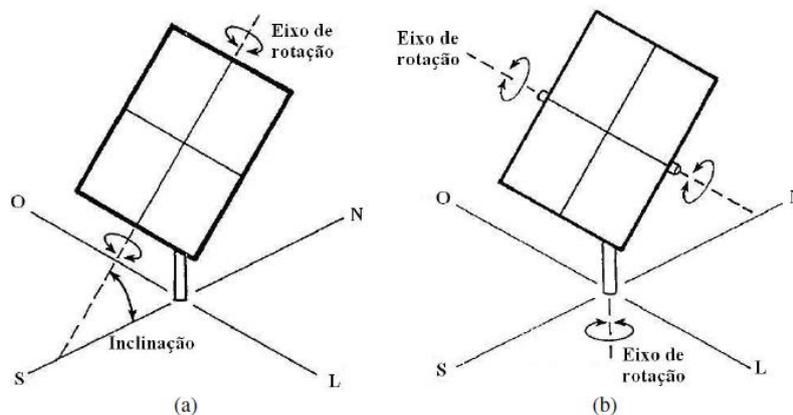
solar é feito fazendo com que o ângulo de inclinação da superfície em relação a horizontal seja igual ao ângulo de zênite, ao rotacionar a superfície em torno de um eixo paralelo ao eixo leste-oeste.

Os seguidores solares podem ser utilizados em basicamente todas as aplicações que usem energia solar, ou seja, tanto em módulos FV como em coletores planos, concentradores solares ou instrumentos de medição. Os seguidores podem ser classificados de acordo com o número de eixos rotativos e o tipo de controle utilizado.

#### 2.4.2 Classificação com relação ao número de eixos rotativos

O seguimento solar pode ser feito em torno de um eixo ou de dois eixos (Figura 2.16). Geralmente, quando só há um eixo rotativo, a movimentação deste eixo único se dá de forma a acompanhar o movimento diário do Sol de leste a oeste, o que na maioria das vezes, promove maiores ganhos do que o seguimento acompanhando a variação do ângulo de zênite durante o dia.

Figura 2.16 – Seguidores solares de (a) um eixo, movimentando-se em torno do eixo norte-sul, seguindo o Sol no sentido leste-oeste, e de (b) dois eixos



Fonte: (SHAYANI, 2006)

O seguimento em dois eixos promove maiores ganhos na captação da irradiação solar pela superfície em movimento em relação ao seguimento em um eixo, porém a complexidade e o custo do sistema são maiores.

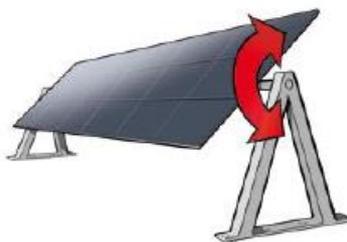
### 2.4.2.1 Seguidores de um eixo

Os seguidores de um eixo podem ser classificados, basicamente, de acordo com o tipo de disposição do eixo, em:

- a) seguidores de eixo horizontal;
- b) seguidores de eixo polar;
- c) seguidores de eixo vertical.

Nos seguidores de eixo horizontal, os módulos FV são montados em cima de um eixo em forma de um tubo horizontal, apoiado em suportes, como ilustrado na Figura 2.17. Esse tubo pode ser paralelo ao eixo norte-sul ou ao eixo leste-oeste. Este tipo de sistema permite a montagem de vários módulos sobre o mesmo eixo, com a necessidade de somente um sistema de controle para cada eixo, aumentando assim a eficiência do conjunto.

Figura 2.17 – Seguidor de eixo horizontal



Fonte: (CORTEZ, 2013)

O seguidor de eixo polar (Figura 2.18) apresenta um eixo inclinado, geralmente em um valor igual à latitude local, orientado na direção norte-sul e paralelo à superfície do coletor solar. A inclinação desse eixo, que é o eixo de rotação do seguidor, tem como objetivo fazer com que o coletor esteja perpendicular à irradiação solar nos equinócios da primavera e outono, apresentando um maior rendimento do que o seguidor de eixo horizontal.

O seguidor de eixo vertical, representado na Figura 2.19, apresenta um eixo fixo vertical à superfície terrestre e paralelo ao zênite, por onde a superfície irá rotacionar ao longo do dia. O ângulo de inclinação da superfície é obtido de acordo com a latitude local e é ajustado manualmente de acordo a estação do ano, promovendo um rendimento maior do que o seguidor de eixo polar (OLIVEIRA, 2008).

Figura 2.18 – Seguidor de eixo polar



Fonte: (AKIRA, 2012)

Figura 2.19 – Sistema com seguidores de eixo vertical



Fonte: (MORAES, 2012)

#### 2.4.2.2 Seguidores de dois eixos

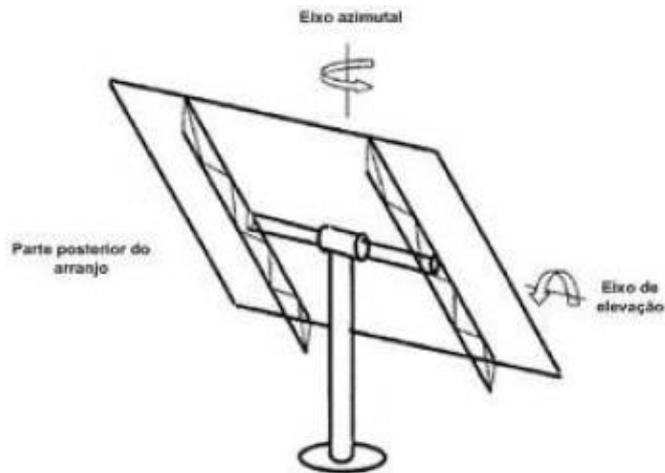
Os seguidores de dois eixos podem ser classificados de acordo com o tipo de estrutura em:

- a) seguidores com eixo em pedestal;
- b) seguidores com estrutura *roll-tilt*;
- c) seguidores com plataforma giratória.

Os seguidores com eixo em pedestal têm estrutura similar à mostrada na Figura 2.19, com a diferença de que a movimentação agora se dá em torno de dois eixos, como mostrado na Figura 2.20.

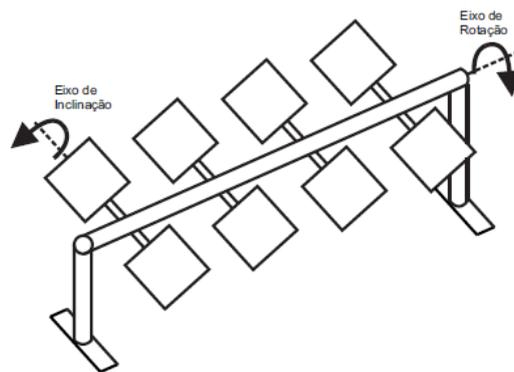
Os seguidores com estrutura *roll-tilt* (Figura 2.21) possuem um eixo de rotação horizontal e eixos posicionados perpendicularmente ao eixo de rotação, para o ajuste da inclinação. São mais utilizados em sistemas que possuem uma grande quantidade de módulos e apresentam uma maior complexidade mecânica, pois existem muitos acoplamentos mecânicos e partes giratórias.

Figura 2.20 – Seguidor de dois eixos com eixo em pedestal



Fonte: (PINTO, 2010)

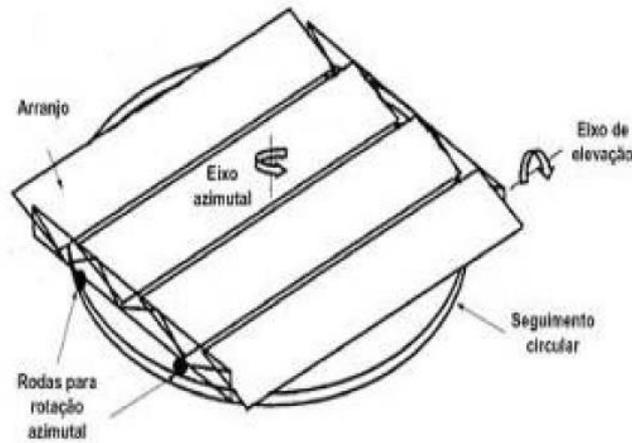
Figura 2.21 – Seguidor de dois eixos com estrutura *roll-tilt*



Fonte: (LIRA, 2014)

Por último, os seguidores com plataforma giratória possuem uma plataforma que roda sobre uma base fixa em formato circular, como mostrado na Figura 2.22. Em cima desta plataforma os módulos são colocados em fileiras sobre um eixo horizontal. São mais comuns em sistemas de grande porte, podendo comandar vários módulos ao mesmo tempo, e necessitam de uma grande área e uma maior necessidade de manutenção, devido ao maior desgaste das partes móveis.

Figura 2.22 – Seguidor de dois eixos com plataforma giratória



Fonte: (PINTO, 2014)

### 2.4.3 Classificação com relação ao tipo de controle

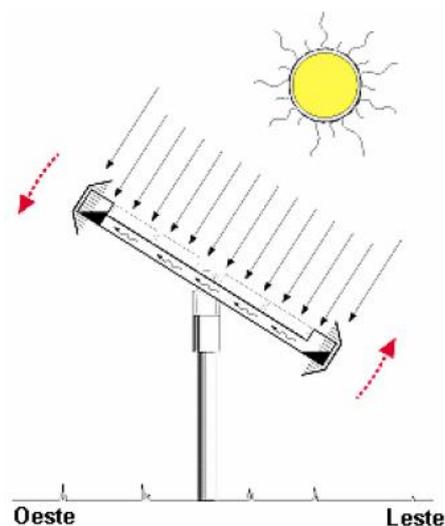
Com relação à forma de controle, este pode ser feito de forma ativa ou passiva.

#### 2.4.3.1 Seguidores passivos

Os seguidores passivos fazem o seguimento do Sol sem qualquer componente eletrônico ou motores. Esse tipo de seguidor, é composto por dois cilindros, nas extremidades leste e oeste do coletor solar, contendo, na maioria das vezes, um líquido denominado de Freon (CORTEZ, 2013), e um tubo de interligação entre estes, de modo a permitir a passagem do líquido de um para o outro, como mostrado na Figura 2.23.

O seu funcionamento se baseia na ação da gravidade. Quando uma lateral está mais exposta ao Sol do que a outra (quando os raios solares não estão incidindo em um ângulo de  $90^\circ$  com a superfície), a pressão de vapor aumenta, forçando o líquido que está recebendo a luz do sol a ir para o local mais frio, na outra extremidade, sombreada, e provocar o movimento do sistema, ao deslocar o centro de gravidade do mesmo, até que ambas as laterais estejam igualmente sombreadas. O aquecimento do líquido é controlado pelas sombras causadas pelos anteparos de alumínio (SHAYANI, 2006).

Figura 2.23 – Sistema com seguimento passivo



Fonte: (SHAYANI, 2006)

Um seguidor passivo é mais adequado em altas temperaturas (ABOUZEID, 2001) e só pode ser utilizado em locais onde a variação térmica seja suficiente para provocar o aquecimento do líquido. Possui como desvantagens o fato de apresentar uma baixa precisão e sofrer distúrbios com a influência de ventos e com a falta parcial da irradiação solar, como em dias nublados (CLIFFORD; EASTWOOD, 2004). Apresenta vantagens como a simplicidade e a não necessidade de outros mecanismos, como motores, para o seu funcionamento.

#### 2.4.3.2 Seguidores ativos

Os seguidores ativos possuem componentes eletrônicos e motores elétricos para promover a movimentação da superfície de captação de forma ativa. A maior parte dos seguidores utilizados ao redor do mundo são ativos.

O controle da movimentação de um seguidor ativo pode ser feito em malha fechada, com uso de sensores, ou em malha aberta, sem sensores.

Como principais componentes de um sistema de seguimento solar, pode-se citar:

a) controlador: componente elétrico/eletrônico responsável pelo recebimento dos sinais vindos dos sensores, se o controle for em malha fechada, e fornecimento dos sinais de comando para o elemento atuador, de acordo com a lógica de controle desejada.

Podem ser utilizados: CLP (controlador lógico programável), microprocessador, computador ou circuito com portas lógicas;

b) atuador: tem como função realizar a movimentação do sistema a partir dos sinais vindos do controlador, podendo ser utilizados motores de passo, motores de corrente contínua, motores de indução e servo-motores;

c) sensores (presentes somente quando o controle é feito em malha fechada): podem ser utilizados com a função de detectar a posição do Sol durante o dia, com fotosensores como LDR's (*Light Dependent Resistor*), também denominados de fotoresistores ou resistor dependente de luz, fototransistores, fotodiodos ou até mesmo células FV. Também podem ser utilizados com a função de fornecer informações referentes a posição da superfície de captação solar, podendo ser utilizados potenciômetros, *encoders*, sensores magnéticos, entre outros.

#### 2.4.3.2.1 Controle em malha aberta

O controle do seguimento solar em malha aberta (Figura 2.24) pode ser feito:

a) de forma pré-definida: onde se define intervalos de tempo em que o sistema deve se movimentar de um determinado valor de angulação, também definido. Por exemplo, pode se definir que a superfície deve rotacionar 4° em direção ao oeste a cada 30 minutos, desde o nascer do sol até o pôr do sol.

b) com algoritmos de cálculo da posição do Sol: a partir da data, hora e das coordenadas de latitude longitude onde o sistema está instalado, um algoritmo matemático calcula a posição do Sol a cada instante, fornecendo os ângulos de azimute solar e altura solar, além dos horários do nascer e pôr do sol. Com esses ângulos, pode se fazer o devido posicionamento da superfície de captação solar.

Figura 2.24 – Controle do seguimento solar em malha aberta

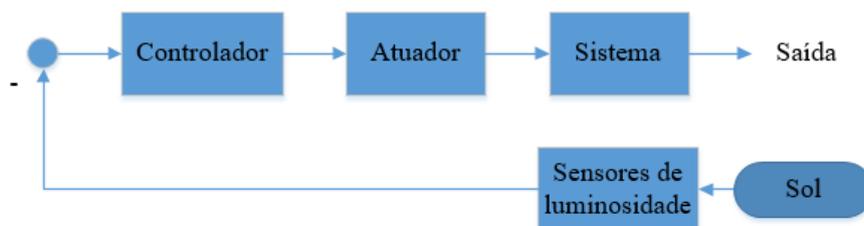


Fonte: (Autoria própria)

#### 2.4.3.2.2 Controle em malha fechada

Quando o controle do seguimento solar é feito em malha fechada (Figura 2.25), utiliza-se, geralmente, um par de fotosensores para se fazer o seguimento em torno de um determinado eixo, ou dois pares, para se seguir o Sol em dois eixos.

Figura 2.25 – Controle do seguimento solar em malha fechada



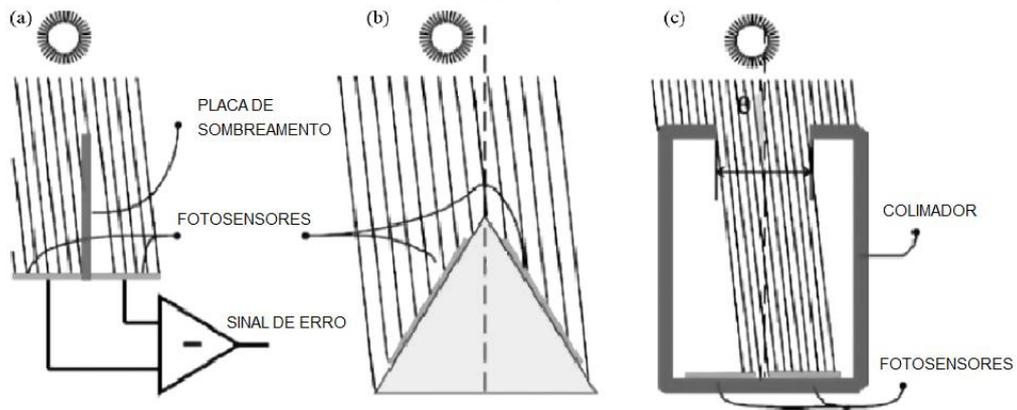
Fonte: (Autoria própria)

Os fotosensores utilizados, na maioria das vezes LDRs, fornecem sinais de saída que variam de acordo com a intensidade da irradiação incidente sobre os mesmos. Entre esses sensores, geralmente, é utilizado um obstáculo (Figura 2.26a), de forma que, quando o Sol se encontrar perpendicular à superfície dos sensores, haverá igual incidência de irradiação solar em cada um dos sensores e o sinal de saída de cada sensor do par será igual. Caso contrário, ou seja, quando o Sol não estiver incidindo de forma perpendicular nos sensores, um dos sensores estará recebendo maior irradiação do que o outro e o seu sinal de saída será diferente do sinal de saída do outro sensor do par. Essa diferença nas saídas é utilizada para o controlador acionar o mecanismo atuador de forma a movimentar o sistema até que a incidência do Sol em cada sensor se torne igual.

Em alguns casos, os sensores são usados em superfícies inclinadas, de forma a aumentar a sensibilidade aos raios solares, ou com o auxílio de um colimador (MOUSAZADEH *et al.*, 2009), como mostrados na Figura 2.26.

Vale ressaltar que os fotosensores de cada par têm de ser iguais, de forma a fornecer leituras idênticas um ao outro quando recebendo a mesma irradiação solar, e não se deve permitir o acúmulo de sujeiras na superfície de proteção dos sensores, o que compromete a sensibilidade dos mesmos.

Figura 2.26 – a) Sensor com placa de sombreamento; b) Sensor com base inclinada; c) Sensor com o uso de colimador



Fonte: (MOUSAZADEH *et al.*, 2009) (adaptado)

Podem ainda ser utilizados sensores de posição, como potenciômetros ou *encoders*, para se conhecer a posição da superfície de captação a cada instante e poder se fazer correções nessa posição de acordo com a estratégia de seguimento utilizada.

### 3. ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE SEGUIMENTO SOLAR

Diversos pesquisadores ao redor do mundo desenvolveram e continuam desenvolvendo trabalhos envolvendo seguimento solar, como a implementação de sistemas de seguimento solar e de novas estratégias de seguimento, ou simulações e estudos na área. Estes trabalhos abordam as diferentes formas de uso de seguidores solares, como na conversão FV, no aproveitamento térmico, no uso em sistemas de concentração, ou em aparelhos de medição solar.

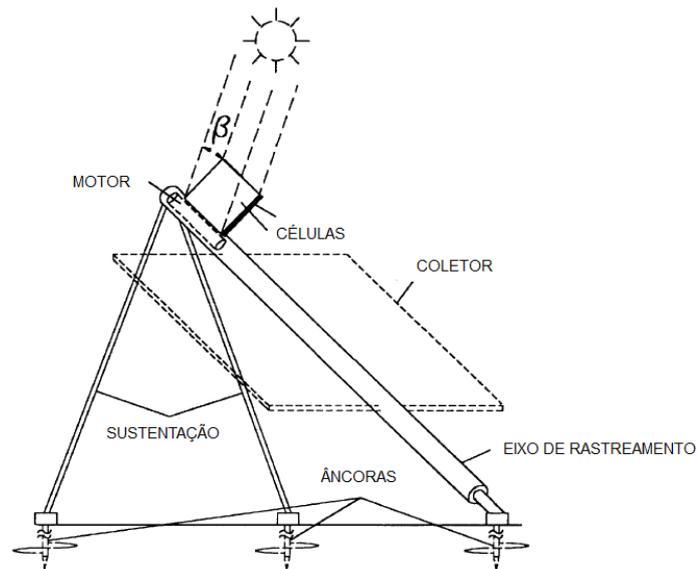
Para o desenvolvimento do presente capítulo realizou-se uma pesquisa e análise de diversos trabalhos na área de seguimento solar existentes até o presente momento. Como forma de se mostrar as variadas formas possíveis de controle, as estratégias de seguimento, as estruturas utilizadas e os componentes envolvidos, a seguir são descritos alguns desses trabalhos. Nessa descrição são detalhadas características, princípio de funcionamento e os resultados obtidos.

**Poulek e Libra (1998)** desenvolveram um seguidor solar simples e com grande confiabilidade, usando células FV, que servem tanto para o sensoriamento do Sol como para o provimento de energia para a movimentação do conjunto, feita através de um motor cc reversível conectado diretamente às células.

As células são posicionadas de modo antiparalelo, similares a uma célula de dupla face, e de forma aproximadamente perpendicular ao plano do coletor solar, como mostrado na Figura 3.1. À medida que o Sol se move, o ângulo de incidência  $\beta$ , mostrado na Figura 3.1, dos raios solares nas células aumenta até que a energia elétrica gerada pelas células seja suficiente para fazer com que o motor mova o conjunto na direção da incidência do Sol. Então, o ângulo de incidência começa a decrescer até que a energia gerada pelas células esteja abaixo do mínimo necessário para alimentar o motor, significando que o conjunto está voltado para o Sol.

A simplicidade e confiabilidade se aproximam daquelas presentes no seguidor passivo, mas com a vantagem de ser mais eficiente e poder trabalhar em baixas temperaturas, até  $-40^{\circ}\text{C}$ . A precisão no seguimento obtida é de aproximadamente  $10^{\circ}$  em dias claros e cerca de  $20^{\circ}$  em dias nublados.

Figura 3.1 – Seguidor de eixo polar com células FV para sensoriamento do Sol



Fonte: (POULEK; LIBRA, 1998) (adaptado)

**Abouzeid (2001)** implementou um sistema de seguimento com estrutura similar àquela mostrada na Figura 3.1, com duas células FV posicionadas de forma antiparalela e perpendiculares ao plano do coletor. Utilizou-se um motor de passo, dispensando o uso de complicados sistemas de engrenagens de determinados motores, alimentado por um conversor de corrente contínua (cc). Também foi usado um circuito de controle composto de um arranjo lógico programável e uma memória EEPROM (*Erasable Electronic Programmable Read Only Memory*).

A movimentação do sistema é feita quando uma das células está recebendo uma irradiação solar maior que a outra célula, o que produzirá um sinal de erro na entrada de um comparador, que acionará o circuito de controle de modo a mover o motor na direção dos raios solares. O sistema pode funcionar sem qualquer tipo de supervisão, sendo aplicável em sistemas isolados em áreas remotas.

**Abdallah (2004)**, na cidade de Amã (Jordânia), analisou os efeitos de quatro diferentes tipos de sistemas de seguimento solar na característica corrente-tensão e na geração de energia elétrica de um módulo FV. Utilizou-se sistemas com seguimento: em dois eixos; de leste a oeste; de um eixo vertical; e de norte a sul.

O controle era feito em malha aberta com o uso de um CLP, calculando e inserindo no mesmo os valores desejados da posição do módulo. Utilizou-se motores cc, que atuavam intermitentemente, funcionando por poucos segundos e parando por aproximadamente 10 minutos. O uso intermitente dos motores simplifica o

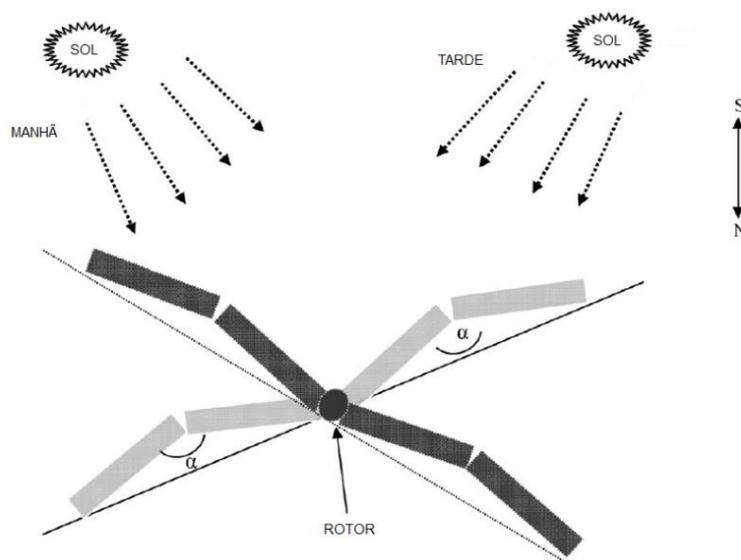
funcionamento do sistema sem grandes perdas na potência. Verificou-se que a energia consumida pelo sistema de controle e os motores foi inferior a 2% da energia adicional disponibilizada pelo sistema de seguimento.

Em comparação com um sistema fixo inclinado  $32^\circ$  (latitude local) ao sul, houve uma melhora na energia coletada diariamente pelo módulo de: 43,87% para o seguimento de dois eixos; de 37,53% para o seguimento de leste a oeste; de 34,43% para o seguimento de um eixo vertical; e de 15,29% para o seguimento de norte a sul.

**Al-Mohamad (2004)**, na cidade de Damascus (Síria), desenvolveu um sistema de seguimento solar de um eixo em um módulo FV com o uso também de um CLP, sendo agora o controle feito em malha fechada com uso de dois fotoresistores com uma barreira entre eles. No CLP existem dois botões que permitem o comando manual do sistema. Para movimentação utilizou-se um motor cc. O sistema também pode ser conectado, via porta serial RS232, a um computador, com um *software* desenvolvido para coletar, controlar e monitorar os dados. Comparado com um sistema fixo, o sistema com seguimento apresentou um aumento médio na energia elétrica fornecida durante o dia de 20%.

**Karimov et al. (2005)**, na cidade de Topi (Paquistão), implementaram um sistema de seguimento em que o sensoriamento solar era feito com os próprios módulos FV. Dois pares de módulos foram conectados a um rotor e instalados em uma base de sustentação piramidal com um ângulo  $\alpha$  (Figura 3.2), que pode variar de  $160^\circ$  a  $175^\circ$ , entre os módulos de cada par.

Figura 3.2 – Sistema de seguimento com sensoriamento solar feito com módulos FV



Fonte: (KARIMOV *et al.*, 2005) (adaptado)

A angulação entre os módulos permite que, quando o arranjo se encontrar desalinhado com o Sol, haja o surgimento de uma diferença de potencial entre as tensões geradas pelos módulos, o que aciona diretamente um motor cc na direção de ajuste do arranjo. A verificação dessa diferença de potencial se dá em um circuito similar a uma ponte de Wheatstone, com os módulos substituindo os resistores e adicionando alguns diodos.

A área total dos quatro módulos é cerca de  $1,26 \text{ m}^2$  e a potência máxima deles fica em torno de 100 W. O ângulo de seguimento é de  $120^\circ$ , com uma precisão de cerca de  $10^\circ$ , exceto quando a irradiação difusa for predominante, o que diminui essa precisão. A inclinação dos módulos em relação ao plano horizontal pode ser ajustada para cada estação do ano em um ângulo de  $34^\circ \pm 11^\circ$ .

O sistema apresentou uma baixa resistência ao vento e se mostrou um sistema de conversão de energia eficiente, econômico e confiável. Constatou-se que o sistema com seguimento gerou uma energia elétrica 30% maior do que a energia de um sistema fixo, estando ambos os sistemas com uma inclinação de  $45^\circ$  em relação ao plano horizontal. Em uma análise de custo verificou-se que o sistema FV se mostrou mais barato, ou pelo menos comparável, com as outras formas de geração de energia elétrica de pequena potência.

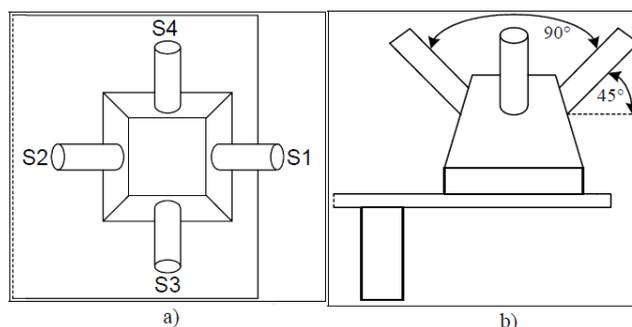
**Bakos (2006)**, na cidade de Xanthi (Grécia), implementou, em um coletor solar parabólico, um sistema de seguimento de dois eixos baseado na combinação de fotoresistores e um método de controle computacional usando um determinado *software*. Foram usados dois fotoresistores e um circuito para realizar a comparação dos valores das resistências dos mesmos e acionar dois motores de corrente alternada (ca). Os sensores são utilizados somente quando um determinado nível de irradiação solar incidente é atingido. O *software* desenvolvido permite a operação manual do sistema, além de disponibilizar uma representação gráfica da posição do coletor solar e mostrar o horário em que o Sol nasce e se põe.

Realizou-se experimentos em dois dias distintos, com ocorrência de períodos de chuva e tempo nublado, sendo no primeiro dia usados tanto os sensores como o *software* computacional no seguimento solar e no segundo dia usados somente os sensores. Verificou-se que o sistema de seguimento sem o uso do *software*, somente com os sensores, apresentou uma queda acentuada na eficiência, já que com o tempo nublado não se torna possível a detecção da posição do Sol pelos sensores.

Foram realizados outros experimentos, em condições climáticas normais, e alcançou-se um ganho de 46,46% na energia captada pelo sistema, em comparação com um sistema fixo inclinado 40° ao Sul.

**Bingol, Altintas e Oner (2006)** desenvolveram um sistema de seguimento solar de dois eixos para um módulo FV com controle em malha fechada baseado na ação de um microcontrolador, quatro sensores LDR e dois motores de passo. Foram usados dois pares de LDR's (S1 e S2 posicionados na direção Leste-Oeste para a correção do ângulo de azimute, e S3 e S4 posicionados na direção Norte-Sul para a correção da inclinação do painel com o plano horizontal), dispostos em dois pares de tubos cilíndricos separados por um ângulo de 90° entre cada tubo de cada par e por ângulo de 45° com a superfície do painel FV, como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Disposição dos tubos com LDR's: a) visão de cima; b) visão frontal



Fonte: (BINGOL; ALTINTAS; ONER, 2006) (adaptado)

O microcontrolador aciona os motores através de um registrador de deslocamento de oito bits. O sistema permite que, através da porta serial RS232, seja possível a supervisão da posição do módulo por um sistema de monitoramento em um computador.

Através de testes com o módulo com seguimento solar e um módulo fixo, pode-se verificar que o módulo com seguimento apresentou uma temperatura média diária maior 9°C em relação ao fixo, o que mostra que uma maior densidade de luz foi recebida pelo módulo com seguimento. Uma desvantagem desse sistema de seguimento é a perturbação por variações climáticas, como chuvas e nuvens, podendo realizar o seguimento do Sol de forma errada nessas condições.

**Oliveira (2007)**, em Recife/PE, desenvolveu um seguidor de um eixo polar simples e de baixo custo, onde o sistema de controle e o motor tiveram sua alimentação feita através dos próprios módulos FV. O controle do rastreador foi feito em malha

fechada com uso de reguladores analógicos compostos de dispositivos eletrônicos (transistores, resistores e amplificadores operacionais), e com uso de dois sensores LDR com um obstáculo entre eles. Utilizou-se também um motor cc, um circuito de acionamento para o motor, botões para comando manual e chaves fim-de-curso, para delimitar a angulação máxima da estrutura.

Foram instalados piranômetros, no sistema com seguimento e em um sistema fixo, para medição das irradiâncias incidentes nos planos de cada sistema e da irradiância difusa incidente no plano horizontal. O sistema segue o Sol ao longo do dia enquanto houver a predominância de irradiação direta. Quando a irradiação difusa prevalecer, o sistema permanece parado, já que nessa situação a maior parte da irradiação chega ao arranjo em todas as direções e de maneira praticamente uniforme, o que pode adiantar o arranjo em relação ao Sol. Obteve-se erros máximos de 1° no seguimento do Sol em dias com predominância da irradiação direta, com valores maiores de erro em dias nublados.

Observou-se um ganho máximo de 31%, em um dia sem nuvens, e mínimo de 15%, em um dia com tempo instável alternando entre períodos de céu aberto e nublado. O ganho observado pode ser ainda maior, pois havia árvores e construções próximas ao local da instalação do sistema que influenciaram algumas medições nos períodos inicial e final dos dias.

**Alves (2008)**, na cidade de Botucatu/SP, desenvolveu um sistema de seguimento de um eixo em que era feito o ajuste diário da inclinação em relação a horizontal de um módulo FV, com base no valor da declinação solar do dia. Usou-se o controle em malha aberta com estratégia de seguimento pré-definida, onde o módulo rotacionava 1° a cada 4 minutos de leste a oeste, em um CLP, que comandava a atuação de dois motores de passo, um para o ajuste diário da inclinação e outro para o seguimento de leste a oeste. A hora do nascer do sol e do pôr do sol eram calculadas e delimitavam o horário de atuação do sistema.

Ao longo de seis meses de ensaios, verificou-se que o sistema de seguimento teve uma geração de energia elétrica 53% maior do que aquela de um módulo FV fixo.

**Oliveira (2008)**, em Porto Alegre/RS, implementou um seguidor de um eixo com controle em malha fechada feito com um microcontrolador da família 8051 AT89S52 e um sensor ótico, fototransistor, fixado próximo a uma haste de sombreamento. O seguimento era feito a cada 15 minutos, e um motor cc rotacionava um módulo FV até que o sensor estivesse sombreado, o que indicava que o sistema estava alinhado com o Sol.

Utilizou-se um piranômetro para medição da irradiância solar global. Em períodos nublados, o sistema permanecia parado, de forma a não realizar o seguimento solar de forma errada. Ao longo de um dia de testes, verificou-se que o sistema com seguimento apresentou uma energia elétrica gerada 24% maior do que um sistema fixo equivalente.

**Chin, Babu e McBride (2011)**, em Singapura, apresentaram o projeto, modelagem e teste de um seguidor solar de um eixo com uso do *software* MATLAB/Simulink. O controle foi feito em malha fechada com dois sensores LDR nas extremidades de um módulo FV. Um microcontrolador controlava a rotação no eixo de um servomotor através de sinais PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*), com a duração da largura do pulso determinando o ângulo de rotação do eixo do motor, que era conectado a um eixo de suporte do módulo. A alimentação de todo o sistema era feita com uma bateria, um controlador de carga e um circuito regulador de tensão.

O seguimento podia ser feito de três modos: automático; pré-definido; e manual. No modo pré-definido, o seguimento era feito rotacionando o módulo 2° a cada 15 minutos. No modo automático, o seguimento era feito comparando os sinais de saída dos sensores, que se apresentassem valores baixos, indicando que o tempo estava nublado, fazia com que o sistema permanecesse parado. Se esse período de tempo nublado durasse mais que 15 minutos, o microcontrolador mudava para o modo de seguimento pré-definido. No modo manual é possível mover o sistema para uma angulação desejada alterando manualmente a saída do microcontrolador.

Verificou-se que o sistema apresentou uma potência gerada 20% maior do que a potência de um sistema fixo equivalente. Em uma análise de custo, observou-se que o custo do sistema era aproximadamente igual a um sistema de geração diesel e mais barato que uma extensão da rede.

**Babalola e Alibi (2012)**, na cidade de Ilorin (Nigéria), compararam a eficiência de um sistema com seguimento solar, primeiramente de dois eixos, e depois de um eixo, em relação a um sistema fixo. O controle era feito em malha fechada com quatro pares de sensores LDR e um circuito com portas lógicas para comparar os valores dos sensores. Para acionar os motores utilizou-se um circuito *driver* em ponte H.

Quando o sistema operou com seguimento de um eixo, obteve um ganho energético médio de 45,46% ao longo de 7 dias, em relação a um sistema fixo com inclinação de 30° em relação a horizontal. Quando o sistema funcionou com seguimento de dois eixos, proporcionou um ganho na geração de energia elétrica de 56,31% em média

durante 7 dias, em relação ao mesmo sistema fixo. Os autores comentam que um ponto fraco do sistema é o mesmo ser afetado por variações climáticas, como chuva e nuvens, proporcionando um seguimento do Sol com menor eficiência.

**Barbosa (2016)**, na cidade de Fortaleza/CE, desenvolveu um seguidor solar de um eixo com estratégia de seguimento pré-definida e controle tanto em malha aberta quanto em malha fechada, com uso de um potenciômetro para verificação da posição do módulo FV com seguimento. Utilizou-se um CLP como dispositivo controlador e um motor de passo como atuador. A posição do módulo móvel era atualizada de três formas: a cada 15 minutos; a cada 30 minutos; ou a cada 60 minutos.

Durante os meses de experimentos, verificou-se um ganho de geração de energia elétrica médio de 18,24% com o controle em malha aberta e 20,78% com o controle em malha fechada, com o uso do potenciômetro.

Ao analisar os trabalhos apresentados, que foram selecionados dentro de uma vasta gama de trabalhos pesquisados, pode-se verificar algumas das diferentes formas de se fazer o seguimento solar. Também pode-se ver que os ganhos obtidos com o seguimento variam, entre outros fatores, conforme o número de eixos rotativos, o tipo de controle utilizado, a estratégia de seguimento e a latitude local.

Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo de alguns dos trabalhos apresentados, descrevendo o ano de publicação do trabalho, o local onde foi desenvolvido, o número de eixos rotativos do seguidor implementado, o tipo de controle utilizado (e qual a estratégia usada: se com sensores de luminosidade e/ou com algoritmos de cálculo da posição solar e/ou com estratégia pré-definida) e os ganhos verificados na irradiação coletada ou na energia elétrica gerada pelo sistema com seguimento em relação a um sistema fixo equivalente.

Tabela 3.1 – Resumo dos trabalhos apresentados

<b>Ano</b>	<b>Local</b>	<b>Número de eixos móveis</b>	<b>Tipo de controle</b>	<b>Ganhos brutos</b>
2004	Jordânia (latitude 31°)	Dois eixos; Um eixo N-S; Um eixo vertical; Um eixo L-O	Malha aberta (algoritmo)	43,87%; 37,53%; 34,43%; 15,29%
2004	Síria (latitude 34°)	Um eixo	Malha fechada (sensores)	20%
2005	Paquistão (latitude 34°)	Um eixo	Malha fechada (sensores)	30%
2006	Grécia (latitude 41°)	Dois eixos	Malha fechada (sensores e algoritmo)	46,46%
2007	Recife/PE (latitude -8°)	Um eixo	Malha fechada (sensores)	31%
2008	Botucatu/SP (latitude -23°)	Um eixo (com ajuste diário da inclinação)	Malha aberta (pré-definido)	53%
2008	Porto Alegre/RS (latitude -30°)	Um eixo	Malha fechada (sensores)	24%
2011	Singapura (latitude 1°)	Um eixo	Malha fechada (sensores e pré-definido)	20%
2012	Nigéria (latitude 8°)	Dois eixos; Um eixo	Malha fechada (sensores)	56,31%; 45,46%
2016	Fortaleza/CE (latitude -4°)	Um eixo	Malha aberta (pré-definido)	20,78%

Fonte: (Autoria própria)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Como metodologia para verificar-se os ganhos energéticos que o seguimento solar pode proporcionar na cidade de Fortaleza/CE, desenvolveu-se um sistema de seguimento solar para um módulo FV e fez-se a comparação da energia elétrica gerada por este módulo móvel com a energia gerada por um módulo FV idêntico fixo.

O presente capítulo apresenta a descrição: dos módulos FV utilizados; do sistema de seguimento solar desenvolvido, citando as características dos componentes envolvidos; e das estratégias que foram utilizadas para se realizar o seguimento do Sol, comentado a lógica de controle de cada uma delas.

### 4.1 Laboratório de Energias Alternativas

O local onde o sistema de seguimento solar foi desenvolvido e instalado, juntamente com os módulos FV, foi o Laboratório de Energias Alternativas (LEA), mostrado na Figura 4.1, do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), na cidade de Fortaleza/CE (latitude  $-3,74^\circ$  e longitude  $-38,57^\circ$ ) (MAPS OF WORLD, 2016).

Figura 4.1 – Laboratório de Energias Alternativas - LEA



Fonte: (Autoria própria)

## 4.2 Módulos FV

Os módulos FV utilizados são de silício policristalino e do modelo KC85T da fabricante Kyocera. Na Tabela 4.1 são mostradas algumas das especificações deste modelo, para as condições de teste padrão.

Tabela 4.1 – Especificações dos módulos KC85T

<b>Potência Máxima</b>	87 W
<b>Corrente de Potência Máxima</b>	5,02 A
<b>Tensão de Potência Máxima</b>	17,4 V
<b>Corrente de Curto-Circuito</b>	5,34 A
<b>Tensão de Circuito Aberto</b>	21,7 V
<b>Peso</b>	8,3 kgs
<b>Dimensões</b>	100,7 x 65,2 x 5,8 cm

Fonte: (KYOCERA, 2016)

Os dois módulos FV foram instalados no teto do LEA com a mesma inclinação em relação a horizontal e direcionados para o norte geográfico (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Módulos FV no teto do LEA



Fonte: (Autoria própria)

Devido aos efeitos da declinação solar e do movimento de translação da Terra, para cada dia do ano existe um valor de inclinação em relação a horizontal ótimo para módulos FV fixos que proporciona uma maior captação da irradiação solar, como mostrado no capítulo 2 deste trabalho.

Kacira *et al.* (2004) verificaram que o ajuste da inclinação de forma mensal apresenta um ganho em relação ao ajuste sazonal e ao ajuste do ângulo igual à latitude, de 1,1% e 3,9%, respectivamente. Nijegorodov *et al.* (1994) desenvolveram equações para a obtenção da inclinação ótima para cada mês do ano em função da latitude local, com erros nas estimações de  $\pm 3^\circ$ . Por meio dessas equações, para a cidade de Fortaleza, obteve-se os ângulos mostrados na Tabela 4.2, com ângulos positivos indicando inclinação em direção ao norte e ângulos negativos indicando inclinação em direção ao sul.

Tabela 4.2 – Valores ideais de inclinação para módulos FV em Fortaleza durante o ano

<b>Janeiro</b>	-25,7°
<b>Fevereiro</b>	-13,4°
<b>Março</b>	-0,3°
<b>Abril</b>	13,7°
<b>Mai</b>	27,5°
<b>Junho</b>	37,3°
<b>Julho</b>	33,3°
<b>Agosto</b>	20,6°
<b>Setembro</b>	5,7°
<b>Outubro</b>	-8,6°
<b>Novembro</b>	-21,5°
<b>Dezembro</b>	-30,7°

Fonte: (NIJEGORODOV *et al.*, 1994)

Com isso, já que os experimentos com o sistema de seguimento solar foram feitos durante o mês de junho, os módulos deveriam estar com uma inclinação de 37,3° em direção ao norte para uma maior captação da irradiação solar. Porém, devido ao espaço físico reduzido no teto do LEA, por haver outros trabalhos sendo desenvolvidos no mesmo período, a inclinação dos módulos FV teve de ser limitada a 15° em direção ao norte, para não haver o surgimento de sombras ao longo do dia nos módulos. A verificação desse ângulo de inclinação foi feita com uso de um inclinômetro (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Inclinômetro



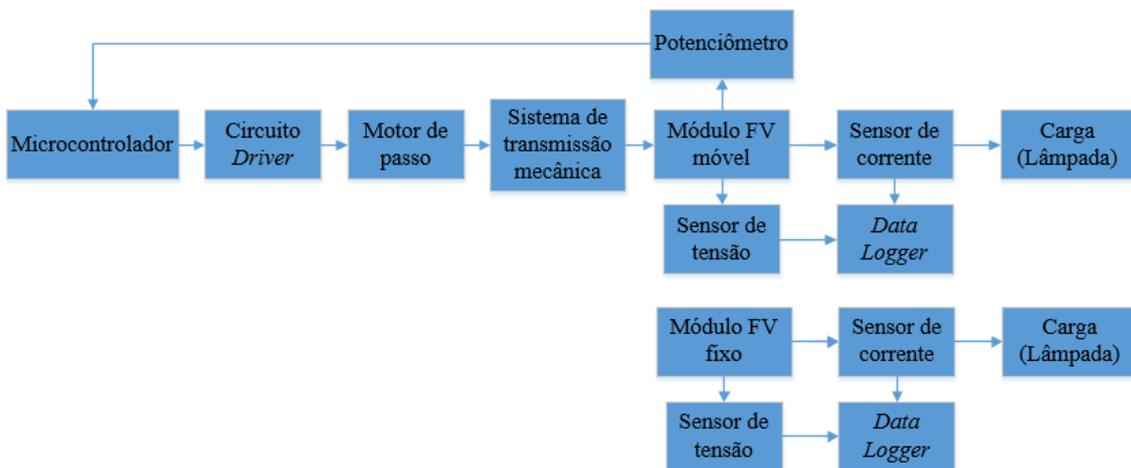
Fonte: (Autoria própria)

### 4.3 Sistema de seguimento solar

O sistema de seguimento solar foi desenvolvido visando que se tivesse um baixo consumo de energia elétrica e o seguimento do Sol pudesse ser feito com a precisão solicitada por cada estratégia de seguimento utilizada.

A Figura 4.4 ilustra o fluxograma do sistema FV utilizado, mostrando os componentes que controlam e promovem a movimentação do módulo FV móvel e os componentes para a aquisição e armazenamento de dados tanto do módulo móvel quanto do módulo fixo.

Figura 4.4 – Fluxograma do sistema FV



Fonte: (Autoria própria)

Os componentes utilizados no sistema de seguimento solar são descritos com mais detalhes a seguir.

#### 4.3.1 Microcontrolador

Como unidade de central de controle do seguimento solar, utilizou-se um microcontrolador PIC18F2550 (Figura 4.5), que possui 28 pinos e faz parte da família PIC18, que apresenta o maior nível de performance dos microcontroladores de 8 bits da empresa Microchip Technology.

Figura 4.5 – Microcontrolador PIC18F2550

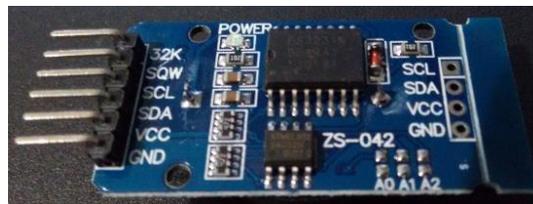


Fonte: (Autoria própria)

A linguagem utilizada para o desenvolvimento dos programas referentes ao microcontrolador foi a linguagem C. Para se fazer a escrita e compilação dos programas, utilizou-se a plataforma de desenvolvimento de aplicações MPLABX-IDE, da empresa Microchip Technology, com o compilador C18. Para realizar a interface entre o *software* de desenvolvimento MPLABX e o microcontrolador, fez-se uso da ferramenta SanUSB (JUCÁ; PEREIRA, 2016), que por meio de uma conexão USB (Figura 4.5) com o computador permite a programação serial *In-Circuit* do microcontrolador.

Para que o microcontrolador pudesse ter informações precisas de data e horário atualizadas a cada instante, necessárias para a implementação das estratégias de seguimento solar utilizadas, utilizou-se um módulo RTC (do inglês *Real Time Clock*) de modelo DS3231 (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Módulo RTC



Fonte: (Autoria própria)

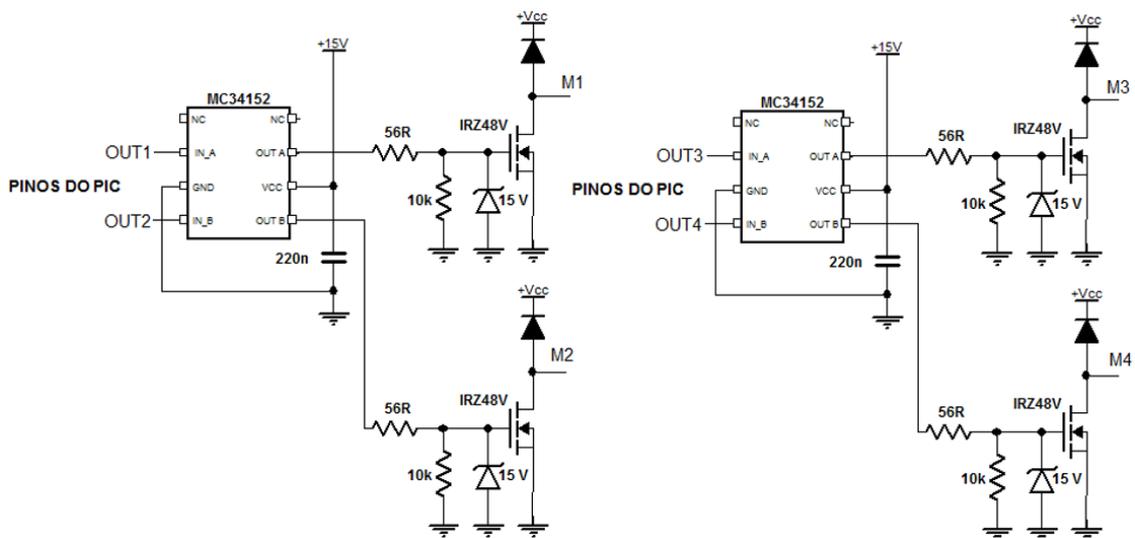
Este módulo é um relógio de tempo real de alta precisão e baixo consumo de energia (com corrente inferior a 500 nA), que possui um cristal oscilador para melhorar sua exatidão e uma bateria de lítio para evitar a perda de dados. Este módulo fornece com

precisão valores de dia, mês, ano, horas, minutos e segundos para o microcontrolador por meio de uma comunicação I2C (do inglês *Inter-Integrated Circuit*).

### 4.3.2 Circuito “driver” para o motor

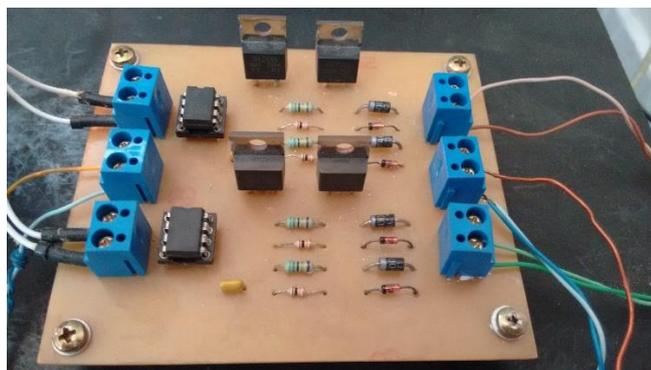
O circuito *driver* para acionamento do motor, cujo esquemático é mostrado na Figura 4.7 e a placa de circuito impresso confeccionada é representada na Figura 4.8, possui a função de proteger as saídas do microcontrolador e de fazer com que os sinais de saída do mesmo energizem as bobinas do motor de passo na sequência necessária. Os sinais OUT1, OUT2, OUT3 e OUT4 correspondem aos pinos de saída do microcontrolador e os sinais M1, M2, M3 e M4 correspondem às bobinas do motor de passo.

Figura 4.7 – Esquemático do circuito *driver* do motor de passo



Fonte: (Autoria própria)

Figura 4.8 – Placa de circuito impresso do circuito *driver*



Fonte: (Autoria própria)

### 4.3.3 Motor de passo

O motor a ser utilizado para a movimentação do módulo é um motor de passo, pois verificou-se que o mesmo é adequado para este tipo de aplicação, já que pode fornecer a precisão necessária na movimentação, apresenta reduzida necessidade de manutenção (ELECTROMATE, 2016), possui torque de médio para alto, custo reduzido, e seu controle não é complexo, em comparação com outros tipos de motores (ALVES, 2008). O motor de passo utilizado foi de modelo 4034-326-T da fabricante NEMA, cujas especificações são mostradas na Tabela 4.3.

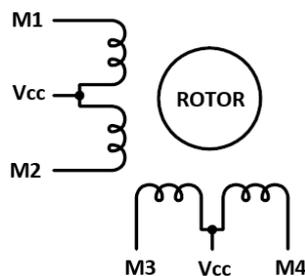
Tabela 4.3 – Especificações do motor de passo

<b>Corrente para ligação unipolar</b>	4,7 A por fase
<b>Resolução (Ângulo de passo)</b>	200 passos por rev. (1,8°)
<b>Número de fios</b>	6
<b>Diâmetro do eixo</b>	3/8"
<b>Comprimento da carcaça</b>	6,35 cm
<b>Peso</b>	1,5 kg
<b>Inércia</b>	560 g.cm <sup>2</sup>
<b>Torque estático</b>	15 Kg.cm
<b>Temperatura ambiente</b>	-20°C a 50°C
<b>Classe de isolamento</b>	B (até 130°C)

Fonte: (GECKO, 2016)

Para a energização das bobinas do motor de passo foi utilizada a ligação unipolar, conforme mostrado na Figura 4.9, onde os pontos centrais das duas bobinas de cada uma das duas fases do motor foram ligados ao terminal positivo da fonte de alimentação do motor e cada um dos pontos M1, M2, M3 e M4 foram conectados aos terminais de *gate* dos MOSFET's do circuito *driver* da Figura 4.7. Com isso, conforme cada MOSFET fosse sendo polarizado, conforme a sequência de energização das saídas do microcontrolador, os pontos M1, M2, M3 e M4 vão sendo conectados na mesma sequência à referência do circuito e, assim, a respectiva bobina do motor é energizada. Utilizou-se a ligação unipolar devido a sua simplicidade, em relação a ligação bipolar, podendo o circuito *driver* ser mais simples, e por ter apresentado um bom desempenho durante o funcionamento.

Figura 4.9 – Diagrama da ligação unipolar do motor de passo

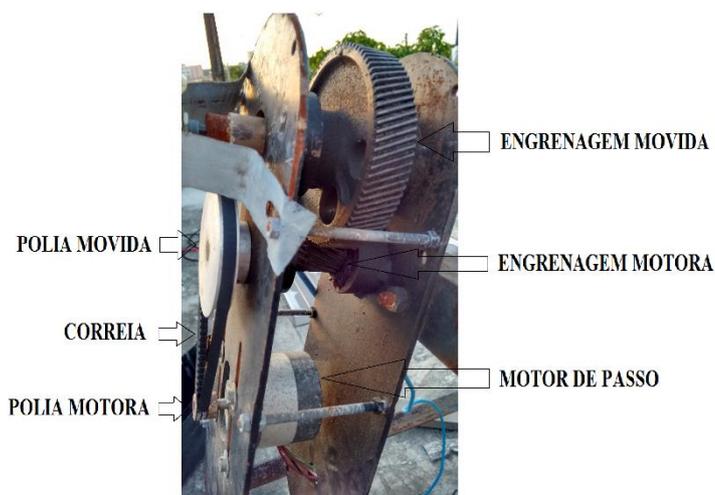


Fonte: (APPLIED MOTION, 2015) (adaptado)

#### 4.3.4 Sistema de transmissão mecânica

Para que o motor de passo conseguisse movimentar o módulo FV, utilizou-se um sistema de transmissão mecânica, composto de duas polias, uma correia e duas engrenagens, como mostrado na Figura 4.10, em que é feita uma redução da velocidade angular ao se utilizar uma polia movida com maior diâmetro que o diâmetro da polia motora. As polias são acopladas por meio de uma correia e a polia movida está conectada ao mesmo eixo de rotação da engrenagem motora. A engrenagem motora está acoplada à engrenagem movida, que está conectada ao mesmo eixo de rotação da plataforma de suporte do módulo FV.

Figura 4.10 – Sistema de transmissão mecânica

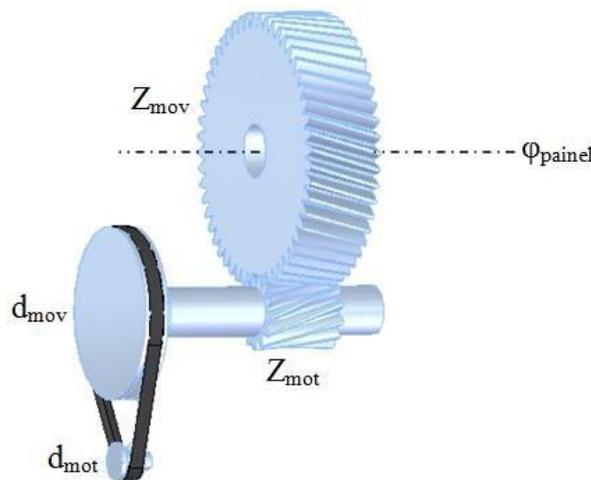


Fonte: (Autoria própria)

A relação de transmissão do deslocamento angular entre a polia motora e a engrenagem movida é dada por (4.1), com parâmetros mostrados na Figura 4.11 (BARBOSA, 2016).

$$n_{pulsos} = \frac{\varphi_{painel} * d_{mov} * Z_{mov}}{d_{mot} * Z_{mot}} * 200 \quad (4.1)$$

Figura 4.11 – Representação dos parâmetros da relação de transmissão



Fonte: (BARBOSA, 2016)

Onde:

$n_{pulsos}$ : número de pulsos por rotação do motor de passo;

$\varphi_{painel}$ : deslocamento angular do painel FV;

$d_{mov}$ : diâmetro da polia movida (mm);

$Z_{mov}$ : número de dentes da engrenagem movida;

$d_{mot}$ : diâmetro da polia motora (mm);

$Z_{mot}$ : número de dentes da engrenagem motora;

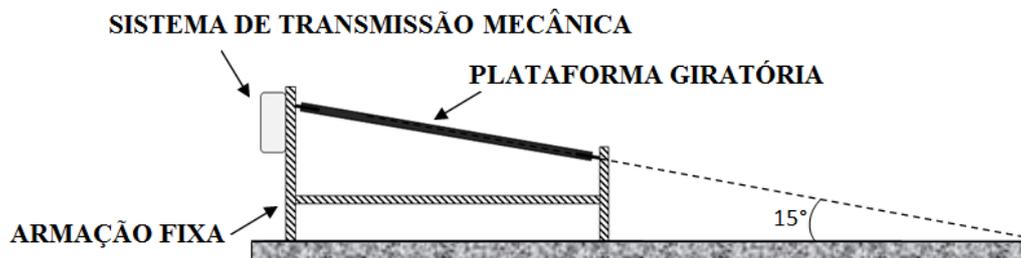
Por meio de (4.1) é possível saber quantos pulsos o microcontrolador deve enviar ao motor de passo para que o mesmo gire o módulo de uma angulação desejada.

#### 4.3.5 Estrutura de suporte do módulo FV

A estrutura de suporte do módulo FV é composta de uma armação fixa e uma plataforma móvel, na qual o módulo está fixado e cujo eixo está conectado ao eixo da

engrenagem movida. A plataforma possui uma inclinação em relação à horizontal de  $15^\circ$  (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Estrutura de suporte do módulo FV



Fonte: (BARBOSA, 2016) (adaptado)

Em testes iniciais, verificou-se que quando o módulo FV encontrava-se em inclinações superiores a  $20^\circ$  em direção a leste ou oeste, a movimentação do módulo não se dava mais de forma uniforme como em inclinações menores, sendo necessário um número maior de pulsos do motor para que o módulo pudesse girar uma mesma angulação. Com isso, verificou-se que era necessário elevar-se o peso do conjunto plataforma giratória e módulo FV para que fosse solicitado um maior torque ao motor de passo e a movimentação se desse sempre de forma uniforme em qualquer angulação.

Dessa forma, instalou-se nas extremidades direita e esquerda do módulo FV, dois parafusos com pesos de 3 kg cada, como mostrado na Figura 4.13. Com isso, além de verificar que a movimentação do módulo passou a se dar sempre de maneira uniforme em qualquer angulação, se teve uma redução do efeito de interferências externas, como o vento e a água da chuva, na estabilização da posição do módulo, pois o mesmo passou a permanecer estático durante os intervalos entre os acionamentos do motor de passo. Com isso, não se faz necessário que as bobinas do motor permaneçam energizadas durante os intervalos para que o motor fique travado em determinada posição, promovendo assim uma economia no consumo de energia do motor.

Figura 4.13 –Parafusos com pesos nas extremidades do módulo FV



Fonte: (Autoria própria)

### 4.3.6 Potenciômetro

De modo a se ter um sinal relativo à angulação do módulo em qualquer instante, utilizou-se como sensor de posição um potenciômetro linear rotativo, que em relação a um *encoder*, apresenta vantagens como simplicidade para utilização e interpretação dos sinais de saída, menor custo e ser desnecessário uma alimentação de forma ininterrupta.

Acoplou-se o eixo de rotação do potenciômetro ao eixo de rotação da plataforma móvel, conforme mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Potenciômetro acoplado ao eixo de rotação da plataforma móvel

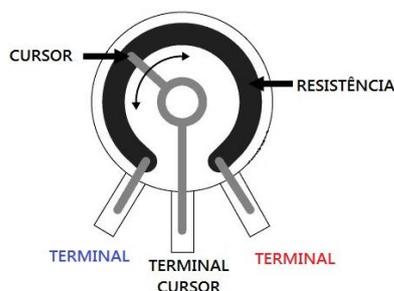


Fonte: (Autoria própria)

Ao se fazer esse acoplamento e manter a carcaça do potenciômetro fixa, à medida que o módulo FV gira, o terminal cursor do potenciômetro gira da mesma forma,

alterando o valor de resistência entre o terminal cursor e os terminais das extremidades, como mostrado na Figura 4.15, convertendo a variação na posição angular em variação de resistência.

Figura 4.15 – Visão interna de um potenciômetro rotativo



Fonte: (FRONTEIRATEC, 2016)

Com isso, conectou-se os terminais das extremidades do potenciômetro a uma fonte de 5 V e através da medida de tensão entre o terminal cursor e o terminal de referência da fonte, pode-se obter um sinal que varia proporcionalmente a variação da angulação do módulo FV.

Em testes iniciais, verificou-se que os potenciômetros mais baratos e mais simples, que são mais facilmente encontrados, apresentaram reduzida precisão, não conseguindo fornecer sinais de saída estáveis e nem sempre fornecendo o mesmo valor de tensão para um mesmo valor de posição angular do módulo FV. Com isso, resolveu-se utilizar um potenciômetro de maior precisão, utilizado em osciloscópios, que conseguiu fornecer sinais de saída com uma boa resolução, de cerca de 20 mV por grau, e estabilidade. O valor da resistência total do potenciômetro é de 10 k $\Omega$ .

Em paralelo com a saída do potenciômetro, colocou-se um capacitor de 220 nF para funcionar como um filtro para ruídos espúrios, que são pequenos transientes de tensão indesejados gerados durante o movimento do potenciômetro.

Para a verificação visual da posição angular do módulo, utilizou-se um transferidor afixado no eixo de rotação da plataforma de suporte do módulo e uma chapa de metal fixada por um ímã, como mostrado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Transferidor para verificação da posição angular do módulo



Fonte: (Autoria própria)

#### 4.3.7 Sensores LDR

Em uma das estratégias de seguimento utilizadas, é necessário o uso de sensores de luminosidade para promover a detecção da posição do Sol. Para essa função, resolveu-se utilizar sensores LDR (do inglês *Light Dependent Resistor*), resistores dependentes de luz, que apresentam um custo reduzido, um bom desempenho/custo, são facilmente encontrados, são robustos e tem boa sensibilidade (CORTEZ, 2013).

Um LDR, também chamado de foto-resistência, é um resistor cuja resistência elétrica varia conforme a incidência da radiação eletromagnética sobre o mesmo. O comprimento de onda dessa radiação situa-se normalmente entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ , faixa onde está compreendida a luz visível (CORTEZ, 2013).

Os LDR's são normalmente compostos de um material semicondutor, normalmente o sulfeto de cádmio (CdS) ou o selenito de cádmio (CdSe). O processo de construção consiste na conexão do material fotossensível com os terminais, sendo uma fina camada exposta à incidência luminosa externa (MORAES, 2012).

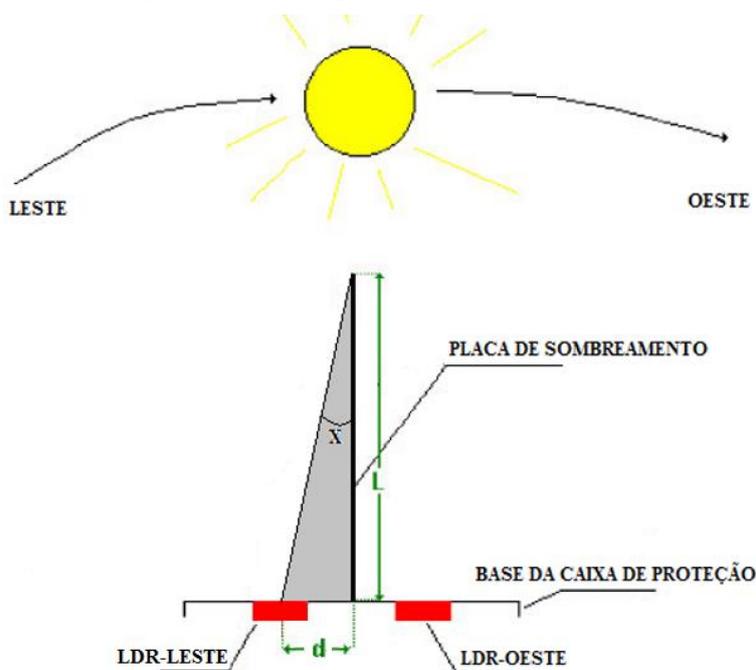
A energia luminosa incidente no LDR desloca elétrons da camada de valência para a de condução (mais longe do núcleo) do material semicondutor, aumentando o número destes e diminuindo a resistência. Conforme a intensidade da radiação incidente aumenta, um número maior de elétrons na estrutura tem também seu nível de energia aumentado, devido à aquisição da energia entregue pelos fótons. O resultado é o aumento de elétrons livres e elétrons fracamente presos ao núcleo (MORAES, 2012).

O valor da resistência de um LDR varia de forma inversamente proporcional à intensidade de radiação solar, apresentando resistência máxima na escuridão total e mínima sob iluminação solar direta em um dia sem nuvens, variando geralmente entre valores da ordem de  $M\Omega$  e dezenas de  $\Omega$  (CORTEZ, 2013).

São sensores imprecisos, impossibilitando seu uso na medição da radiação solar. Porém, podem ser utilizados para a detecção do local de incidência máxima da radiação ao longo de um eixo de rotação, ao se utilizar das estratégias descritas no tópico 2.4.3.2.2 do capítulo 2 deste trabalho.

A estratégia adotada no desenvolvimento deste trabalho foi a descrita na Figura 2.37a, onde utiliza-se uma placa de sombreamento entre dois LDR's para promover sombra em um dos sensores conforme o movimento do Sol. A posição e as dimensões da placa de sombreamento foram determinadas analisando-se a Figura 4.17.

Figura 4.17 – Configuração dos sensores LDR



Fonte: (MONTEIRO, 2007) (adaptado)

Na Figura 4.17, o ângulo “X” é o ângulo de seguimento. Quando a posição angular do módulo em relação ao Sol apresentar um desvio maior ou igual ao ângulo de seguimento, haverá uma diferença significativa no sinal de saída dos LDR's, já que a maior parte do LDR-Leste estará sombreada, o que fará com que o microcontrolador acione o motor para movimentar o módulo FV. Com isso, a precisão no acompanhamento do Sol é dada pelo ângulo “X”.

Ainda na Figura 4.17, o parâmetro “d” corresponde à distância entre cada LDR e a placa de sombreamento, e o parâmetro “L” corresponde à altura da placa de sombreamento. Através do triângulo retângulo formado pelos catetos “d” e “L”, obtém-se (4.2).

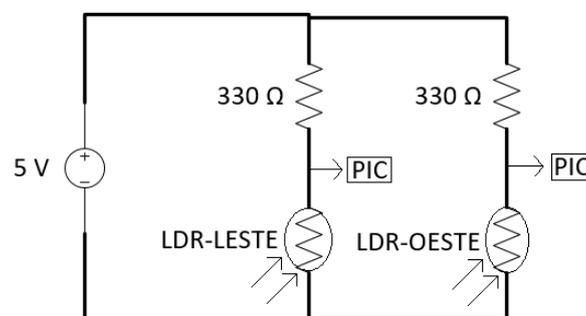
$$\tan X = \frac{d}{L} \quad (4.2)$$

Primeiramente, definiu-se a distância “d” como sendo igual a 0,35 cm, a menor possível, de modo a se reduzir o valor de “X”. A altura “L” foi definida como igual a 10 cm, um valor não muito grande para evitar a influência do vento na sustentação da placa de sombreamento. Com essas definições, por meio de (4.2), obteve-se um valor de “X” igual a 2°, o que é um valor suficiente, tendo em vista que desvios de até 8° causam perdas na captação da radiação solar direta inferiores a 1%, conforme mostrado na Tabela 2.1.

O comprimento da placa de sombreamento foi definido, por meio de testes, como sendo igual a x cm, para que, independentemente do valor do ângulo de altura solar, em qualquer momento sempre fosse possível se fazer sombra no LDR-Leste. Com o ajuste no valor desse comprimento, se tem também uma diminuição da influência da variação da trajetória do Sol de leste a oeste ao longo do ano na capacidade do LDR-Leste poder ser sombreado.

O circuito elétrico utilizado para obtenção de sinais de tensão proporcionais à resistência dos sensores LDR durante o dia foi o mostrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Esquemático do circuito elétrico para os LDR’s



Fonte: (Autoria própria)

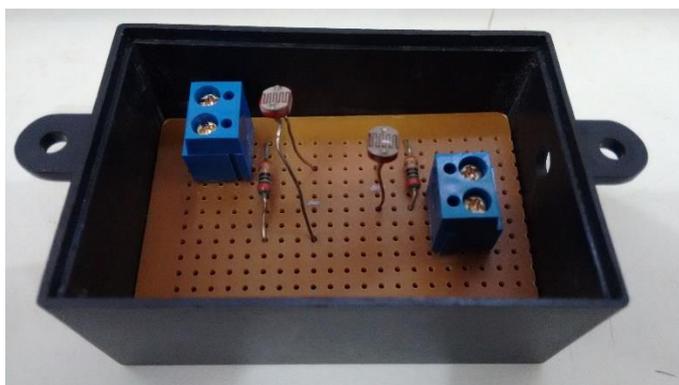
Através de testes, chegou-se à conclusão que o valor de  $330 \Omega$  para a resistência elétrica no circuito era o que fazia com que os sensores LDR apresentassem uma maior diferença entre os sinais de tensão na escuridão total e sob a incidência solar direta em um dia claro. Com isso, garantiu-se que a sensibilidade dos sensores era a maior possível e pequenas variações na radiação solar já resultariam em variações na resistência dos LDR's.

O valor de tensão elétrica sobre cada um dos LDR's é lido pelo microcontrolador, que realiza a constante comparação desses valores e aciona o motor de passo quando for percebido uma diferença entre os mesmos que indique um desvio angular do módulo FV em relação ao Sol superior ao ângulo de seguimento, como mostrado na Figura 4.17.

De modo a se utilizar dois sensores LDR que apresentassem um valor de resistência o mais próximo possível entre si para as mesmas condições de radiação solar, realizou-se testes com vários LDR's sob diferentes condições de iluminação, desde a iluminação solar direta em um dia sem nuvens até a escuridão total.

Com isso, tendo escolhido dois LDR's praticamente idênticos, montou-se o circuito mostrado na Figura 4.18 em uma placa e utilizou-se uma caixa patola de cor preta para proteger o circuito (Figura 4.19).

Figura 4.19 – Placa do circuito dos LDR's com a caixa de proteção



Fonte: (Autoria própria)

Então, afixou-se a placa de sombreamento, que consiste em uma chapa de alumínio pintada na cor preta para evitar reflexões da luz do Sol nos LDR's, na caixa de proteção e afixou-se a caixa na parte superior central do módulo FV (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Placa do circuito dos LDR's com a caixa de proteção e a placa de sombreamento



Fonte: (Autoria própria)

#### 4.3.8 Fonte de alimentação

O microcontrolador, o módulo RTC, o potenciômetro, a placa dos sensores LDR e o motor de passo necessitam de uma tensão de alimentação de 5 Vcc. O CI MC34152 da Figura 4.7 necessita de uma tensão de alimentação de 15 Vcc. Para alimentar esses componentes, desenvolveu-se uma fonte de alimentação de duas saídas, 5 Vcc e 15 Vcc, mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Fonte de alimentação de duas saídas



Fonte: (Autoria própria)

Devido ao fato da corrente solicitada pelo motor de passo ser elevada (4,7 A por fase), utilizou-se uma fonte de computador para a sua alimentação.

## 4.4 Aquisição e armazenamento de dados

### 4.4.1 Piranômetro

Para a medição dos valores de irradiância solar global incidente no plano horizontal, utilizou-se um piranômetro de segunda classe de modelo LP02 do fabricante Hukseflux, que está em conformidade com o manual da *World Meteorological Organization* (WMO) e a ISO 9060 (HUKSEFLUX, 2016). Na Tabela 4.4 são mostradas as especificações deste modelo e na Figura 4.22 é mostrado o piranômetro instalado no teto do LEA, alinhado com o plano horizontal.

Tabela 4.4 – Especificações do piranômetro LP02

<b>Tempo de resposta (95%)</b>	18 segundos
<b>Deslocamento da origem (devido a 200 W/m<sup>2</sup> de radiação térmica)</b>	$< \pm 15 \text{ W/m}^2$
<b>Deslocamento da origem (devido a mudança da temperatura ambiente de 5 K/hr)</b>	$< \pm 4 \text{ W/m}^2$
<b>Não-estabilidade</b>	$< \pm 1\%$ (mudança por ano)
<b>Não-linearidade</b>	$< \pm 1\%$ (100 a 1000 W/m <sup>2</sup> )
<b>Sensibilidade (nominal)</b>	$15 \times 10^{-6} \text{ V/(W/m}^2)$
<b>Saída esperada sob radiação solar natural</b>	-0,1 a $50 \times 10^{-3} \text{ V}$
<b>Faixa espectral</b>	0,285 a $3 \times 10^{-6} \text{ m}$
<b>Faixa de medição</b>	0 a 2000 W/m <sup>2</sup>
<b>Faixa de resistência do sensor</b>	40 a 60 $\Omega$
<b>Temperatura de operação</b>	-40 a 80 °C
<b>Classe de proteção IP</b>	IP 67

Fonte: (HUKSEFLUX, 2016)

Figura 4.22 – Piranômetro instalado no teto do LEA



Fonte: (Autoria própria)

#### 4.4.2 Placa de medição e condicionamento de sinais

Para a medição dos valores de tensão e corrente fornecidos pelos módulos FV, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso, mostrada na Figura 4.23. Nesta placa também é feito o acionamento das cargas, a serem descritas no próximo tópico deste trabalho, e o condicionamento dos sinais medidos às restrições de entrada do dispositivo armazenador de dados.

Figura 4.23 – Placa de circuito impresso para medição e condicionamento de sinais



Fonte: (Autoria própria)

Para a medição de corrente elétrica dos módulos FV utilizou-se dois sensores de corrente lineares de efeito hall de modelo ACS712-20 da fabricante Allegro (Figura 4.24), que possuem capacidade de medição de 20 A, tensão de alimentação igual a 5 V e tensão máxima de saída igual a 5 V.

Figura 4.24 – Sensor de corrente ACS712-20



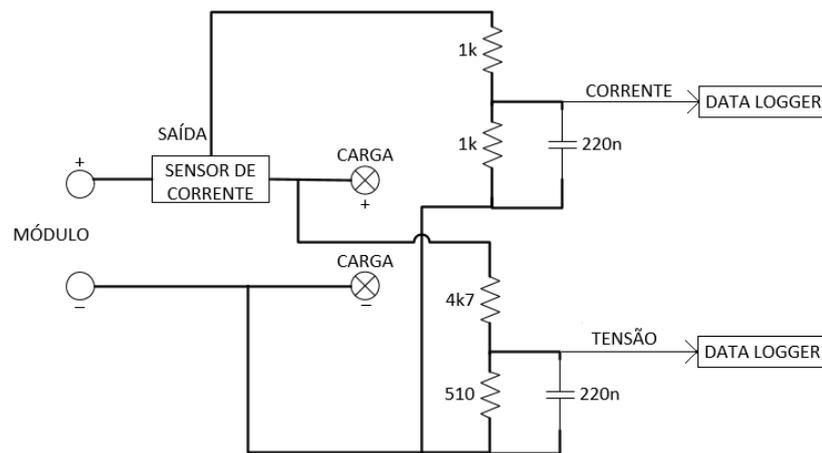
Fonte: (Autoria própria)

O dispositivo armazenador de dados utilizado foi um *data logger*, que será descrito com mais detalhes no tópico 4.4.4 do capítulo 4. Este dispositivo possui a restrição de que o valor de tensão nas suas entradas não ultrapasse 2,5 V. Com isso, para adequar o sinal de saída dos sensores de corrente, que tem valor máximo de 5 V, conectou-se a saída dos sensores à circuitos na configuração de divisor resistivo, que forneciam em suas saídas valores de tensão duas vezes menores que os valores fornecidos pelos sensores de corrente.

A medição da tensão elétrica dos módulos FV foi feita através de circuitos na configuração de divisor resistivo, que forneciam em suas saídas valores de tensão dez vezes menores que os valores fornecidos pelos módulos nas suas entradas. Com isso, o valor máximo de saída destes circuitos é de 2,17 V, tendo em vista que a tensão máxima de saída dos módulos é de 21,7 V, conforme mostrado na Tabela 4.1.

O esquemático do circuito, para cada módulo, da placa de medição e condicionamento de sinais da Figura 4.23 é mostrado na Figura 4.25. Em paralelo com cada saída para o *data logger*, utilizou-se um capacitor de 220 nF de modo a filtrar ruídos. Para a alimentação dos sensores de corrente utilizou-se a fonte de alimentação mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.25 – Circuito esquemático, para cada módulo, da placa de medição e condicionamento de sinais dos dois módulos



Fonte: (Autoria própria)

#### 4.4.3 Cargas

De modo a se determinar a potência das cargas que vão ser utilizadas para os módulos FV, primeiramente analisou-se a potência máxima de saída que cada módulo pode fornecer.

Com o passar do tempo há uma degradação da potência dos módulos FV de silício cristalino instalados em campo de 0,5% a 1% ao ano. Geralmente os fabricantes dão a garantia que a potência de pico ( $W_p$ ) seja pelo menos 90% da potência nominal para os 10 primeiros anos de operação do módulo e seja pelo menos 80% por um período de 20 a 25 anos (CRESESB, 2014).

Tendo em vista que os módulos utilizados são do ano de 2006, a potência de pico fornecida pelos mesmos pode ter um valor inferior ao nominal. Para verificar essa potência máxima, utilizou-se um traçador de curvas IxV (corrente *versus* tensão), que, dentre outros parâmetros, fornece o valor da máxima potência que o módulo FV, ao qual esteja conectado, consegue fornecer para as condições de irradiância solar global e temperatura de célula verificadas por uma célula de referência.

O traçador utilizado, mostrado na Figura 4.26 juntamente com a sua célula de referência, é do modelo mini-KLA do fabricante alemão Ingenieurbüro.

Figura 4.26 – Traçador de curvas IxV de modelo Mini-KLA



Fonte: (Autoria própria)

Então, primeiramente, verificou-se por meio do piranômetro instalado no teto do LEA, que os maiores valores de irradiância solar registrados durante o ano eram

próximos a  $1150 \text{ W/m}^2$ . Com isso, ao se utilizar o traçador de curvas IxV conectado ao módulo FV nestas condições de irradiância solar, pode-se obter qual o maior valor de potência que o módulo pode fornecer, tendo em vista que em irradiâncias menores, a potência fornecida será menor.

Realizou-se várias medições em dois dias distintos. No primeiro dia, verificou-se que, para o valor de irradiância máxima registrada de  $1118 \text{ W/m}^2$ , o módulo FV apresentava uma potência máxima de  $56,68 \text{ W}$ . No segundo dia, verificou-se que para um valor de irradiância de  $1163 \text{ W/m}^2$ , a potência máxima do módulo era igual a  $57,46 \text{ W}$ . Com isso, a potência das cargas deve ser próxima a esses valores de potência máxima verificados.

Então, como o principal objetivo é a comparação na geração de energia elétrica de ambos os módulos, estabeleceu-se como padrão uma carga fixa, resistiva, com potência nominal próxima à capacidade de geração de potência máxima pelos módulos. Desta maneira, ambos os módulos ficam submetidos às mesmas condições de carga, alimentando uma carga que é capaz de suportar a potência que eles conseguem gerar, em qualquer condição de insolação.

Realizou-se testes com lâmpadas halógenas dicróicas de  $50 \text{ W}$  e  $12 \text{ V}$ , e verificou-se que as mesmas conseguiam suportar uma potência superior à sua potência nominal durante longos intervalos de tempo, alcançando valores de cerca de  $60 \text{ W}$  em  $12 \text{ V}$ . Com isso, tendo em vista que os módulos vão fornecer a sua potência máxima somente em curtos intervalos de tempo, em horários próximos ao meio dia solar e sob condições ideais de carga, mostrou-se adequado a utilização de uma lâmpada halógena dicróica de  $50 \text{ W}$  e  $12 \text{ V}$  como carga para cada um dos módulos. Por meio de testes iniciais, verificou-se que os módulos sempre forneceram a maior potência possível em qualquer instante, não havendo nenhuma limitação de potência por conta das lâmpadas utilizadas. Na Figura 4.27 são mostradas as lâmpadas utilizadas.

#### **4.4.4 Data Logger**

Para se fazer o armazenamento dos dados medidos de irradiância solar e de tensão e corrente dos dois módulos FV, utilizou-se um *data logger*, de modelo CR10X do fabricante Campbell (Figura 4.28).

A alimentação do *data logger* é feita através de uma bateria de  $12 \text{ V}$ , que é carregada por um módulo FV de  $20 \text{ Wp}$ , localizado no teto do LEA. Como já mencionado

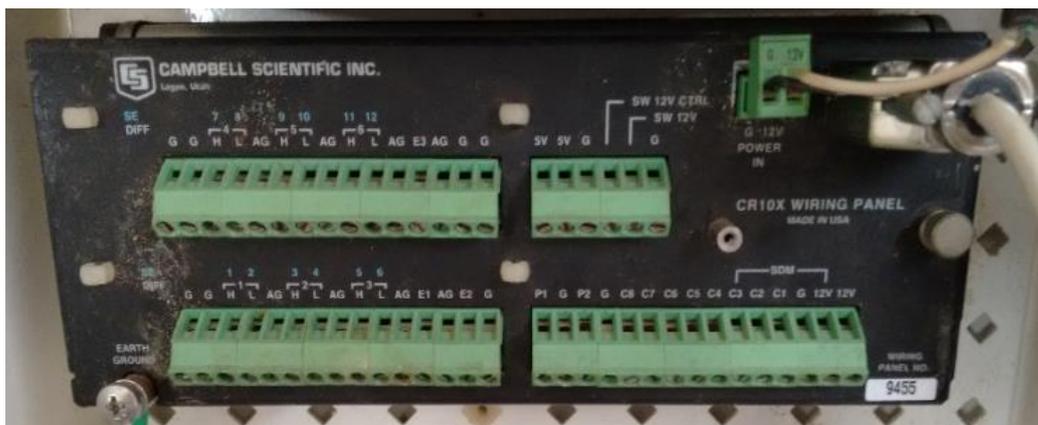
anteriormente, as entradas analógicas do *data logger* apresentam uma limitação de tensão de 2,5 V.

Figura 4.27 – Lâmpadas utilizadas como cargas para os módulos FV



Fonte: (Autoria própria)

Figura 4.28 – *Data logger* CR10X



Fonte: (Autoria própria)

A comunicação com o *data logger* é feita através de uma porta serial RS 232, por onde é feita a programação do mesmo e a transferência dos dados armazenados para um computador. O *data logger* está parametrizado para realizar coletas a cada 1 segundo e médias a cada 1 minuto.

#### 4.5 Estratégias de seguimento

Como estratégias para se fazer o controle da movimentação do motor para o acompanhamento do movimento do Sol, utilizou-se os métodos de controle em malha aberta e em malha fechada descritos no tópico 2.4.3.2 do capítulo deste trabalho.

Primeiramente, analisando-se valores de irradiância solar global fornecidos pelo piranômetro, instalado no teto do LEA, durante vários dias ao longo do ano, verificou-se que, na maioria dos dias, em períodos antes das 6 horas e após as 17 horas, a irradiância solar apresentava valores inferiores a  $100 \text{ W/m}^2$ . Nestas condições de irradiância, a potência de saída dos módulos é próxima a zero. Com isso, definiu-se que o sistema de seguimento solar iria funcionar no período entre as 6 horas e as 17 horas.

Definiu-se também a angulação de seguimento como sendo igual a 80 graus, ou seja, durante o dia o módulo deve girar desde uma angulação de  $40^\circ$  a leste (posição inicial) até uma angulação de  $40^\circ$  a oeste (posição final), em torno do eixo de sustentação da plataforma de suporte. Não foi possível se trabalhar com angulações maiores devido ao espaço físico disponível ser reduzido no teto do LEA, onde os módulos FV estão instalados, pelo fato de haver outros trabalhos com módulos FV sendo desenvolvidos no mesmo período no LEA. Portanto, definiu-se esse valor de angulação de modo a garantir que durante o dia não haja o surgimento de sombras, geradas por obstáculos ou por outros módulos, sobre os módulos utilizados nos experimentos.

Em todas as estratégias de seguimento, ao final do dia, as 17 horas, o microcontrolador aciona o motor de passo para que o mesmo mova o módulo  $80^\circ$  em direção ao leste e volte para a posição inicial (angulação de  $40^\circ$  em direção ao leste) para o começo de um novo dia.

#### ***4.5.1 Controle em malha aberta***

##### *4.5.1.1 Seguimento de forma pré-definida*

A primeira estratégia consiste em se fazer o seguimento solar de forma pré-definida, estabelecendo-se que o módulo FV deve girar de uma determinada angulação em direção ao oeste em intervalos de tempo também definidos.

A atualização da posição do módulo foi feita de duas formas:

a) a cada 10 minutos: módulo gira  $1,23^\circ$  em direção ao oeste a cada 10 minutos, desde as 6 horas até as 17 horas;

b) a cada 30 minutos: módulo gira  $3,81^\circ$  em direção ao oeste a cada 30 minutos, desde as 6 horas até as 17 horas.

#### 4.5.1.2 Seguimento com algoritmos de cálculo da posição do Sol

De modo a se fazer o seguimento do Sol de forma mais precisa, sem a necessidade de sensores para detecção da posição solar, pode-se utilizar algoritmos matemáticos para o cálculo dos ângulos que determinam a posição do Sol, em relação a um referencial na Terra, a cada instante durante o dia.

A partir destes ângulos, calculados em função da hora do dia, do dia do ano, e da localização geográfica, pode se fazer o posicionamento do módulo FV para que o mesmo esteja sempre perpendicular aos raios solares.

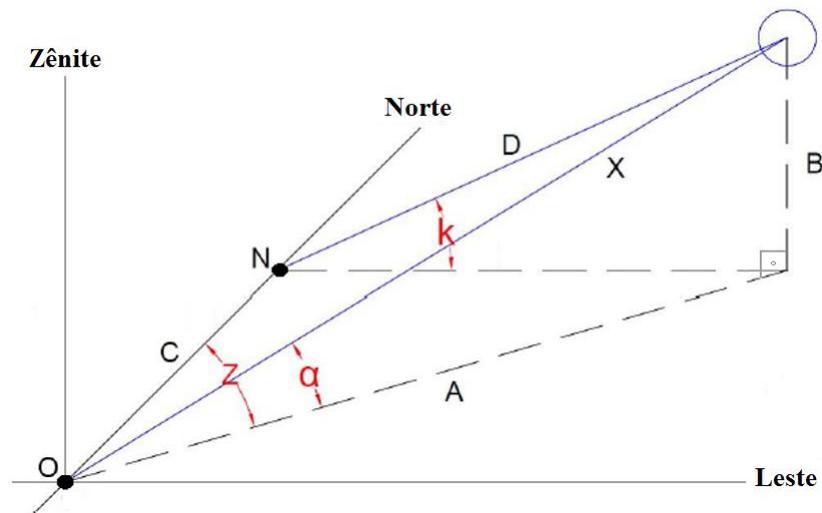
Para isso, utilizou-se o algoritmo desenvolvido por Blanco-Muriel *et al.* (2001), na Plataforma Solar de Almería, na Espanha. Este algoritmo combina precisão e simplicidade, se mostrando mais preciso (melhoria na precisão entre 15% e 22%) que outros algoritmos já desenvolvidos por outros autores (BLANCO-MURIEL *et al.*, 2001), e também é utilizado em outros trabalhos na área de seguimento solar. A seguir é feita a descrição deste algoritmo.

As entradas para o algoritmo são: a data (dia, mês e ano); a hora universal (horas, minutos e segundos), sem uso de fusos horários; e as coordenadas de latitude e longitude do local. Como resultados, o algoritmo fornece o ângulo de zênite e o ângulo de azimute solar a cada segundo.

Para realizar a mudança do posicionamento do módulo FV ao longo de um eixo, de leste a oeste, deve-se utilizar um ângulo que acompanhe tanto as variações na altura solar quanto no ângulo de azimute solar. Conforme verificado por Negreiros (2015), este ângulo é o ângulo denominado de “k” na Figura 4.29.

Como a inclinação dos módulos FV foi ajustada para o valor ótimo para o período dos experimentos, conforme descrito na seção 4.2 do presente capítulo, ao meio dia solar os raios solares estarão incidindo de forma praticamente perpendicular nos módulos, o que faz com que seja mais adequado considerar que os módulos estejam em um ponto de referência N na Figura 4.29, ao invés do ponto O. Com isso, o ângulo para melhor se fazer o acompanhamento do movimento do Sol de leste a oeste durante o dia é o ângulo “k”, ao invés do ângulo de azimute solar “z”.

Figura 4.29 – Representação do ângulo k



Fonte: (NEGREIROS, 2015) (adaptado)

Para a obtenção do ângulo “k”, primeiramente obtém-se as seguintes expressões ao analisar a Figura 4.29.

$$A = X \cdot \cos \alpha \quad (4.3)$$

$$B = X \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.4)$$

$$C = X \cdot \cos \alpha \cdot \cos z \quad (4.5)$$

Para encontrar-se o valor da medida D, utiliza-se o teorema de Pitágoras no triângulo retângulo formado pelos catetos C e D, resultando em:

$$X^2 = C^2 + D^2$$

$$D = \sqrt{X^2 - X^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 z}$$

$$D = X \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 z} \quad (4.6)$$

Agora para encontrar o valor do ângulo k, utiliza-se a definição do seno de um ângulo, resultando em:

$$\text{sen } k = \frac{B}{D} = \frac{X \cdot \text{sen } \alpha}{X \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 z}}$$

$$k = \arcsen \left( \frac{\text{sen } \alpha}{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 z}} \right) \quad (4.7)$$

Desenvolveu-se uma planilha de cálculo no *software* Microsoft Excel com a formulação matemática do algoritmo, para a obtenção dos ângulos solares a cada minuto em qualquer dia para a localidade do LEA, na cidade de Fortaleza/CE, e conseqüentemente a obtenção do ângulo  $k$  para se fazer o devido posicionamento do módulo FV com seguimento solar.

O posicionamento foi feito ajustando a posição angular do módulo de forma complementar ao valor do ângulo  $k$ , limitando-se a angulação máxima a  $40^\circ$  em direção ao leste ou oeste.

De modo a verificar os ganhos energéticos máximo e mínimo que essa estratégia de seguimento pode disponibilizar na cidade de Fortaleza, e a precisão necessária no acompanhamento do movimento do Sol, ou seja, até que valor de desvio angular do módulo em relação ao Sol não há perdas significativas na geração de energia elétrica pelo módulo, foram utilizadas três estratégias para a atualização da posição do módulo em dias claros e em dias nublados. Na primeira estratégia, a posição do módulo era atualizada a cada minuto. Na segunda, a atualização era feita a cada 10 minutos. Enquanto que na terceira, a posição era atualizada a cada 60 minutos.

#### ***4.5.2 Controle em malha fechada***

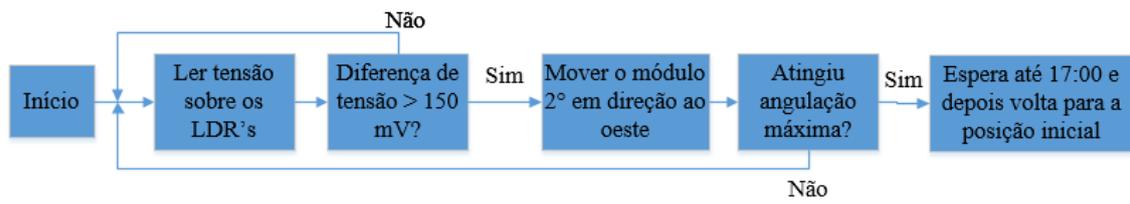
A estratégia de seguimento com controle em malha fechada do posicionamento do módulo FV utilizou-se da estrutura com os sensores LDR mostrada na Figura 4.20.

A estratégia consiste em se fazer a constante comparação dos valores de tensão sobre os LDR's, a partir do circuito da Figura 4.18, por meio do microcontrolador. Ao verificar-se que há uma diferença entre as tensões dos LDR's, indicando a situação mostrada na Figura 4.17, onde o LDR-Leste está sombreado (módulo FV está desalinhado com o Sol), o microcontrolador acionará o motor de passo para girar o módulo até que essa diferença de tensão seja minimizada e o desvio angular do módulo com o Sol seja inferior ao ângulo de seguimento.

A verificação da angulação máxima,  $40^\circ$  em direção ao oeste, foi feita com o uso do potenciômetro mostrado na Figura 4.14. Quando esta angulação máxima for alcançada, o módulo permanece parado até as 17 horas.

O fluxograma do funcionamento desta estratégia de seguimento é mostrado na Figura 4.30.

Figura 4.30 – Fluxograma da estratégia de seguimento com controle em malha fechada



Fonte: (Autoria própria)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos com a realização de experimentos com o sistema de seguimento solar desenvolvido. Nestes experimentos, utilizou-se as três estratégias de acompanhamento do movimento do Sol (de forma pré-definida, com uso do algoritmo solar e com uso de sensores LDR) descritas na seção 4.5 do capítulo 4 deste trabalho.

Com a realização dos experimentos pretende-se: avaliar a eficiência do sistema de seguimento solar desenvolvido e das estratégias de seguimento utilizadas; verificar os ganhos na geração de energia elétrica que o seguimento pode proporcionar em diferentes condições climáticas e com diferentes estratégias; analisar a precisão necessária no seguimento do Sol, verificando se, para as estratégias com um intervalo maior de atualização da posição do módulo e com desvios maiores na posição do módulo em relação à posição ideal, os ganhos de geração de energia elétrica apresentam uma queda importante; determinar o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento; obter o ganho energético líquido que o mesmo pode proporcionar.

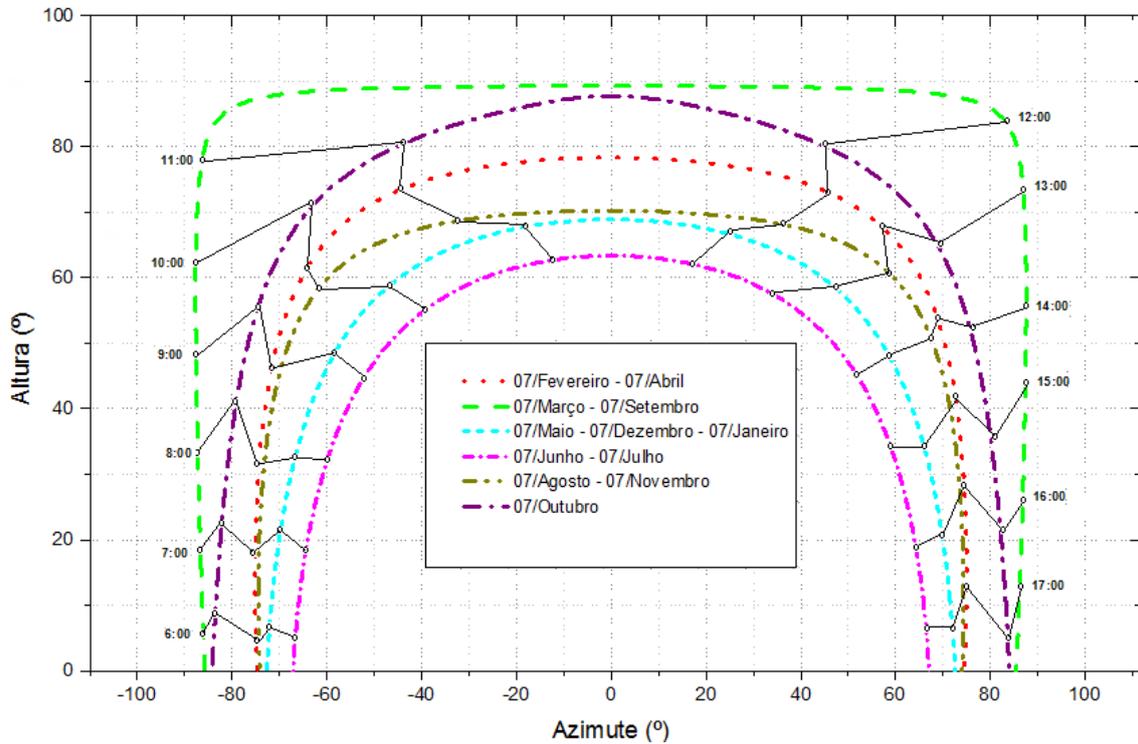
### 5.1 Experimentos realizados

#### 5.1.1 Seguimento baseado no algoritmo solar

Primeiramente, de modo a se ter uma noção do comportamento dos ângulos de altura solar e azimute solar durante o dia e ao longo do ano na cidade de Fortaleza/CE, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 5.1, com o auxílio do algoritmo de cálculo da posição do Sol desenvolvido por Blanco-Muriel *et al.* (2001), citado no tópico 4.5.1.2 do capítulo 4 deste trabalho.

A partir da Figura 5.1, pode-se ver que, no período entre as 10 horas e as 13 horas, o azimute solar apresenta maiores variações e altura solar permanece praticamente constante. Nos demais períodos do dia, ocorre o inverso, ou seja, a altura solar varia bastante enquanto que o azimute solar apresenta pequenas variações. Isso mostra que, para acompanhar as variações da posição do Sol nestes dois períodos, o seguimento do Sol de um eixo deve ser feito acompanhando variações em um ângulo, o ângulo  $k$  mostrado no tópico 4.5.1.2 do capítulo 4 deste trabalho, que varia em função tanto do azimute solar quanto da altura solar.

Figura 5.1 – Variação dos ângulos solares durante dias do ano em Fortaleza/CE



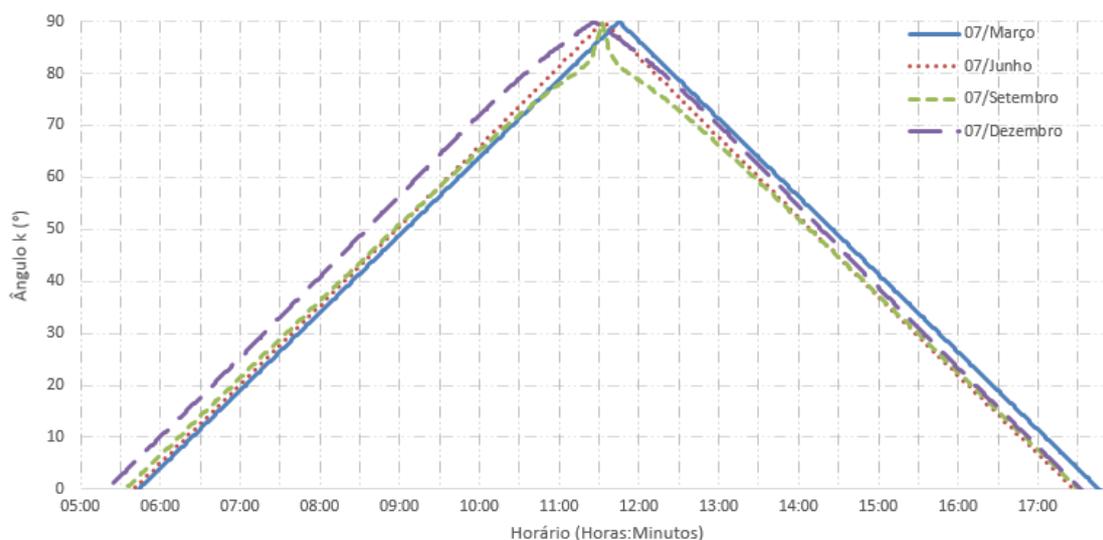
Fonte: (Autoria própria)

Nota-se também que em determinados meses do ano, a altura solar média ao longo dos dias é maior do que em outros, já que a declinação solar é próxima ao valor da latitude local. Isto faz com que nesses meses os raios solares incidam de forma mais perpendicular na superfície do local e haja uma maior parcela da componente da radiação direta na radiação global, fazendo com que os ganhos que um sistema de seguimento solar pode proporcionar sejam maiores, como mostrado no tópico 2.3.2 do capítulo 2 do presente trabalho.

Para se ter uma noção do comportamento do ângulo  $k$  na cidade de Fortaleza/CE, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 5.2, que mostra a variação deste ângulo durante o dia em determinados meses.

Pode-se ver que a variação do ângulo  $k$  é praticamente constante durante o dia e ao longo do ano, apresentando valor máximo ( $90^\circ$ ) ao meio dia solar, em horários entre 11 horas e 12 horas conforme o mês.

Figura 5.2 – Variação do ângulo k na cidade de Fortaleza/CE durante o dia e ao longo do ano



Fonte: (Autoria própria)

Através do algoritmo solar, também se obteve os dados mostrados na Tabela 5.1 para a cidade de Fortaleza, mostrando que a duração dos dias é praticamente constante ao longo do ano nesta localidade.

Tabela 5.1 – Horários de nascer, pico e pôr do sol ao longo do ano em Fortaleza

<b>Dia</b>	<b>Nascer do Sol</b>	<b>Pico do Sol</b>	<b>Pôr do Sol</b>
<b>07 de março</b>	05:44	11:45	17:45
<b>07 de junho</b>	05:40	11:33	17:27
<b>07 de setembro</b>	05:34	11:32	17:30
<b>07 de dezembro</b>	05:20	11:26	17:32

Fonte: (Autoria própria)

O posicionamento do módulo FV com seguimento foi feito ajustando a angulação em relação ao eixo de rotação da plataforma de forma complementar ao ângulo k, sendo a angulação máxima limitada a 40° em direção a leste ou oeste.

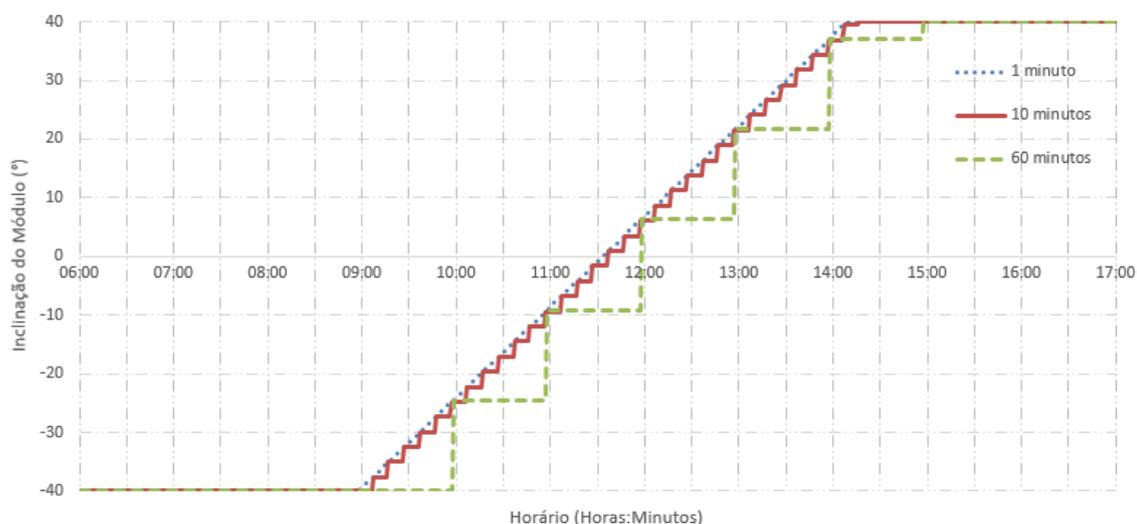
Para se fazer a atualização do posicionamento do módulo, foram utilizadas três estratégias:

- a) seguimento a cada 1 minuto: módulo gira 0,25° em direção ao oeste a cada minuto;
- b) seguimento a cada 10 minutos: módulo gira 2,5° em direção ao oeste a cada 10 minutos;

c) seguimento a cada 60 minutos: módulo gira  $15^\circ$  em direção ao oeste a cada 60 minutos.

A Figura 5.3 mostra a posição angular do módulo durante o dia utilizando as três estratégias de atualização de posição descritas acima, tomando como base os ângulos solares do dia 7 de junho de 2016 para a cidade de Fortaleza/CE. Valores de angulação negativos indicam uma angulação em direção ao leste.

Figura 5.3 – Posição angular do módulo durante o dia com diferentes estratégias para atualização do posicionamento



Fonte: (Autoria própria)

A partir da Figura 5.3, verifica-se que a atualização da posição do módulo FV é feita somente durante o período entre as 9 horas e as 14h10min, devido a limitação da angulação máxima. Isso reduz consideravelmente o horário para o funcionamento do sistema de seguimento, reduzindo o consumo de energia elétrica do mesmo.

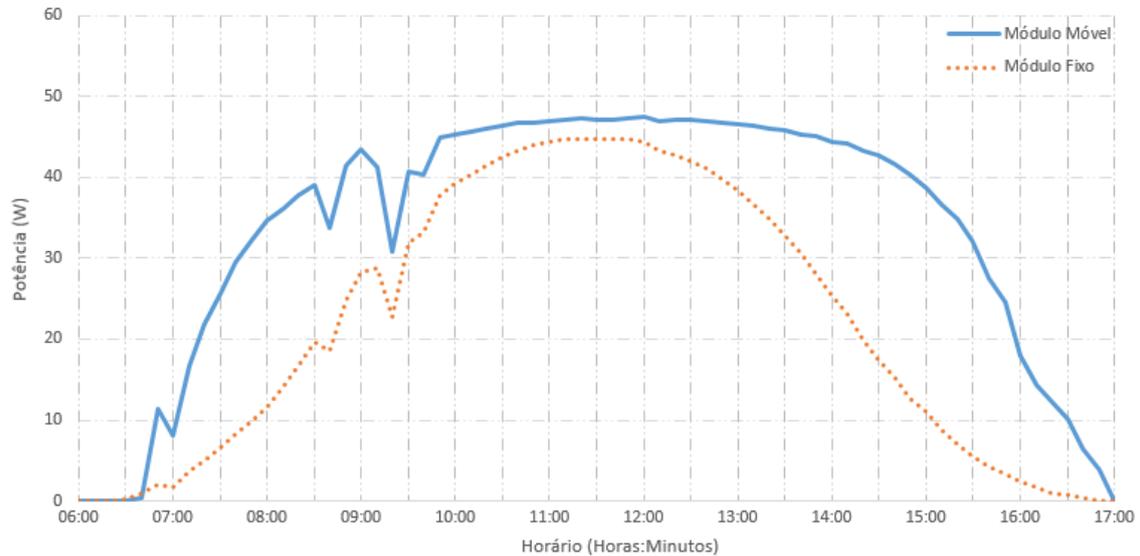
Para todos os demais dias do mês de junho, onde foram realizados os experimentos, as únicas diferenças verificadas foram os horários da primeira e última atualização da posição, apresentando variações máximas de 3 minutos ao longo do mês.

Primeiramente, utilizando o sistema de seguimento com a atualização da posição sendo feita a cada 1 minuto, com base no algoritmo solar, foram realizados experimentos nos dias 10, 11, 18 e 19 do mês de junho de 2016.

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos FV fixo e móvel durante o dia 19 de junho é mostrado na Figura 5.4. De forma a melhorar a visualização dos gráficos, tendo em vista a grande variabilidade no caráter da radiação

solar, utilizou-se os valores de potência média a cada 10 minutos para todos os gráficos a serem apresentados neste capítulo.

Figura 5.4 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 19 de junho



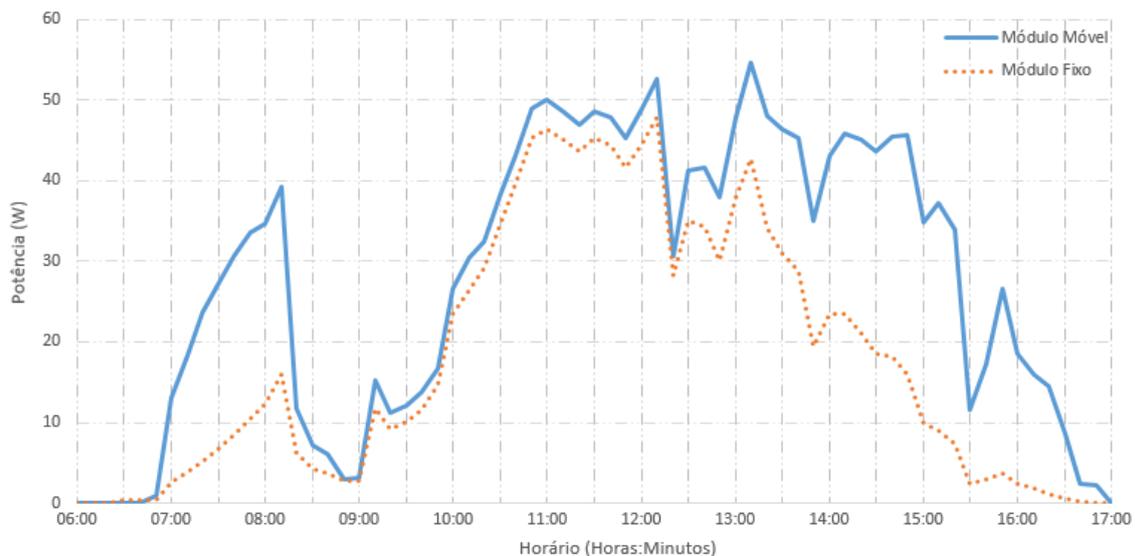
Fonte: (Autoria própria)

No dia 19 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 6,10 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 242,78 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 373,25 Wh, mostrando um ganho bruto, sem considerar o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento, na geração de energia elétrica de 130,47 Wh (53,74%).

Pode-se observar que ao meio dia solar, por volta das 11h30min, quando a posição dos módulos é praticamente igual, há uma diferença de potência. Com isso, verifica-se que os módulos utilizados não são exatamente idênticos, apesar de terem as mesmas especificações e serem do mesmo ano. Porém, como esse valor de diferença de potência é reduzido, sendo inferior a 5% em todos os dias de experimentos realizados, os resultados obtidos continuam sendo válidos.

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 18 de junho é mostrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 18 de junho

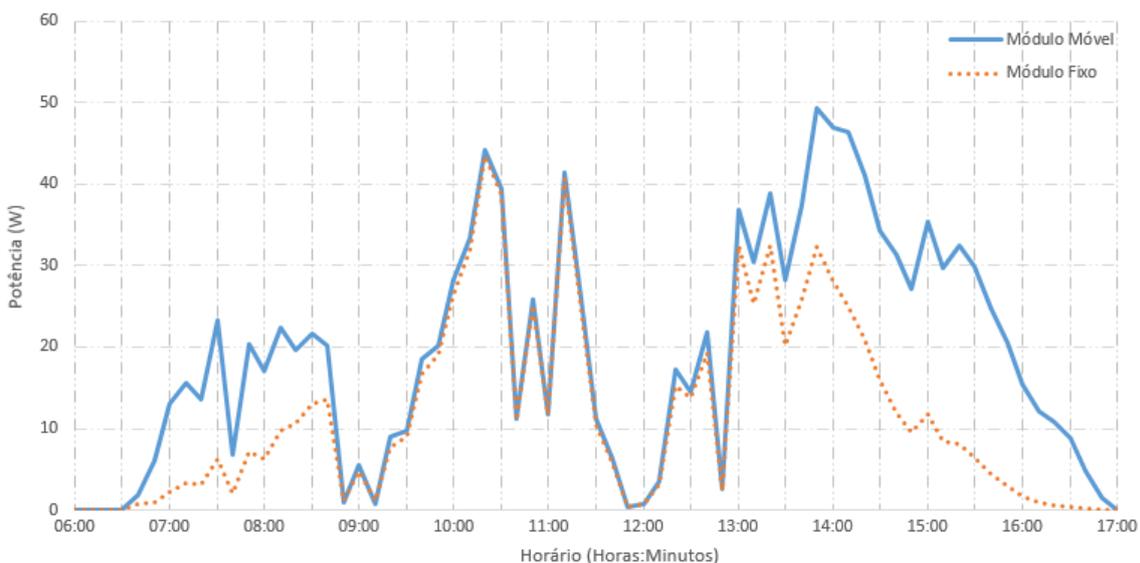


Fonte: (Autoria própria)

No dia 18 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 5,40 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 197,08 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 308,18 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 111,11 Wh (56,38%).

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 11 de junho é mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 11 de junho

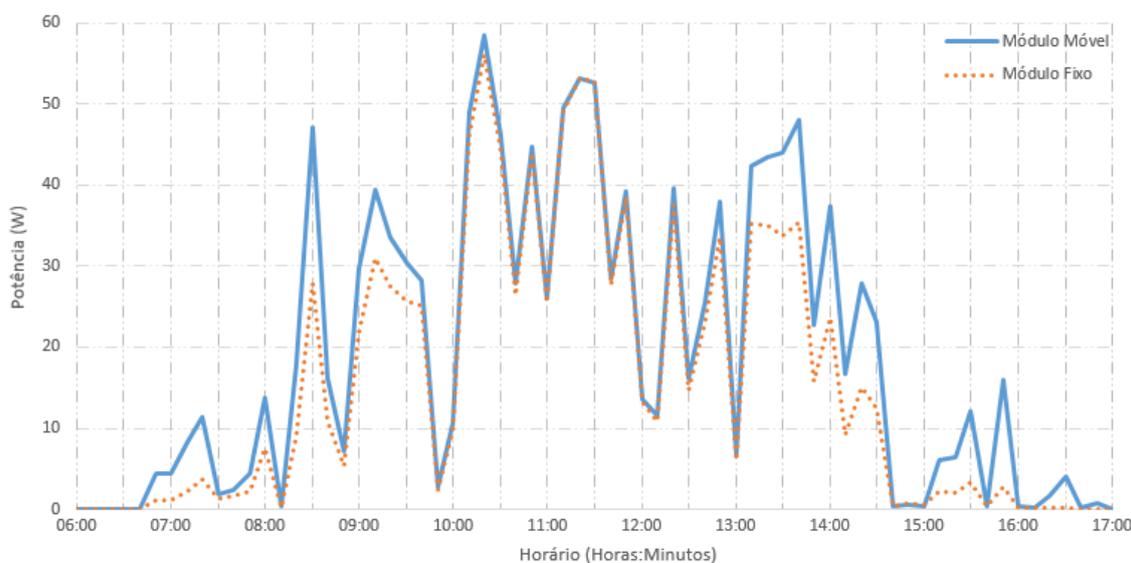


Fonte: (Autoria própria)

No dia 11 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 4,58 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 131,25 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 213,04 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 81,79 Wh (62,32%).

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 10 de junho é mostrado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 10 de junho



Fonte: (Autoria própria)

No dia 10 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 4,63 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 174,58 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 215,61 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 41,04 Wh (23,51%).

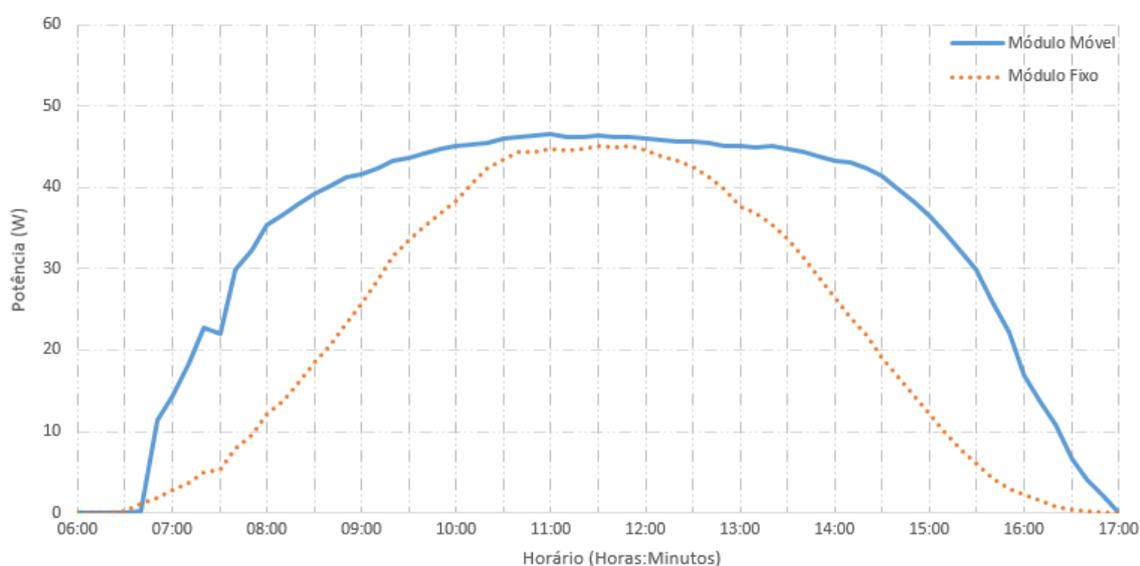
Pode-se ver que ganhos significativos foram obtidos, mostrando a eficácia do sistema de seguimento desenvolvido e da estratégia de seguimento utilizada.

Verificou-se que mesmo em dias de céu parcialmente nublado, como no dia 11 de junho, o ganho energético permaneceu em um valor considerável, devido principalmente ao fato de que neste dia no período da manhã, antes das 10 horas, e da tarde, após as 13 horas, verificou-se períodos de céu claro que contribuíram para o aumento no ganho energético, tendo em vista que nestes períodos do dia o seguimento solar apresenta os maiores ganhos, devido ao maior desvio do módulo fixo em relação ao Sol.

Os ganhos apresentaram uma queda acentuada quando, além do fato do céu estar nublado durante boa parte do dia, como no dia 10 de junho, valores reduzidos de irradiação solar foram observados nos períodos onde os ganhos com o seguimento são maiores, contribuindo para a redução do ganho diário.

Utilizando o sistema de seguimento com a atualização da posição sendo feita a cada 10 minutos realizou-se um experimento no dia 21 de junho. O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos FV fixo e móvel durante este dia é mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 21 de junho

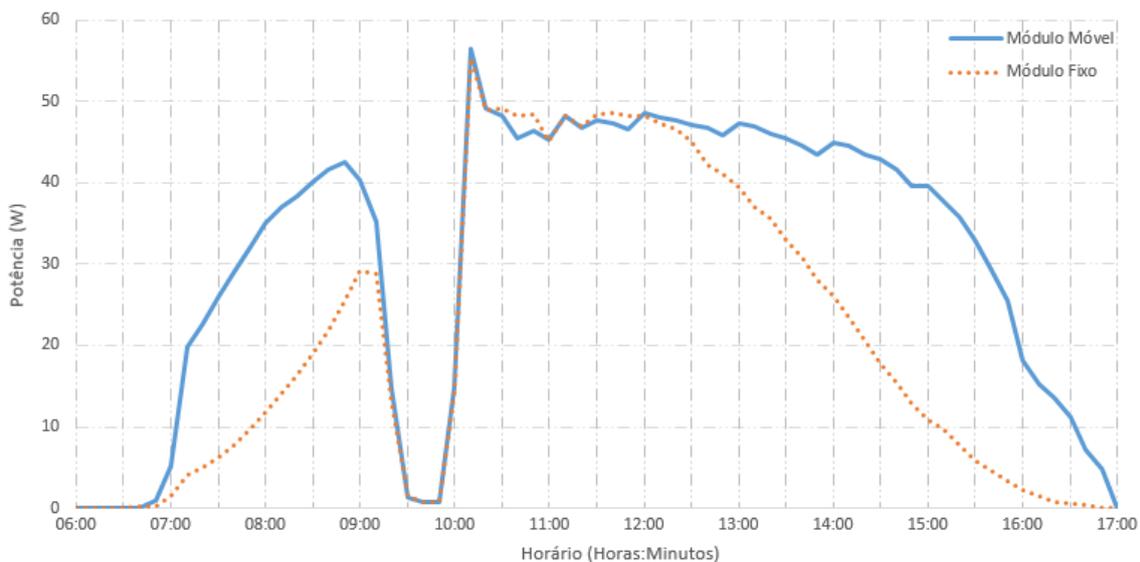


Fonte: (Autoria própria)

No dia 21 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 6,11 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 247,09 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 369,33 Wh, mostrando um ganho bruto, sem considerar o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento, na geração de energia elétrica de 122,23 Wh (49,47%).

Utilizando o sistema de seguimento com a atualização da posição sendo feita a cada 60 minutos realizou-se um experimento no dia 14 de junho. O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos FV fixo e móvel durante este dia é mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 14 de junho



Fonte: (Autoria própria)

No dia 14 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 5,88 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 233,77 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 348,02 Wh, mostrando um ganho bruto, sem considerar o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento, na geração de energia elétrica de 114,24 Wh (48,87%).

Pôde-se ver que quanto maior o intervalo entre as atualizações de posição, em condições de irradiação solar diária próximas, menores são os ganhos obtidos. Porém, mesmo com o sistema sendo movimentado apenas 6 vezes durante o dia, na estratégia com atualização a cada 60 minutos, o ganho obtido ainda foi considerável.

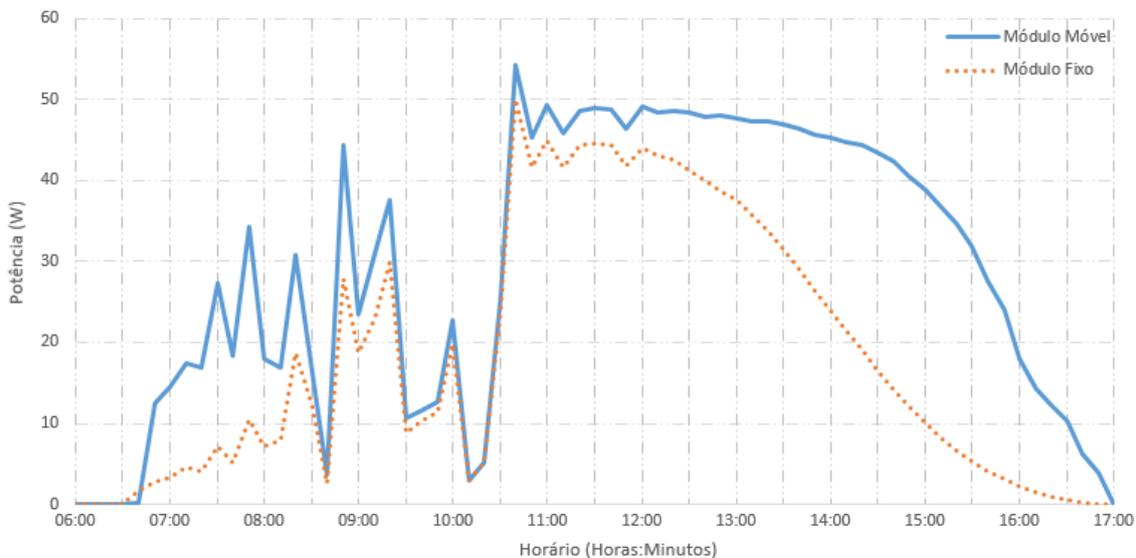
### 5.1.2 Seguimento baseado nos sensores LDR

Utilizando a estratégia descrita no tópico 4.5.2 do capítulo 4 do presente trabalho, realizou-se experimentos nos dias 9, 20 e 22 de junho de 2016.

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 20 de junho é mostrado na Figura 5.10.

No dia 20 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 5,61 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 202,34 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 321,81 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 119,47 Wh (59,05%).

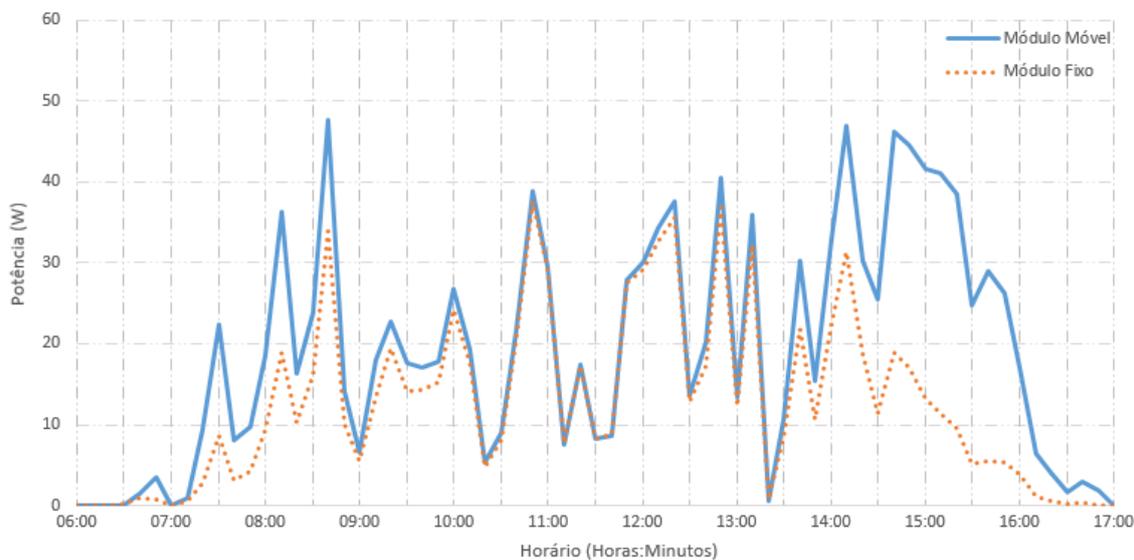
Figura 5.10 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 20 de junho



Fonte: (Autoria própria)

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 9 de junho é mostrado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 9 de junho

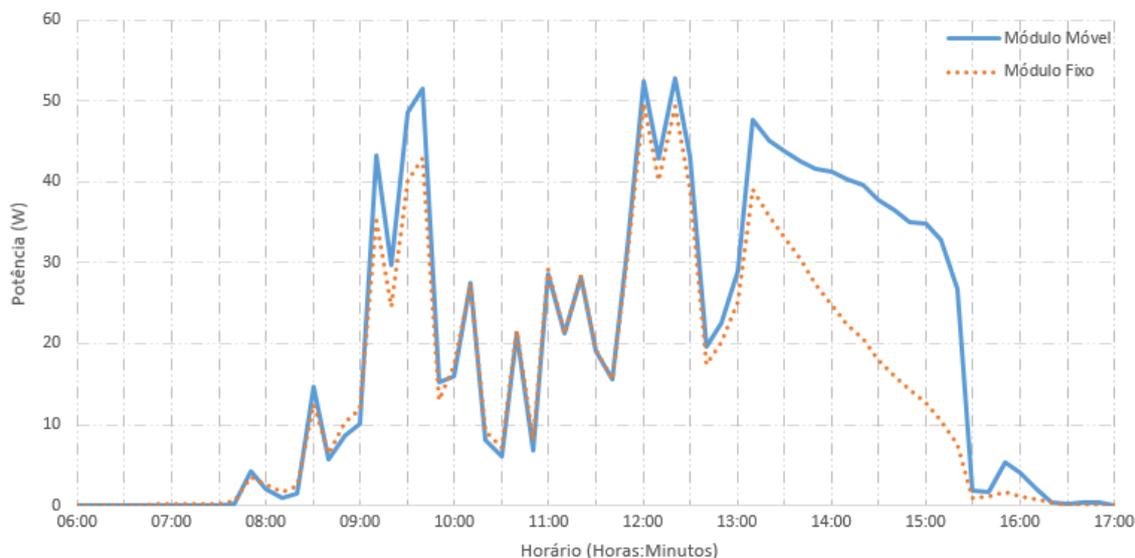


Fonte: (Autoria própria)

No dia 9 de junho, verificou-se uma irradiação diária de  $4,53 \text{ kWh/m}^2$ . A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de  $139,84 \text{ Wh}$  e pelo módulo com seguimento foi de  $212,40 \text{ Wh}$ , mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de  $72,56 \text{ Wh}$  (51,89%).

O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos durante o dia 22 de junho é mostrado na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 22 de junho



Fonte: (Autoria própria)

No dia 22 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 4,85 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 166,84 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 214,82 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 47,99 Wh (28,76%).

Pode-se ver que foram obtidos ganhos similares aos verificados com o uso da estratégia de seguimento com o algoritmo solar, como era esperado, tendo em vista que a diferença da precisão no seguimento entre as duas estratégias é pequena, sendo de 2° o ângulo de seguimento com os LDR's, e 0,25° com o algoritmo solar e a atualização da posição a cada 1 minuto.

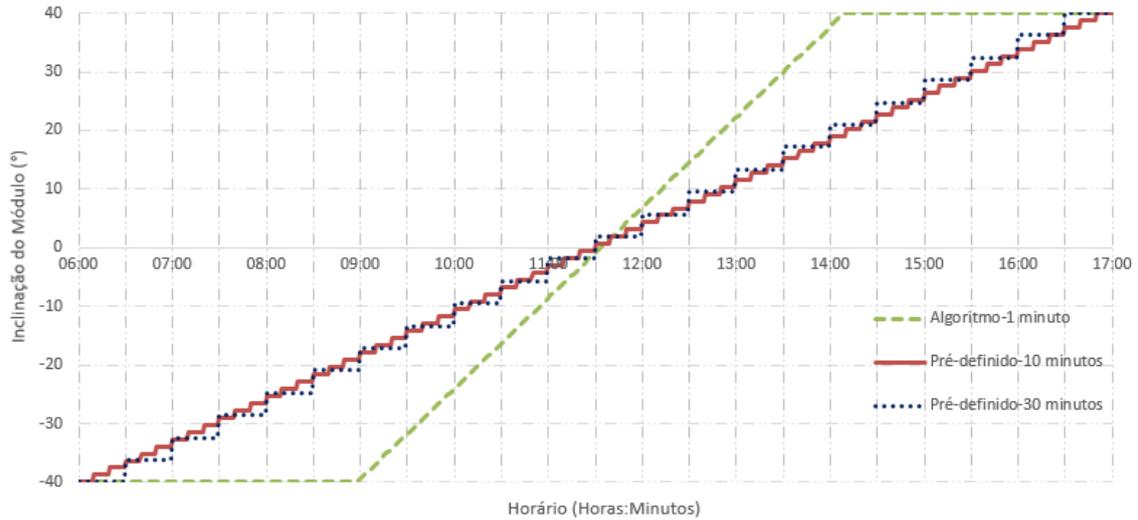
Verificou-se que nos períodos de céu nublado o módulo permaneceu parado, devido ao fato da predominância da radiação difusa na radiação global, o que faz com que os sensores recebam um mesmo valor de radiação independentemente da posição em relação ao Sol no momento.

### 5.1.3 Seguimento de forma pré-definida

Primeiramente, para analisar a posição angular do módulo FV móvel durante a realização dos experimentos com o seguimento de forma pré-definida e verificar o

desvio em relação a posição ideal, determinada pelo algoritmo de cálculo da posição do Sol, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 5.13.

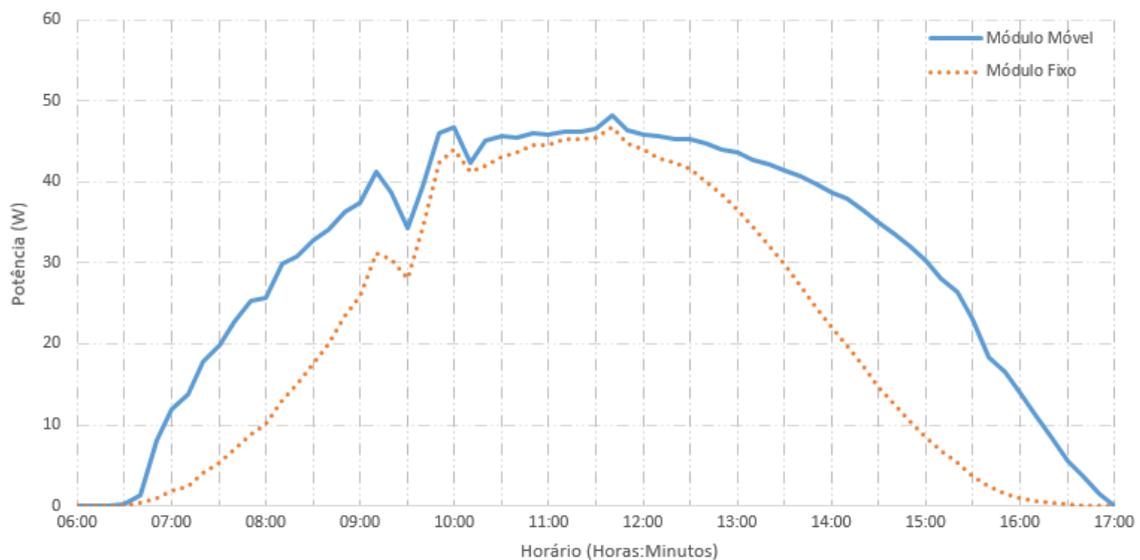
Figura 5.13 – Posição angular do módulo FV durante os experimentos com o seguimento pré-definido



Fonte: (Autoria própria)

Com a estratégia de seguimento pré-definido e a atualização da posição feita a cada 10 minutos, realizou-se um experimento no dia 1 de junho. O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos FV fixo e móvel durante o dia é mostrado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 1 de junho

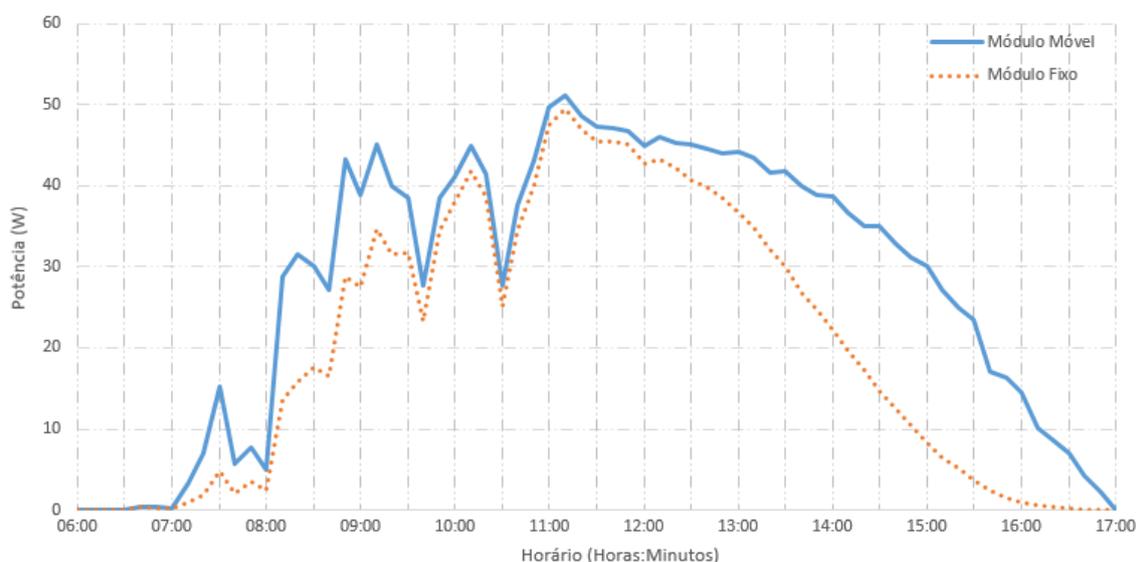


Fonte: (Autoria própria)

No dia 1 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 6,26 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 235,33 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 336,20 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 100,87 Wh (42,86%).

Com a estratégia de seguimento pré-definido e a atualização da posição feita a cada 30 minutos, realizou-se um experimento no dia 2 de junho. O gráfico com os valores das potências instantâneas geradas pelos módulos FV fixo e móvel durante o dia é mostrado na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Potência instantânea dos módulos durante experimento do dia 2 de junho



Fonte: (Autoria própria)

No dia 2 de junho, verificou-se uma irradiação diária de 5,98 kWh/m<sup>2</sup>. A energia elétrica gerada pelo módulo fixo foi de 224,50 Wh e pelo módulo com seguimento foi de 312,09 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 87,59 Wh (39,01%).

Primeiramente, pode-se constatar que mesmo utilizando uma estratégia de seguimento pré-definida, sem um conhecimento preciso da posição do Sol durante o dia e sem o uso de sensores de luminosidade, os ganhos energéticos obtidos com o sistema de seguimento foram consideráveis. Isso mostra que o seguimento do Sol não sendo feito de forma extremamente precisa, com desvio angular médio de 10,27° durante o dia para a estratégia com atualização da posição a cada 10 minutos e desvio médio de 9,68° com a atualização a cada 30 minutos, ainda promove ganhos importantes na geração de energia

bruta do módulo, apesar de apresentar uma diferença significativa em relação aos ganhos obtidos com o seguimento feito de forma mais precisa com o algoritmo solar.

Também pode-se observar que não houve uma grande diferença nos ganhos obtidos com as duas estratégias, mesmo usando a estratégia de atualização a cada 30 minutos em um dia com uma menor irradiação diária. Isso comprova que para pequenos valores de diferença na posição angular do módulo ao longo do dia, em média de  $0,6^\circ$  entre as duas estratégias, a geração de energia elétrica não apresenta quedas acentuadas.

## 5.2 Consumo de energia elétrica do sistema de seguimento

Para obter o ganho energético líquido que o sistema de seguimento solar pode proporcionar, deve-se determinar o consumo de energia elétrica do mesmo durante o dia e subtrair esse valor do ganho energético bruto. Isso também é importante para garantir a viabilidade do sistema de seguimento, garantindo que o consumo do mesmo seja inferior à energia elétrica adicional disponibilizada. Para isso, será feita uma análise do consumo de energia elétrica dos principais componentes do sistema.

Para verificar o consumo do motor de passo, deve-se determinar primeiramente o tempo de acionamento do mesmo. Como citado anteriormente, o número de pulsos ( $n_{pulsos}$ ), para cada atualização de posição do módulo, fornecidos ao motor de passo foram obtidos por meio de (4.1). O tempo de chaveamento das bobinas do motor ( $t_{ch}$ ), ou seja, o intervalo entre cada pulso fornecido ao mesmo, foi de 50 ms. Com isso, o tempo necessário para cada atualização de posição do módulo ( $t_{pos}$ ) pode ser obtido por meio de (5.1).

$$t_{pos} = t_{ch} * n_{pulsos} \quad (5.1)$$

E o tempo para se fazer todas as atualizações de posição durante o dia ( $t_{total}$ ) pode ser obtido, em função do número de atualizações de posição ( $n_{pos}$ ), por (5.2).

$$t_{total} = t_{pos} * n_{pos} \quad (5.2)$$

Então, sabendo que a tensão de alimentação do motor de passo é de 5 V, a corrente na ligação unipolar é de 4,7 A por fase, e o motor possui duas fases, obtém-se

uma potência total de 47 W para o motor de passo. Com isso, montou-se a Tabela 5.2 com os valores de consumo de energia elétrica do motor nas diferentes estratégias de seguimento utilizadas. Para a estratégia com os sensores LDR, em malha fechada, considerou-se que a movimentação de dawa de forma constante ao longo do dia, como em um dia de céu claro.

Tabela 5.2 – Consumo de energia elétrica do motor de passo nas estratégias de seguimento

<b>Estratégia</b>	$t_{pos}$ (s)	$n_{pos}$	$t_{total}$ (s)	$t_{total}$ (h)	<b>Energia elétrica (Wh/dia)</b>
<b>Posição calculada do Sol (1 minuto)</b>	0,2	320	70,4	0,01956	0,919
<b>Posição calculada do Sol (10 minutos)</b>	2,2	32	70,4	0,01956	0,919
<b>Posição calculada do Sol (60 minutos)</b>	13,2 → 15° 4,4 → 5°	5 de 15° 1 de 5°	70,4	0,01956	0,919
<b>Pré-definida (10 minutos)</b>	1,1	64	70,4	0,01956	0,919
<b>Pré-definida (30 minutos)</b>	3,3	21	70,4	0,01956	0,919
<b>Malha fechada</b>	1,76	40	70,4	0,01956	0,919

Fonte: (Autoria própria)

Para o microcontrolador, que possui uma tensão de alimentação de 5 V e uma corrente de alimentação de 25 mA (MICROCHIP, 2016), a potência do mesmo é de 0,125 W. Para o circuito *driver* do motor de passo, os dois CI 34152 são alimentados em 15 V e possuem uma corrente de 6 mA (ONSEMI, 2016), totalizando uma potência total para o circuito *driver* de 0,180 W. Este valor de corrente de 6 mA representa a corrente no modo *standby* do CI, quando o motor está desenergizado. Como o tempo em que o motor de passo permanece energizado é muito inferior em relação ao tempo total de funcionamento do sistema de seguimento, considerou-se este valor de corrente para o cálculo do consumo de energia elétrica do circuito *driver*.

Com isso, montou-se a Tabela 5.3 com os tempos necessários de funcionamento do microcontrolador e do circuito *driver* ( $t_{on}$ ) para as diferentes estratégias utilizadas. Para a estratégia com o algoritmo solar, o tempo de funcionamento do sistema de seguimento pôde ser reduzido devido ao fato do intervalo entre a primeira e última atualização de posição do módulo ser menor, como mostrado na Figura 5.3. Para

a estratégia com os sensores LDR pode se considerar o mesmo, pois observou-se nos experimentos que os horários da primeira e última atualizações de posição do módulo foram próximos aos da estratégia com o algoritmo.

Tabela 5.3 – Consumo de energia elétrica do microcontrolador e circuito *driver* nas estratégias de seguimento

<b>Estratégia</b>	<b><math>t_{on}</math> (h)</b>	<b>Energia elétrica (Wh/dia)</b>
<b>Posição calculada do Sol</b>	5,167	1,576
<b>Malha fechada</b>	5,167	1,576
<b>Pré-definida</b>	11	3,355

Fonte: (Autoria própria)

Para o circuito com os LDR's, considerando-se o caso de maior consumo, quando a resistência dos LDR's apresenta um menor valor, em um dia de céu claro, obteve-se uma resistência equivalente para o circuito de 193,36  $\Omega$ . Com isso, como a alimentação do circuito é de 5 V, e considerando que o circuito fica energizado durante 5,167 horas, o consumo de energia elétrica máximo do mesmo é de 0,669 Wh/dia.

O consumo de energia elétrica por parte do potenciômetro, com uma tensão de alimentação de 5 V e resistência de 10 k $\Omega$ , é de 0,0275 Wh/dia, considerando que o mesmo fica energizado durante 11 horas. Valor que pode ser desprezado no cálculo do consumo total do sistema de seguimento.

Com isso, chega-se aos valores do consumo total do sistema de seguimento em cada estratégia utilizada, mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Consumo de energia elétrica do sistema de seguimento em cada estratégia de seguimento

<b>Estratégia</b>	<b>Energia elétrica (Wh/dia)</b>
<b>Posição calculada do Sol (1 minuto)</b>	2,495
<b>Posição calculada do Sol (10 minutos)</b>	2,495
<b>Posição calculada do Sol (60 minutos)</b>	2,495
<b>Pré-definida (10 minutos)</b>	4,274
<b>Pré-definida (30 minutos)</b>	4,274
<b>Malha fechada</b>	3,164

Fonte: (Autoria própria)

### 5.3 Ganho energético líquido

Subtraindo dos valores de ganhos energéticos brutos os valores de consumo de energia elétrica da Tabela 5.4, obtém-se os valores dos ganhos energéticos líquidos na geração de energia elétrica para cada estratégia de seguimento utilizada. Esses valores, para cada um dos dias dos experimentos realizados, são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Ganho energético líquido para cada estratégia de seguimento

<b>Estratégia</b>	<b>Dia</b>	<b>Irradiação diária (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ganho bruto (Wh)</b>	<b>Ganho líquido (Wh)</b>
<b>Posição calculada do Sol (1 minuto)</b>	19/06	6,10	130,47 (53,74%)	127,98 (52,71%)
	18/06	5,40	111,11 (56,38%)	108,62 (55,11%)
	11/06	4,58	81,79 (62,32%)	79,30 (60,42%)
	10/06	4,63	41,04 (23,51%)	38,55 (22,08%)
<b>Posição calculada do Sol (10 minutos)</b>	21/06	6,11	122,23 (49,47%)	119,74 (48,46%)
<b>Posição calculada do Sol (60 minutos)</b>	14/06	5,88	114,24 (48,87%)	111,74 (47,80%)
<b>Malha fechada</b>	20/06	5,61	119,47 (59,05%)	116,31 (57,48%)
	9/06	4,53	72,56 (51,89%)	69,40 (49,63%)
	22/06	4,85	47,99 (28,76%)	44,83 (26,87%)
<b>Pré-definida (10 minutos)</b>	1/06	6,26	100,87 (42,86%)	96,60 (41,05%)
<b>Pré-definida (30 minutos)</b>	2/06	5,98	87,59 (39,01%)	83,32 (37,11%)

Fonte: (Autoria própria)

Pode-se ver que como o consumo do sistema de seguimento, independentemente da estratégia de seguimento, é pequeno, os valores de ganho líquido na geração de energia elétrica são próximos aos valores de ganho bruto.

## 6. CONCLUSÕES

Ao longo das diferentes etapas do desenvolvimento do presente trabalho, pôde-se alcançar os objetivos propostos inicialmente. Primeiramente, pôde-se adquirir um conhecimento maior sobre os assuntos importantes para se trabalhar com seguimento solar, como os aspectos da irradiação solar, dos movimentos da Terra, da determinação da posição do Sol, da geração fotovoltaica, dos tipos de seguidores existentes, das características dos mesmos, e das estratégias de seguimento do Sol.

Por meio da revisão bibliográfica de trabalhos sobre sistemas de seguimento solar desenvolvidos ao redor do mundo, pôde-se ver as diversas formas possíveis de se fazer o seguimento do Sol, com diferentes estratégias de controle e componentes envolvidos, e os variados ganhos energéticos que podem ser obtidos.

Com o conhecimento adquirido, desenvolveu-se um sistema de seguimento solar de um eixo para um módulo fotovoltaico na cidade de Fortaleza/CE, com componentes e ajustes visando se ter um baixo consumo de energia elétrica. Nos primeiros testes verificou-se a necessidade de ajustes, com o aumento do peso do conjunto móvel, que fizeram com que o sistema desenvolvido funcionasse adequadamente durante os experimentos realizados, conseguindo com precisão posicionar o módulo da forma desejada.

Como estratégias para se realizar o posicionamento do módulo FV ao longo do dia, utilizou-se as três principais estratégias utilizadas em outros trabalhos ao redor do mundo, com o controle da posição do módulo sendo feito de forma pré-definida, com algoritmos de cálculo da posição do Sol ou com sensores de luminosidade. As estratégias funcionaram de forma adequada, proporcionando ganhos consideráveis na geração de energia elétrica do módulo com seguimento em relação a um módulo fixo, mesmo em dias com condições climáticas desfavoráveis.

A estratégia que realizou o seguimento do Sol com maior precisão foi aquela com uso do algoritmo solar e a atualização da posição do módulo a cada 1 minuto. Com esta estratégia, obteve-se os maiores ganhos energéticos líquidos (subtraindo-se o consumo de energia elétrica), com valores entre 127,98 Wh (52,71%) e 38,55 Wh (22,08%), em diferentes condições climáticas. Na média ponderada, o ganho proporcionado foi de 48,87%.

A estratégia com o controle em malha fechada, com o uso de sensores de LDR, apresentou ganhos similares, com valores entre 116,31 Wh (57,48%) e 44,83 Wh

(26,87%), em diferentes condições climáticas. Na média ponderada, o ganho proporcionado foi de 47,15%.

A estratégia com o seguimento de forma pré-definida, sem um conhecimento prévio e sem uma detecção da posição do Sol em relação ao módulo, apresentou um ganho energético líquido um pouco inferior, 96,60 Wh (41,05%) em um dia de céu claro e com a atualização da posição a cada 10 minutos, mas que ainda pode ser considerado um valor significativo. Essa diferença se deve devido ao fato de nesta estratégia ter havido um desvio angular médio ao longo do dia de  $10,27^\circ$  entre a posição do módulo e os raios solares.

Com a estratégia de seguimento com o algoritmo solar, variando o intervalo de cada atualização de posição do módulo entre 1 minuto, 10 minutos e 60 minutos, em dias com condições climáticas similares, pôde-se verificar ganhos de 127,98 Wh (52,71%), 119,74 Wh (48,46%) e 111,74 Wh (47,80%), respectivamente. Com a atualização da posição sendo feita a cada 10 minutos houve um desvio angular médio de  $0,5^\circ$  do módulo em relação ao Sol durante o dia, enquanto que com a atualização a cada 60 minutos o desvio foi de  $3,7^\circ$ . Com isso, pôde-se ver que mantendo o desvio angular inferior a  $1^\circ$  a queda no ganho energético será reduzida. Porém, mesmo com o desvio de  $3,7^\circ$  os ganhos obtidos ainda foram consideráveis.

Um fator que contribuiu para os ganhos elevados que foram obtidos, foram os altos índices de irradiação solar diária observados na cidade de Fortaleza/CE, com valores entre  $4,53 \text{ kWh/m}^2$  e  $6,26 \text{ kWh/m}^2$  durante os dias de experimentos, já que em dias de céu claro os ganhos com o seguimento são maiores.

Também pôde-se verificar que os ganhos obtidos estão dentro dos valores de ganho encontrados em outros trabalhos, conforme mostrado no capítulo 3.

Pôde-se verificar também que o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento foi reduzido, independentemente da estratégia utilizada, com valor máximo de 4,274 Wh/dia para a estratégia com seguimento pré-definido e mínimo de 2,495 Wh/dia com a estratégia com o algoritmo solar.

Com a realização do presente trabalho foi possível comprovar que o uso do seguimento solar pode ser uma boa solução quando se deseja aumentar a quantidade de energia elétrica gerada por um sistema FV, já que ganhos energéticos consideráveis foram obtidos mesmo com estratégias de seguimento mais simples e com menor precisão e o consumo de energia elétrica do sistema de seguimento foi reduzido.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

a) analisar os ganhos energéticos fornecidos pelo sistema de seguimento e as estratégias de seguimento nos demais meses do ano, mudando a inclinação dos módulos para o valor ótimo de cada mês;

b) analisar os ganhos obtidos com a mudança da inclinação do módulo em relação à horizontal de forma mensal ao longo do ano, em relação a um módulo com inclinação fixa;

c) verificar os ganhos energéticos obtidos usando-se uma angulação de seguimento maior, superior a 80°;

d) utilizar, em conjunto com o seguidor solar, um sistema de MPPT (do inglês *Maximum Power Point Tracker*), de seguimento do ponto de potência máxima, para avaliar quais ganhos adicionais na geração de energia pelo módulo podem ser obtidos;

e) desenvolver um sistema de seguimento de dois eixos e avaliar se os ganhos adicionais disponibilizados pelo mesmo em relação a um sistema de um eixo compensam o maior investimento e maior complexidade.

## 6.2 Artigos publicados

Artigos apresentados em congresso:

a) ROCHA FILHO, J. I. do C; MENDONÇA, D. E; XAVIER, D. P; CARVALHO, P. C. M; DAHER, S. **Sistema de seguimento solar com seguimento do ponto de potência máxima para módulos fotovoltaicos.** *In:* VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte;

b) ROCHA FILHO, J. I. do C; DUPONT, I. M.; CARNEIRO, A. V; MELO, C. M. N; FREITAS, D. M; HOLANDA, I. S; KERBAGE, J. C; ALVES, O. M; CARVALHO, P. C. M. **Estimativa do ganho proporcionado com o uso de seguimento solar para Fortaleza/CE.** *In:* VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S. *The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics*. Energy Conversion and Management, 2004, v. 45, p. 1671-1679.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006. **NBR 10899: Conversão fotovoltaica de energia solar - Terminologia**. Rio de Janeiro.
- ABOUZEID, M. *Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller*. Renewable Energy, 2001, v. 23, p. 551-560.
- AL-MOHAMAD, Ali. *Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system*. Applied Energy, 2004, v. 79, n. 3, p. 345–354.
- ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2008.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília. 3ª Ed. 2008. 236p.
- APPLEYARD, D. *Solar Trackers: Facing the Sun*. 2009. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html>>. Acesso em: 4 mar. 2016.
- APPLIED MOTION. **4034 NEMA 34 Step Motor**. Disponível em: <<http://www.applied-motion.com/products/stepper-motors/4034-326>>. Acesso em: 9 mar. 2016.
- BABALOLA, O. A.; ALABI, A. B. 2012. *Low cost dual axis automated sunlight tracker design for optimized PV cell power yield*. Centrepoint journal, v. 18, p. 19-36.
- BAKOS, George C. *Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement*. Renewable Energy, 2006, v. 31, p. 2411-2421.
- BARBOSA, Danielle Alves. **Análise energética e financeira de um dispositivo de seguimento solar para a geração fotovoltaica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.
- BINGOL, Okan; ALTINTAS, Ahmet; ONER, Yusuf. *Microcontroller based solar-tracking system and its implementation*. Journal of Engineering Sciences, 2006, v. 12, n. 2, p. 243-248.
- BLANCO-MURIEL, Manuel *et al*. *Computing the solar vector*. Solar Energy, 2001, v. 70, n. 5, p. 431-441.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudo Prospectivo em Energia Fotovoltaica (Nota técnica)**. Brasília (DF), 2009.

EPIA. *Global market outlook 2013-2017 for photovoltaics*. European Photovoltaic Industry Association, 2013.

CHIN, C. S.; BABU, A.; MCBRIDE, W.; 2011. *Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink*. Renewable Energy, v. 36, p. 3075-3090.

COOKE, David. *Single vs. Dual Axis Solar Tracking*. Alternate Energy eMagazine, 2011.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.

ELECTROMATE. *Stepper Motors*. Disponível em:  
<<http://www.electromate.com/stepper-motors.html>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica – Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira**. 2012.

FARICELLI, C. F. **Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos**. 2008. Formas Alternativas de Geração de Energias Elétrica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

FOCUSOLAR. **Potencial solar brasileiro**. Disponível em:  
<<http://focusolar.com.br/potencial-solar-brasileiro/>>. Acesso em: 2 abr. 2016.

FRONTEIRATEC. **Resistor e potenciômetro**. Disponível em:  
<<http://fronteiratec.com/blog/resistor-e-potenciometro/>>. Acesso em: 2 mai. 2016.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Atlas Solarimétrico do Ceará 1963 – 2008**. Fortaleza. 2010. 94p.

GECKO. **Motor de Passo Modelo 4034-326-T**. Disponível em:  
<<http://www.geckobrasil.com.br/motor-de-passo/4034-346t.html>>. Acesso em: 7 mai. 2016.

GREENPEACE. **Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo**. Greenpeace Internacional. Conselho Europeu de Energia Renovável, 2010.

HECKTHEUER, L.A., 2001. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.

HUKSEFLUX. **LP02 Pyranometer**. Disponível em:

<<http://www.hukseflux.com/product/lp02-pyranometer>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

JUCÁ, Sandro C.S., PEREIRA, Renata I.S. **Ferramenta SanUSB**, Grupo SanUSB, 2015. Disponível em: <<http://tinyurl.com/SanUSB>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

KACIRA, M., SIMSEK, M., BABUR, Y., DEMIRKOL, S., 2004. **Determining Optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey**. Renewable Energy, vol. 29, pp.1265-1275.

KARIMOV, Kh. S. *et al.* **A simple photo-voltaic tracking system**. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, v. 87, p. 49-59.

KYOCERA. **KC85T**. Disponível em:

<<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5177.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2016.

MAPS OF WORLD. **Brazil Latitude and Longitude Map**. Disponível em:

<[http://www.mapsofworld.com/lat\\_long/brazil-lat-long.html](http://www.mapsofworld.com/lat_long/brazil-lat-long.html)>. Acesso em: 5 abr. 2016.

MASO P.D., 2007. **“Parque Fotovoltaico de Serpa”**. Disponível em:

<<http://www.catavento.pt>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

MECASOLAR, 2008. **“Começa a construção da maior Central Solar com seguimento de 2 eixos da Europa”**. Disponível em: <<http://www.mecasolar.com>>.

Acesso em: 22 abr. 2016.

MICROCHIP Technology. **PIC18F2550**. Disponível em:

<<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F2550>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 7 abr. de 2016.

MOCELIN, André Ricardo. **Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONTEIRO, Flávio Áureo Moura. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

MORAES, Euler Paiva de. **Seguidor polar de um único eixo inclinado**. 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2012.

MOREIRA, P. F.; MILLIKAN, B. **O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios**. 2. ed. Brasília: International Rivers Network - Brasil, 2012.

MOUSAZADEH, Hossein *et al.* ***A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output.*** Renewable and sustainable energy reviews, 2009, v. 13, p. 1800-1818.

NASCIMENTO, Bruno André Marques. **Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Politécnico de Viseu, Portugal.

NEGREIROS, Igor Soares. **Desenvolvimento do sistema de rastreamento de um protótipo de concentrador solar Fresnel linear.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

NIJEGORODOV, N.; DEVAN, K. R. S.; JAIN, P. K.; CARLSSON, S. ***Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude.*** Renewable Energy, v. 4, p. 529 - 543, 1994.

OLIVEIRA, Carlos Antônio Alves de. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

OLIVEIRA, Maurício Madeira. **Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ONSEMI – ON Semiconductor. **MC34152/MC33152/NCV33152 High Speed Dual MOSFET Drivers.** Disponível em: <[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MC34152-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34152-D.PDF)>. Acesso em: 9 abr. 2016.

PINTO, Aimé ; ZILLES, R. ; MACAGNAM, M. ; LEHMANN, J. **Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centrais fotovoltaicas conectadas à rede.** III Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2010, Belém.

POULEK, V; LIBRA, M. ***New solar tracker.*** Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998, v. 51, p. 113-120.

POULEK, V; LIBRA, M. ***A very simple solar tracker for space and terrestrial applications.*** Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, v. 60, p. 99-103.

POULEK, V; LIBRA, M. ***A new low-cost tracking ridge concentrator.*** Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, v. 61, p.199-202.

SHAYANI, R. A. **Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Utilizando Módulos de 32 Células.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, UNB.

SolarThermic Comércio e Serviços LTDA. **Qual o tempo de vida útil real dos painéis solares fotovoltaicos.** Disponível em:

<<http://www.solarthermic.com.br/Noticias/Exibir/qual-o-tempo-de-vida-util-real-dos-paineis-solares-fotovoltaicos>>. Acesso em: 7 abr. 2016.

TESSARO, Alcione Rodrigo. **Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar.** *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas-SP. Disponível

em:<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100046&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100046&script=sci_arttext)>. Acesso em: 28 mar. 2016.

TREVELIN, Felipe Camargo. **Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos.** 2014. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. (1991). **Meteorologia básica e aplicações.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WIKIPEDIA, 2008. **Photovoltaic power station.** Disponível em:

<[https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic\\_power\\_station#Solar\\_array\\_arrangements](https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_power_station#Solar_array_arrangements)>. Acesso em: 24 abr. 2016.