

## **ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO SOLAR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Lucas de Oliveira Moreira - [lucas.oliveira.moreira@gmail.com](mailto:lucas.oliveira.moreira@gmail.com)

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, Departamento de Engenharia  
Avenida Paris, 84, Bonsucesso  
CEP 21041-020 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Antônio José Dias da Silva - [antoniojoseds@gmail.com](mailto:antoniojoseds@gmail.com)

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, Departamento de Engenharia  
Avenida Paris, 84, Bonsucesso  
CEP 21041-020 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Nelson Damieri Gomes - [nelson.gomes@souunisuam.com.br](mailto:nelson.gomes@souunisuam.com.br)

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, Departamento de Engenharia  
Avenida Paris, 84, Bonsucesso  
CEP 21041-020 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Geraldo Motta Azevedo Junio - [geraldomotta@unisuam.edu.br](mailto:geraldomotta@unisuam.edu.br)

Centro Universitário Augusto Motta – UNISUAM, Departamento de Engenharia  
Avenida Paris, 84, Bonsucesso – CEP 21041-020  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Resumo:** Analisando o atual cenário energético observa-se uma crescente preocupação por fontes de energia alternativas, impondo, como consequência natural, a necessidade de inserção dessas tecnologias no cotidiano da população, como forma de buscar o equilíbrio entre o viver e o produzir, de forma a minimizar futuros desastres naturais. Dentre essas tecnologias, a energia solar fotovoltaica é uma das que mais crescem. Basicamente, esta tecnologia consiste na conversão da radiação solar em energia elétrica, por intermédio de células fotovoltaicas, montadas em painéis fotovoltaicos. Diante deste cenário, tendo como foco a preocupação com as gerações futuras, este trabalho objetiva realizar um estudo comparativo entre as técnicas de rastreamento solar e do sistema fixo, para maximizar a eficiência destes painéis, onde durante todo o dia, no método de rastreamento, o painel fotovoltaico estará alinhado com o ângulo de incidência solar.

**Palavras-chave:** Rastreamento solar, energia solar fotovoltaica, painéis fotovoltaicos.

**Abstract:** Analyzing the current energy scenario, there is a growing concern about alternative energy sources, imposing, as a natural consequence, the need to insert these technologies into the daily life of the population, as a way of seeking the balance between living and producing, in order to minimize future natural disasters. Among these technologies, photovoltaic solar energy is one of the fastest growing. Basically, this technology consists of the conversion of solar radiation into electrical energy, through photovoltaic cells, mounted on photovoltaic panels. In view of this scenario, focusing on future generations, this work aims to carry out a comparative study between solar tracking and fixed system techniques, to maximize the efficiency of these panels, where all day, in the tracking method, the photovoltaic panel will be aligned with the angle of solar incidence.

**Keywords:** *Solar tracking, photovoltaic solar energy, photovoltaic panels*

## 1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia é impensável se viver sem energia elétrica. No mundo, dia após dia, sempre estão surgindo novas tecnologias para melhorar nossa qualidade de vida e a grande maioria delas tem relação com o uso da energia elétrica.

A energia solar fotovoltaica converte a radiação solar diretamente em eletricidade por meio dos módulos fotovoltaicos (PV). O sistema fotovoltaico não emite gases como, entre outros, o de efeito estufa. É uma energia que não agride o meio ambiente (KALOGIROU, 2016).

Os recursos utilizados nos diversos tipos de tecnologias, não somente na energia solar fotovoltaica, têm um grande potencial energético, porém, grande parte destes recursos são intermitentes e como o Brasil é um país de grande extensão, eles apresentam mudanças de região para região.

Essas particularidades dão campo para alguns obstáculos econômicos e técnicos, mas que podem ser resolvidos. Com o progresso significativo da tecnologia é possível ter uma melhora na coleta dos diversos sistemas de energia renovável, e sendo assim, diminuindo os custos e aumentando a capacidade de geração de energia desses sistemas.

Embora tenham se desenvolvido aplicações baseadas em diferentes tipos de materiais, o silício cristalino é o que domina o mercado mundial no que concerne à fabricação e comercialização (VILLALVA, 2015).

É de extrema importância que os diversos setores que compõe nossa sociedade, tais como, indústria, população, governo, caminhem na mesma direção para combater essa degradação do nosso planeta. Sendo uma das soluções para o desenvolvimento sustentável as energias renováveis. Ainda é enorme a dependência mundial em combustíveis fósseis e o desafio da substituição para fontes de energia renovável é tão grande quanto (MOREIRA; MILLIKAN, 2012).

A energia solar fotovoltaica é uma das energias renováveis que mais cresce no mundo, porém ainda há muito o que avançar em sua tecnologia. Uma das questões que entram em discussão é a da eficiência dos painéis fotovoltaicos. Como otimizar a capacidade de captação de radiação solar do sistema fotovoltaico? Outra questão que entra em debate é a maneira que se pode reduzir o custo de implementação de rastreamento solar em sistema de painéis fotovoltaicos.

Este artigo tem por objetivo realizar um estudo comparativo da eficiência energética dos três sistemas propostos: sistema fixo, sistema de rastreamento solar de eixo único e sistema de rastreamento solar de eixo duplo, aplicados a um sistema fotovoltaico. Com isso será necessária a construção de um protótipo que abranja os dois tipos de rastreamento e o sistema fixo, para analisar e comparar, através de um software, a energia captada através de cada sistema de rastreamento e do sistema fixo, verificando as vantagens e desvantagens de cada sistema.

## 2 DESENVOLVIMENTO

As células fotovoltaicas, também conhecidas como células solares, são constituídas de materiais semicondutores, sendo o mais comum o silício, que geram uma corrente elétrica quando expostas à radiação solar. As células fotovoltaicas, por gerarem uma pequena potência individualmente, são interligadas e encapsuladas, onde formam os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis fotovoltaicos.

Os painéis fotovoltaicos são testados nas fábricas em ambientes controlados em uma condição de operação específica designada Standard Test Conditions (STC<sup>1</sup>). No decorrer do teste, o painel é submetido a uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> com um espectro próximo ao da luz do sol ao meio-dia solar. Com temperatura controlada de 25°C e uma atmosfera com constante de massa igual a 1,5. Estas condições dificilmente são captadas no dia a dia (KALOGIROU, 2016).

As principais tecnologias empregadas nas células fotovoltaicas estão divididas em três gerações. A primeira geração é dividida em dois subgrupos: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que correspondem a mais de 85% do mercado. Representam essa fatia do mercado pois são tecnologias já estabelecidas e seguras, e por possuírem uma eficiência mais alta comparada a outras tecnologias. A segunda geração, conhecida como filmes finos, é dividida em subgrupos: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração possui uma menor eficiência, por conta disso, tem uma participação no mercado relativamente baixa. A terceira geração é formada pelos nano-PV, que usam revestimentos poliméricos e flexíveis com nano-materiais eletricamente condutivos. Ainda é uma tecnologia em pesquisa e desenvolvimento, que nos próximos anos, tem-se a expectativa de que estejam disponíveis no mercado para competir com as outras tecnologias (PINHO; GALDINO, 2014).

O efeito fotovoltaico se dá quando os fótons de radiação solar atingem a superfície de uma célula fotovoltaica. Na região da junção *p-n*, do semicondutor, seu campo elétrico faz com que as cargas se separem, elétrons movem-se para o lado de tipo *n* e lacunas para o lado do tipo *p*, gerando uma corrente elétrica através da junção. Essa movimentação de cargas produz uma diferença de potencial que é denominada de efeito fotovoltaico. Se uma carga for conectada aos lados da célula fotovoltaica, uma corrente fluirá, enquanto a célula for exposta a radiação solar. (PINHO; GALDINO, 2014).

Diante do exposto acima, este artigo tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento do projeto e a construção de um protótipo de sistema para rastreamento de energia solar fotovoltaica, além de apresentar e discutir analiticamente a comparação entre os resultados dos experimentos.

## 2.1 Elaboração do Protótipo e Experimento

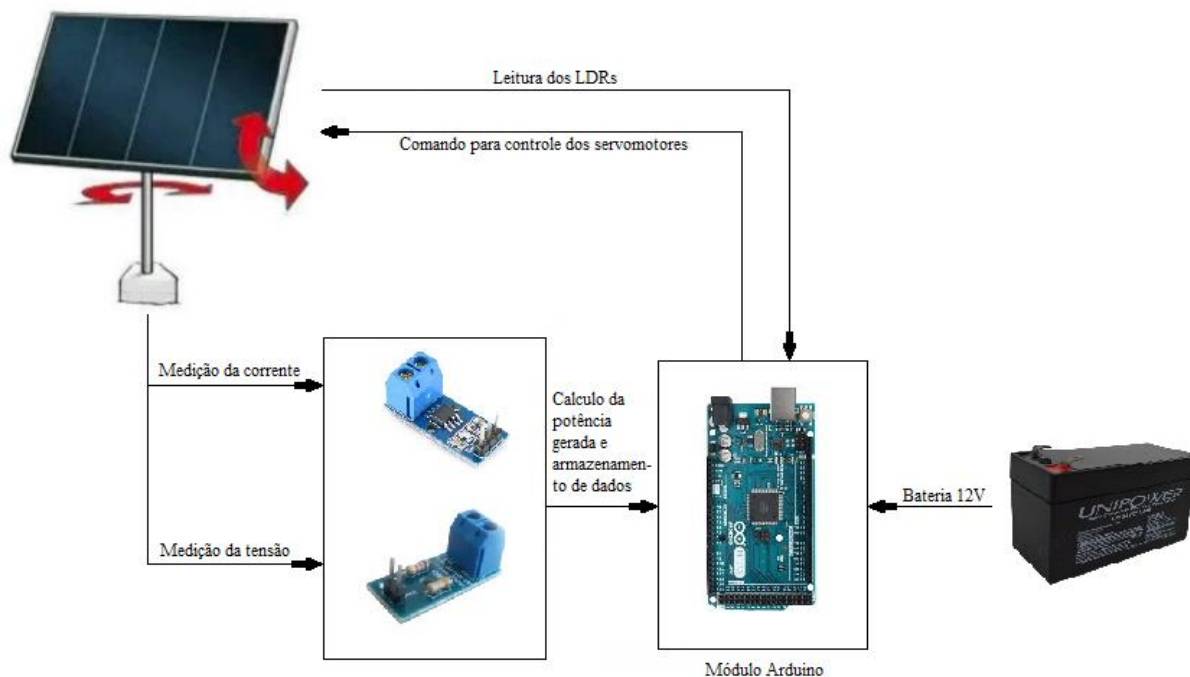
Para a implementação do sistema de rastreamento solar, foi necessária a construção de um protótipo que atendesse aos três sistemas propostos: rastreador de dois eixos, rastreador de eixo único e sistema fixo.

O protótipo pode ser dividido em duas partes, uma parte de medição da incidência solar sobre o painel fotovoltaico e consequente controle de posição utilizando os servomotores. A segunda parte é constituída da aquisição dos valores de corrente e tensão gerados pelo painel fotovoltaico e armazenados na memória do Arduino, conforme pode ser visto na figura 1.

<sup>1</sup> STC – Condições Padrão de Teste.



Figura 1 – Diagrama em blocos do protótipo.



Como pode ser observado na figura 1, na construção do protótipo, no que concerne ao processamento e armazenamento dos dados e controle dos servomotores, foi utilizada a placa Arduino Mega. O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento, que utiliza linguagem de programação própria, baseada em C/C++.

Foi escolhido o Arduino Mega, pois possui um espaço na memória Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM<sup>2</sup>) compatível com a quantidade de dados necessária no experimento para armazenar. Possui o microcontrolador ATMega 2560, que utiliza-se de uma EEPROM com 4kB disponíveis para armazenamento de dados, suficientes para armazenar um dia de funcionamento.

Para realizar as medições de corrente e tensão gerados pelo painel fotovoltaico, foram utilizados dois módulos compatíveis com o Arduino: módulo sensor de corrente DC, que é sensor Hall ACS712, e o módulo de medição de tensão DC, que consiste em um divisor de tensão. O sensor ACS712 produz um sinal analógico, Vout, que varia linearmente com a corrente. Foi necessário, para medir a tensão e a corrente simultaneamente, utilizar um resistor de fio em série na saída do painel fotovoltaico, atuando como uma carga, onde foi feita a medição da queda de tensão sobre este resistor.

Para escolher o valor do resistor, foi utilizado um potenciômetro de fio para melhor ajuste da resistência. Foi utilizado um multímetro como amperímetro e outro multímetro como voltímetro, para a leitura simultânea dos valores. Os ajustes foram realizados em um dia com temperatura média de 31°C.

<sup>2</sup> EEPROM – Memória de apenas leitura programável e eletricamente apagável.

O valor do resistor em que foi obtida a maior potência gerada pelo painel fotovoltaico foi o de  $110\ \Omega$ . Este valor de resistor foi implementado ao circuito para serem tomadas as medições pelos módulos sensores do Arduino.

No protótipo foi utilizado um painel fotovoltaico de silício policristalino, conforme a figura 2. As células fotovoltaicas de silício policristalino têm eficiências comerciais de 11% e 15%, pouco inferior às células de silício monocristalino, entretanto seu custo de fabricação é bem menor em relação às células monocristalinas.

Figura 2 – Protótipo de rastreamento solar.



Fonte: Autor.

A estrutura de sustentação do painel fotovoltaico e os demais componentes do protótipo foi construída com a utilização de canos de PVC reaproveitados de sobras de obra, conforme pode ser visto na figura 2. Foi escolhido o cano de PVC, devido à praticidade do manuseio deste material. Foram utilizados canos de medida 25 mm e 32 mm, e se mostraram sólidos e seguros para sustentar os componentes do sistema.

O painel fotovoltaico de 5 W não possui potência suficiente para alimentar os circuitos de controle e potência. Porém, como o objetivo do projeto é fazer uma comparação da eficiência dos sistemas propostos, foi utilizada uma bateria externa de 12 V / 7 Ah para alimentar todo o circuito durante os testes.

Os servomotores são dispositivos eletromecânicos utilizados para controlar o torque, velocidade e rotação. Apresentam movimentação conforme recebem um sinal de controle. Possuem alta precisão no controle, torques altos, vibrações e ruídos baixos.

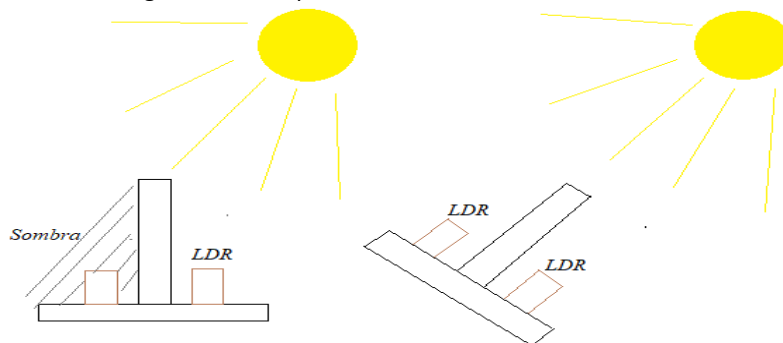
Para o tratamento da função de rastreamento solar, no protótipo foram utilizados 4 Light Dependent Resistors (LDRs<sup>3</sup>) de 5 mm cada. Os LDRs são dispositivos sensíveis à luz, ou seja, são componentes eletrônicos que podem operar sobre um circuito em função da luz que incide na face sensível dos mesmos. Da curva de operação do LDR obtém-se que quanto maior a iluminação sobre o mesmo, menor será a sua resistência interna.

No protótipo os LDRs recebem a iluminação presente no ambiente e enviam a informação dos seus respectivos valores de resistências para o Arduino, este por sua vez, calcula os parâmetros das resistências e envia comandos para os servomotores mudarem

<sup>3</sup> LDR – Resistor Dependente de Luz

de direção conforme necessidade de redirecionamento. A função do conjunto de LDRs é manter a célula fotovoltaica voltada para o sol, conforme observado na figura 4.

Figura 4 – Exemplo do funcionamento dos LDRs.



Fonte: Adaptado de Trevelin, 2017.

## 2.2 Realização do Experimento e Resultados Obtidos

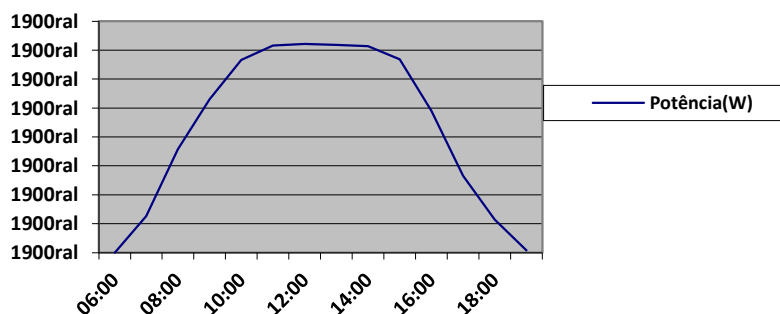
Com o protótipo finalizado e os testes de funcionamento realizados, foi possível efetuar os ensaios para comparação dos três sistemas. Buscou-se efetuar o experimento em campo com as condições semelhantes de temperatura e incidência solar.

Para isso o experimento foi realizado em um campo, com uma ampla área aberta, minimizando os efeitos da presença de prédios e construções que pudessem dificultar sua realização. Os experimentos dos três sistemas foram feitos em três dias com temperaturas variando de 30°C a 32°C, em dias sem nuvens e ensolarado, durante o horário de verão.

### 2.2.1 Sistema Fixo

O experimento do sistema sem rastreamento foi realizado conforme especificação. Foi fixado o painel fotovoltaico com um ângulo de inclinação de 22° face ao norte, posição de maior incidência solar no Rio de Janeiro. Foi realizada a medição durante 13 horas de um dia com temperatura de 30°C. Todo o experimento foi realizado durante o horário de verão e os resultados são apresentados no gráfico da figura 5.

Figura 5 – Potência gerada pelo sistema



Fonte: Autor

A energia total ao longo do dia é dada por:

$$E = P_{med} \times \Delta t$$

(Equação 1)

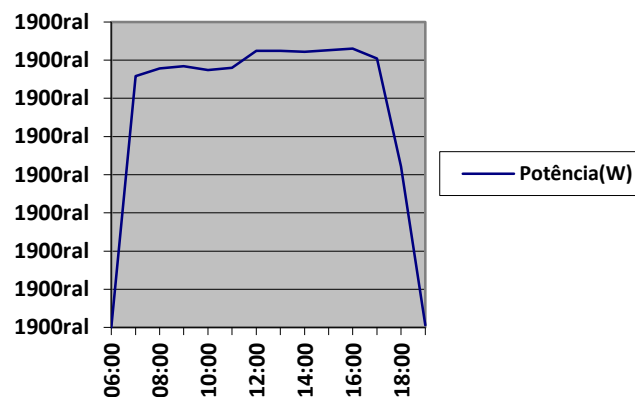
$$E = 2,18W \times 13h = 28,34 W.$$



### 2.2.2 Sistema de Eixo Único

Foi repetido o mesmo teste em outro dia com condições climáticas semelhantes, durante 13 horas e com uma temperatura de 32°C. Nesse procedimento, foi ligado o motor responsável pela inclinação do painel fotovoltaico, permanecendo o motor responsável pelo ângulo azimute desligado. A seguir, o gráfico na figura 6 mostra a potência gerada a cada hora durante a realização do experimento.

Figura 6 – Potência gerada pelo sistema



Fonte: Autor

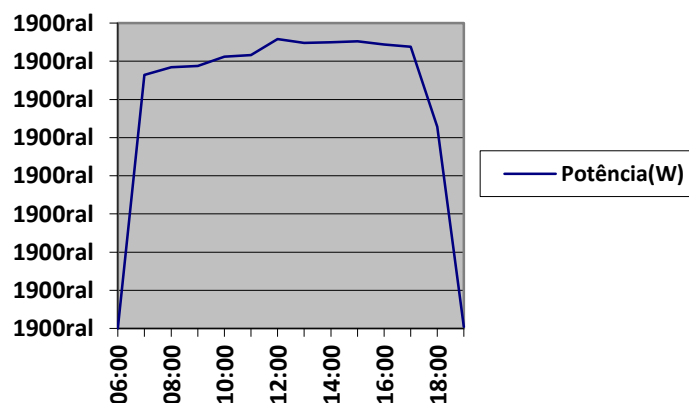
A energia total ao longo do dia é dada segundo a equação 1 e equivale a:

$$E = 2,91 \text{ W} \times 13\text{h} = 37,83 \text{ Wh}$$

### 2.2.3 Sistema de Eixo Duplo

O teste foi repetido uma última vez, novamente com condições climáticas semelhantes, durante 13 horas e com uma temperatura de 31°C. Nesse teste, foram ligados os dois motores. Pode ser visto na figura 7 o gráfico da potência gerada a cada hora durante todo o dia.

Figura 7 – Potência gerada pelo sistema.



Fonte: Autor

A energia total ao longo do dia é dada pela equação 1 e equivale a:

$$E = 3,04 \text{ W} \times 13\text{h} = 39,52 \text{ Wh}$$

A tabela 1 apresenta o resumo dos dados coletados com sistema de eixo duplo de rastreamento.

Tabela 1 – Tabela resumo da potência gerada pelo painel fotovoltaico com rastreamento de eixo

Horário	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
07:00	19,52	0,17	3,32
08:00	20,10	0,17	3,42
09:00	20,22	0,17	3,44
10:00	19,78	0,18	3,56
11:00	19,90	0,18	3,58
12:00	19,94	0,19	3,79
13:00	19,71	0,19	3,74
14:00	19,76	0,19	3,75
15:00	19,78	0,19	3,76
16:00	19,56	0,19	3,72
17:00	19,41	0,19	3,69
18:00	16,50	0,16	2,64
19:00	0,40	0,05	0,02

Fonte: Autor.

## 2.2.4 Análise e Comparação dos Resultados Obtidos

A performance de cada sistema foi medida e os gráficos foram sobrepostos, conforme gráfico da figura 8. Fica comprovado que o sistema por dois eixos, entrega potência máxima por mais tempo, comparado aos outros dois sistemas. A potência média do sistema de dois eixos, um eixo e sistema fixo é, respectivamente, 3,04 W, 2,91 W e 2,18 W. Utiliza-se o seguinte calculo para comparar a potência gerada por cada sistema:

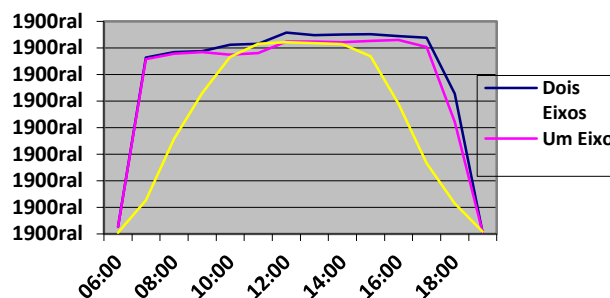
$$\frac{\text{Potência 1} - \text{Potência 2}}{\text{Potência 2}} \times 100 \%$$

(Equação 2)

Comparando-se o sistema fixo com o sistema por dois eixos, pode-se obter uma melhora 39,4% na potência gerada. O sistema por um eixo se comparado com o sistema fixo, tem-se uma melhora de 33,5% na potência. E por fim, comparando o dois sistemas com rastreamento pode ser obtida uma melhora de 4,5% do sistema de rastreamento por dois eixos em relação ao sistema por um eixo.



Figura 8 – Gráfico comparativo da potência gerada pelo painel fotovoltaico.



Fonte: o Autor

### 2.3 Comparação dos Resultados Obtidos com Resultados de Trabalhos Anteriores

De acordo com os resultados obtidos durante o presente estudo podem ser feitas comparações com outros trabalhos acadêmicos, para que se tenha um panorama de diferentes anos e diferentes regiões.

Trevelin (2014) com seu estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar fotovoltaico, comparou a potência gerada por cada sistema, obtendo os seguintes resultados: comparando-se o sistema fixo, sem rastreamento, com o sistema de rastreamento por eixo único, este segundo alcançou uma melhora de 25% em relação ao primeiro. O sistema de rastreamento por eixo duplo obteve um aumento de 39,2% em relação ao sistema fixo. E por fim, comparando os dois sistemas de rastreamento, o sistema por eixo duplo apresentou um ganho de 18,8% em relação ao sistema por eixo único.

Pode ser visto que o resultado do ganho do sistema por eixo duplo em relação ao sistema fixo, de 39,2%, se aproxima do resultado do presente trabalho, em que este foi de 39,4%.

Outro trabalho que realiza a comparação é o de Axaoupoulos e Fylladitakis (2013), onde realizam o estudo durante um ano em diferentes países, como Grécia, Alemanha e Escócia. Foram realizados estudos comparando o sistema de rastreamento por eixo duplo e o sistema fixo e foram alcançados em média ganhos da ordem de 34,8% na Grécia, 28,7% na Alemanha e 30,4% na Escócia.

Pode ser notado em média valores de ganho acima de 30% na maioria dos experimentos, comparando o sistema fixo com o sistema de rastreamento por eixo duplo. Essa otimização vista na prática é fundamental para o entendimento daquilo que foi proposto, sendo do ponto de vista energético uma vantagem a aplicação do rastreamento solar em sistemas fotovoltaicos.

## 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Torna-se cada vez mais evidente a preocupação com o meio ambiente e os combustíveis que o agredem. Nesse cenário incerto, a energia solar fotovoltaica se enquadra perfeitamente para a redução de emissão de poluentes. Diante disso, este trabalho procurou esclarecer algumas questões importantes no que tange à energia solar fotovoltaica. Foi verificado que há uma grande melhora na eficiência do painel fotovoltaico sendo utilizado com o recurso do rastreamento solar, fazendo com que tenha um melhor custo benefício. De acordo com a análise dos resultados, foi possível

perceber que o melhor custo benefício, comparando os três modelos é o rastreamento por eixo único. Pois o mesmo é mais simples que o de eixo duplo, e comparando a eficiência dos dois modelos, a diferença é bem pequena, 4,5%, sendo ainda, o de eixo duplo significativamente mais complexo mecanicamente.

Observou-se ainda na prática o efeito da temperatura sobre o painel fotovoltaico nos diferentes dias. No sistema fixo foi verificada uma perda de 27,8% na potência máxima medida comparada à potência máxima do painel. No sistema por um eixo foi observada uma perda de 27% e no sistema por dois eixos 24,2% de perda em relação à potência máxima que pode ser fornecida pelo painel fotovoltaico.

Deste modo os objetivos deste trabalho foram alcançados. No que diz respeito a montagem do protótipo, a mesma foi realizada e foram efetuados todas as comparações apropriadas. Foi possível colocar em cenário factual o aprendizado obtido no decorrer do curso de engenharia elétrica, empregando conceitos de dimensionamento de projetos, linguagem de programação, elaboração de circuitos eletrônicos, além da inserção na área de energias renováveis, como a energia fotovoltaica, que serão o futuro da energia.

#### 4 Referências Bibliográficas

AXAOUPOULOS, Petros J.; FYLLADITAKIS Emmanouil D. **Energy and Economic Comparative Study of a Tracking vs. A Fixed Photovoltaic System**. Department of Energy Technology, Technological Education Institute (TEI) of Athens, Greece, 2013. 20p. Disponível em:

<<https://eujournal.org/index.php/esj/article/download/994/1024>>. Acesso em dez. 2017.

KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas**. 2.ed. Tradução de Luciana Arissawa. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. p. 1-120, 481-539.

MOREIRA, Paula Franco; MILLIKAN, Brent. **O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios**. 2.ed. Brasília:

International Rivers Network - Brasil, 2012. 100p. Disponível em:

<[https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/setor\\_eletrico\\_desafios-oportunidades\\_2\\_edicao\\_nov2012.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/setor_eletrico_desafios-oportunidades_2_edicao_nov2012.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. 529p. Disponível em:

<<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

TOWERPRO. **MG995**. Disponível em:

<<http://www.towerpro.com.tw/product/mg995>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

TREVELIN, Felipe Camargo. **Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 65p.

Disponível em: <[http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-02092014-093245/publico/Trevelin\\_Felipe\\_Camargo.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-02092014-093245/publico/Trevelin_Felipe_Camargo.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2017.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2015. 224p.