



DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE RASTREAMENTO SOLAR DE DOIS EIXOS PARA A OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN AUTONOMOUS TWO-AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM FOR THE OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION

Vinicius Franco Santa Barbara Silva¹
Flávio Couvo Teixeira Maia

¹ Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana - BA. vinifsb@gmail.com

RESUMO

Mudanças no cenário energético do Brasil têm feito com que a implantação de sistemas alternativos de geração de energia elétrica sejam cada vez mais atraentes para a população. Um desses sistemas é a energia solar fotovoltaica, energia limpa e renovável que converte a energia solar em energia elétrica. Buscando aprimorar a capacidade de energia dos módulos solares, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a análise de desempenho de um seguidor solar autônomo de rastreamento baseado na posição solar na cidade de Feira de Santana – BA. Para funcionamento, o sistema converte os dados obtidos pelos sensores instalados em conjunto com um script executado pelo sistema Arduino, tendo como objetivo o posicionamento do módulo fotovoltaico buscando sempre o ponto máximo de geração de energia durante todo o período de exposição solar. Após os testes foi possível verificar que os resultados da captação de radiação solar e geração de energia elétrica do sistema biaxial foram superiores em relação ao sistema fixo, podendo alcançar resultados mais positivos se desenvolvido e programado em larga escala.

Palavras-chave –Módulo Fotovoltaico, Seguidor Solar, Arduino.

ABSTRACT

Changes in the energy scenario in Brazil have made the implementation of alternative systems for generating electricity increasingly attractive to the population. One of these systems is photovoltaic solar energy, clean and renewable energy that converts solar energy into electrical energy. Seeking to improve the energy capacity of solar modules, this work aims to develop and analyze the performance of an

autonomous solar tracker based on solar position in the city of Feira de Santana - BA. For operation, the system converts the data obtained by the installed sensors together with a script executed by the Arduino system, with the objective of positioning the photovoltaic module, always seeking the maximum point of energy generation during the entire period of solar exposure. After the tests it was possible to verify that the results of the capture of solar radiation and the generation of electric energy of the biaxial system were superior in relation to the fixed system, being able to reach more positive results if developed and programmed in large scale.

Keywords– Photovoltaic Module, Solar Tracker, Arduino

INTRODUÇÃO

Segundo Fadigas (2000), a existência da energia elétrica é primordial ao funcionamento do planeta. No mundo globalizado, a necessidade da energia é fundamental, seja nas indústrias, produção de alimentos, desenvolvimento de pesquisas, entre outras atividades.

A principal fonte de geração de energia elétrica brasileira é a hídrica, responsável por 63,1% da geração de energia. Porém, o país vem passando pela pior crise hidrológica desde 1930 e nos últimos sete anos os reservatórios das hidrelétricas têm recebido um volume de água inferior comparados à média histórica (ONS, 2021). Devido a isso, fontes alternativas e renováveis de energia devem se tornar cada vez mais presentes, como energia eólica, através dos ventos, e solar, através dos raios solares.

Tais fontes de captação e geração de energia ainda necessitam de altos investimentos para implantação, os custos de um sistema de captação de energia fotovoltaica são discutidos antes mesmo da sua eficiência e dos seus benefícios, tanto econômicos quanto ambientais. Porém, uma vez que sejam mais acessíveis e que novas tecnologias sejam implementadas em sistemas já existentes, os custos em longo prazo se tornam menores, trazendo maiores benefícios, não só na eficiência energética, como na relevância do tema no âmbito nacional de geração de energia (WWF-Brasil, 2016).

O território brasileiro possui alta capacidade de geração de energia solar fotovoltaica, de acordo com Pereira *et al.* (2017), o país recebe diariamente em

média de 4.444 Wh/m² a 5.483 Wh/m² de incidência solar, além de ser altamente rico em silício, o que torna o país muito propício à produção de células solares.

Pelo fato de o planeta Terra orbitar o Sol, isso faz com que o ângulo de incidência solar mude conforme a órbita da Terra em relação ao Sol, assim, complementar as placas fotovoltaicas já existentes com sistemas de direcionamento das mesmas auxiliadas pelo rastreamento solar aumentará consideravelmente a eficiência na geração de energia elétrica, uma vez que se encontrarão predispostas por mais tempo na direção dos raios solares (WWF–Brasil, 2016).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a análise de um sistema de rastreo bidirecional para placas fotovoltaicas. A aplicação de um sistema desse tipo visa a melhoria no rendimento na geração de energia fotovoltaica através do posicionamento ideal dos módulos, movimento executado através de um modelo matemático baseado na posição solar, sem o uso de sensores de irradiação solar para o seu posicionamento.

Fundamentação Teórica

Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

Somente no período de 2021 até o mês de julho de 2022, a potência instalada da fonte solar fotovoltaica no Brasil teve um crescimento de 23,9% de acordo com a ABSOLAR (2022), conforme Tabela 1, que mostra os dados desde o ano de 2012.

Tabela 1– Potência Instalada da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.

Ano	Potência (MW)
2012	7
2013	13
2014	21
2015	42
2016	92
2017	1.158
2018	2.416
2019	4.609
2020	8.008

2021	14.099
JULHO/2022	17.468

Fonte: ABSOLAR (Adaptado) (2022).

Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico (Figura 1) é a transformação da energia solar em eletricidade através de materiais semicondutores, gerando uma diferença de potencial, ou tensão elétrica sobre uma célula de materiais semicondutores, onde, se a célula for conectada a dois eletrodos haverá determinada tensão elétrica sobre eles, e se houver um percurso entre os dois eletrodos, haverá corrente elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

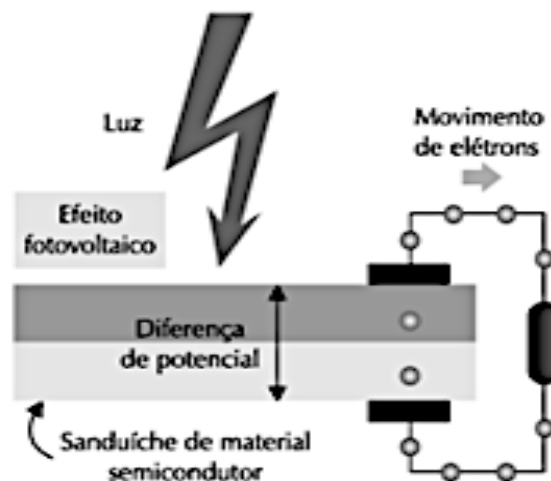


Figura 1 - Efeito Fotovoltaico. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

As células fotovoltaicas geralmente usam uma combinação de silício (Si), boro (B) e fósforo (P), que formam um campo elétrico quando a luz do Sol incide sobre as células, formando assim a corrente elétrica, chamado fisicamente de efeito fotovoltaico (Figura 2).

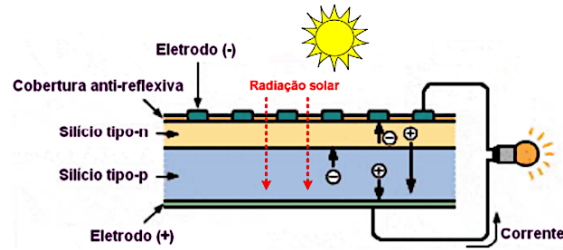


Figura 2 - Estrutura de uma Célula Solar em Corte. Fonte: Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos (2008).

Radiação solar

No seu percurso até entrar em contato com a superfície terrestre, ao passar pela atmosfera a radiação solar sofre interferência de fatores naturais que fazem sua direção mudar, a radiação direta é aquela que incide diretamente no plano horizontal, tendo a inclinação variando de acordo com o ângulo zenital, a radiação difusa corresponde aos raios solares que incidem indiretamente, resultante da difração na atmosfera, e a radiação global é aquela que chega em todas as direções, ou seja, o somatório das radiações direta e difusa (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Segundo MATOS (2019), na superfície da Terra, é perceptível a irradiância direta e a irradiância difusa, assim, é importante, para que sejam definidas informações sobre geração de energia e potência, saber a intensidade de energia transmitida através da radiação solar.

Ângulo azimutal

O ângulo da direção dos raios solares em relação a determinado ponto na Terra e tomando como referência o norte geográfico, é chamado Azimutal. Durante todos os dias, o Sol incide em diferentes ângulos azimutais, desde a nascente até o poente (Figura 3 e Figura 4), (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

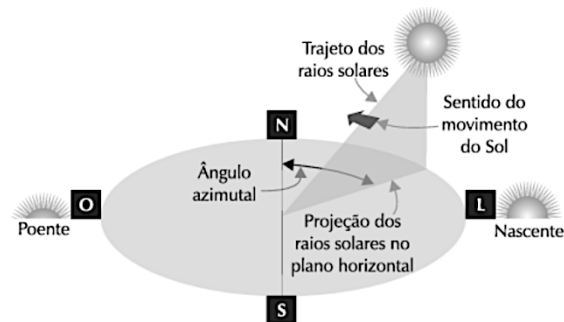


Figura 3 - Azimute em Relação ao Norte Geográfico. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

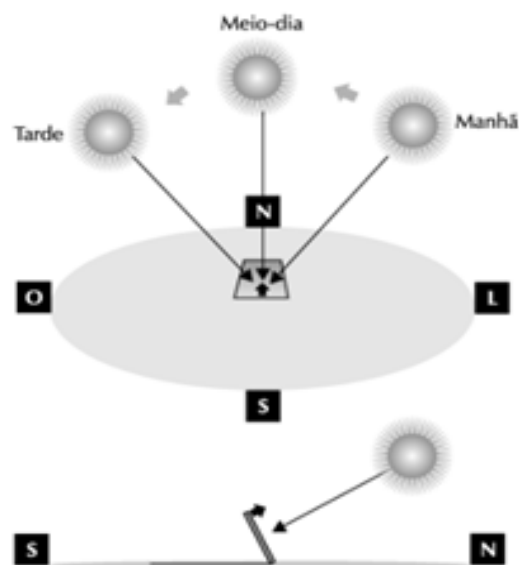


Figura 4 - Correta Orientação Azimutal. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

Declinação Solar

De acordo com VILLALVA e GAZOLI (2012), o ângulo dos raios solares em relação ao plano do equador é chamado declinação solar.

Os ângulos ideais para inclinação de um módulo fotovoltaico dependem da latitude do local onde o sistema é instalado (CUNHA, 2013).

Altura Solar

Através da declinação solar, o Sol acaba se pondo e nascendo em diferentes pontos, descrevendo inclinações diferentes em cada dia do ano, e o que define a

posição do Sol é o conjunto composto pelos ângulos azimutais e zenitais, e a altura solar, VILLALVA e GAZOLI (2012). A Figura 5 descreve a trajetória do movimento aparente do Sol.

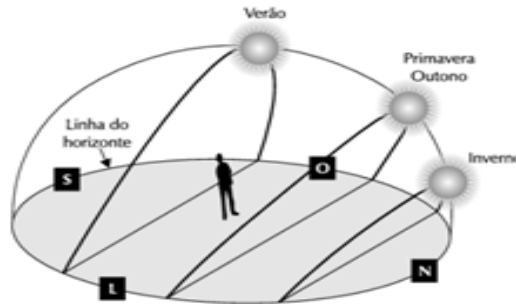


Figura 5 - Trajetória do Movimento Aparente do Sol. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

Ângulo de Incidência dos Raios Solares

Segundo VILLALVA e GAZOLI (2012), quando os raios solares incidem em relação ao módulo solar perpendicularmente, ou seja, a linha perpendicular do módulo fotovoltaico e a linha incidente do raio solar (CUNHA, 2013), assim é considerado o melhor ângulo de aproveitamento da energia solar, por consequência, a inclinação do módulo deve ser configurada para se adequar a altura solar de cada dia específico, conforme Figura 6.

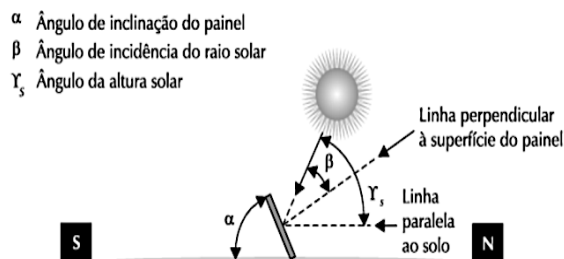


Figura 6 - Ângulos de Inclinação e Incidência dos Raios Solares. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

Rastreamento dos Raios Solares

A correta orientação do painel fotovoltaico deve ser analisada a partir do movimento diário do sol, nascendo no Leste e se pondo no Oeste. Os painéis sendo orientados para a direção Leste tem, no período da manhã, a maior incidência da

radiação, já sendo orientados para a direção Oeste, a maior incidência de radiação é no período da tarde. Assim, para que seja maximizada a captação em locais abaixo da linha do equador, os módulos fotovoltaicos são orientados para a direção Norte, e considerando também a latitude do local de instalação, correspondendo respectivamente a angulação do módulo, ROCHA e ASSUNÇÃO (2020).

Os módulos solares com rastreamento acabam tendo benefícios na angulação de incidência dos raios solares, sendo ajustados ao longo dos dias e anos. Nos rastreadores que possuem dois graus de liberdade com movimentação simultânea, o eixo horizontal permite o ajuste do ângulo e da inclinação do módulo com a altura solar, enquanto o eixo vertical permite o rastreamento do movimento feito pelo Sol ao longo do dia, aumentando consideravelmente a captação de energia dos módulos, segundo VILLALVA e GAZOLI (2012). Na Figura 7 é ilustrado um módulo solar com dois graus de liberdade.

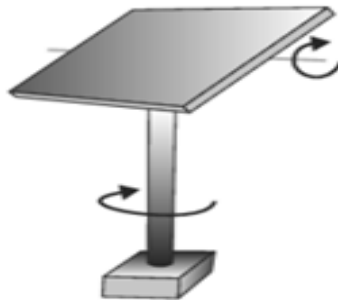


Figura 7 - Módulo Solar com dois Graus de Liberdade. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012).

Rastreamento do Ponto Máximo de Potência (MPPT)

Segundo CONFESSOR (2014), para que o aproveitamento máximo da capacidade de geração de energia seja alcançado por um módulo solar fotovoltaico, este deve ter seu rendimento se baseando no ponto de máxima potência (MPPT). O MPPT varia durante todo o dia devido às condições em que o módulo é exposto, como irradiação solar e temperatura ambiente. Entre as técnicas de rastreamento baseadas no MPPT existem a de tensão constante, que observa a tensão e corrente do módulo, e a de perturbação e observação, onde se modifica a posição do módulo

observando sua potência de saída até que esta seja elevada, caso contrário a posição é modificada para outra orientação.

Arduino

De acordo com FERRONI, EDUARDO H. *et al. apud* MCROBERTS (2018), Arduino é considerado um sistema embarcado que funciona através de software e hardware com um objetivo pré-definido projetado através de um código fonte. Ou seja, é como um CLP (Computador Lógico Programável), facilitando a automação de sistemas. As operações que o Arduino realiza são compostas por sinais elétricos. Ao ser executada a lógica de programação, o sistema envia comandos de sinais pela plataforma, escritos por um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), permitindo escrever, alterar e converter códigos para que o Arduino (Figura 8) possa processar e executar a lógica de programação, conhecida como scripts.



Figura 8 - Arduino MEGA. Fonte: USINAINFO (2022).

Motor de Passo

Segundo CHAPMAN (2013), motor de passo (Figura 9) um tipo de motor simultâneo projetado para girar em uma quantidade específica de graus a cada pulso elétrico que recebe em seu componente de controle. Operacionalmente, um motor de passo se baseia na atração e repulsão magnética, como um motor com controle digital, convertendo pulsos digitais em rotação, com deslocamento angular

de acordo com os passos do motor, o ângulo de passo, proporcional a quantidade de pulsos, e a frequência dos pulsos está relacionada com a velocidade que o motor pode gerar. Pulsos são sinais elétricos enviados do controlador ao conversor que alimenta o motor, sequencialmente chaveados por uma fonte de alimentação.



Figura 9 - Motor de Passo NEMA 23. Fonte: USINAINFO (2022).

Sensor de Irradiância (Piranômetro)

Utilizado para medição do nível de radiação incidente sobre uma superfície plana e horizontal, a partir dos comprimentos de ondas gerados pelas densidades do fluxo da radiação global, direta ou difusa, que variam do ultravioleta ao infravermelho, fazendo com que os sinais gerados pelo piranômetro, do tipo analógico são transformados em unidade de radiação, de acordo com VITORINO *et al.*(2009).

O sensor BPW34 (Figura 10), um fotodiodo, é utilizado para detectar a irradiância incidente sob o módulo fotovoltaico, para conversão dos dados, segundo MICHALSKY *et al.* (1995), é utilizada a Equação 1):

$$E(\%) = \left(\frac{V(\theta)}{V_n} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

- E(%): Erro Percentual do Sensor
- θ : Ângulo de Incidência
- V(θ): Tensão de Saída do Sensor para o Ângulo de Incidência

- V_n : Tensão de Saída de Referência ($\theta=0^\circ$)



Figura 10 - Sensor BPW34. Fonte: USINAINFO (2022).

Influência da Temperatura

As intensidades de radiação e temperatura ambiente são fatores que refletem no comportamento de módulos fotovoltaicos durante a geração de energia, podendo causar danos na instalação e nos equipamentos, reduzindo também a eficiência da geração de energia, SILVA (2016).

O sensor de temperatura e umidade modelo DHT11 (Figura 11) tem capacidade de fazer medições de temperaturas entre 0°C e 50°C , tendo margem de erro na temperatura em torno de 2°C , USINAINFO (2022).

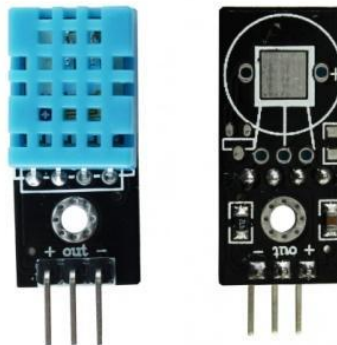


Figura 11 - Módulo DHT11. Fonte: USINAINFO (2022).

Datalogger

O armazenamento de dados é importante para garantir o funcionamento de um sistema independente, assim como a coleta de dados feita pelos sensores interligados no circuito de um protótipo, todos os dados executados e os relatórios

gerados são armazenados em um cartão de memória inserido no módulo de cartão do tipo micro SD (Figura 12), JACINTO (2020).

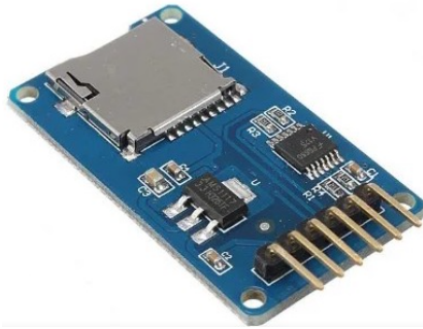


Figura 12 - Módulo Cartão SD. Fonte: USINAINFO (2022).

Módulo Real Time

Em situações em que podem ocorrer falhas na alimentação de energia de sistemas, o módulo relógio de tempo real DS1307 (Figura 13) tem a capacidade de manter a hora e a data atualizadas no sistema em tempo real, MAXIM (2008).

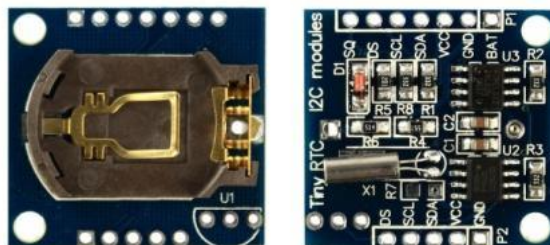


Figura 13 - Módulo DS1307. Fonte: USINAINFO (2022).

Módulo Fotovoltaico

A união de células fotovoltaicas em série ou paralelo compõem o painel fotovoltaico, protegido por uma moldura em alumínio e com proteções a fim de encapsular as células as protegendo dos danos causados pelos raios ultravioletas ao longo do tempo de exposição, a interligação das células produz determinada tensão e corrente, ROCHA e ASSUNÇÃO (2020).

O painel solar fotovoltaico RSM30P segundo seu fabricante é capaz de gerar tensão máxima de 22,68 (V), corrente máxima de 1,76 (A) e potência máxima de 30W (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados Técnicos do Módulo Fotovoltaico.

Modelo	RSM030P
Potência Máxima	30W
Voltagem Máxima	22.68V
Corrente Máxima	1.62A
Peso	2.6KG
Dimensões	670 x 350 x 25mm

Fonte: Dgtec (Adaptado) (2022).

Sistema de Rastreamento Solar Bidirecional com Sensor de Radiação

Proposto, desenvolvido e executado por ALVES (2008), o posicionamento automático para painéis fotovoltaicos com dois graus de liberdade com o sensor de radiação solar (Figura 14) com o guia de direcionamento do sistema resultou em um aumento considerável da energia gerada em até 70% para determinadas situações.

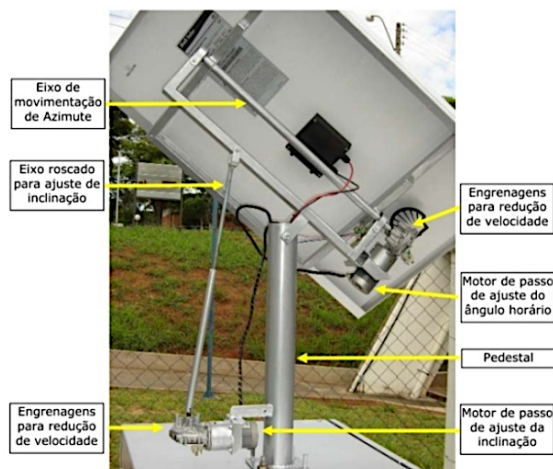


Figura 14 - Detalhe do Suporte Mecânico de Sustentação do Painel Móvel. Fonte: ALVES (2008).

Também desenvolvido e testado por NICÁCIO (2013), o sistema de posicionamento de painéis fotovoltaicos utilizando microcontrolador foi ligado e comparado com o sistema desligado, assim foi concluído que o sistema ligado obteve um aumento médio de 14% na tensão gerada pelo módulo fotovoltaico.

Sendo assim, os resultados demonstram que é possível implantar tais sistemas de posicionamento não só em grandes projetos de captação solar como também em

projetos residenciais, utilizando mecanismos simples e de baixo custo, alcançando resultados satisfatórios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para construção do protótipo do seguidor solar foram utilizados os componentes descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais Utilizados.

Material	Quantidade
Tubo PVC	6 metros
Joelho ¾"	8 unidades
TE ¾"	3 unidades
Cap ¾"	1 unidade
Cola para tubo PVC	1 unidade
Eixo 8Øx60mm	1 unidade
Mancal SHF08	1 unidade
Mancal KFL08	2 unidades
Engrenagem 2:1	2 unidades
Correia GT2	1 unidade
Parafusos	18 unidades
Porcas	18 unidades
Arruelas	25 unidades
Caixa para Disjuntor	2 unidades
Placa Arduino UNO Mega	1 unidade
Módulo DHT11	1 unidade
Módulo DS1307	1 unidade
Módulo Sensor De Corrente	1 unidade
Módulo SD	1 unidade
Driver A4988	2 unidades
Motor de Passo NEMA 23	2 unidades
Jumper	42 unidades
Protoboard	1 unidade
Fonte para Protoboard	1 unidade
Bateria 12MVA-7	1 unidade
Controlador de Carga Solar PWM 20A	1 unidade
Resistores	16 unidades

Fonte: Autor (2022).

A estrutura foi feita com tubo PVC $\frac{3}{4}$ " revestido com tinta spray resistente a alta temperatura, o suporte do módulo fotovoltaico e sua estrutura interligada a base foi produzida conforme Figura 15, Figura 16 e Figura 17.



Figura 15 - Montagem da Estrutura de Suporte. Fonte: Autor (2022).



Figura 16 - Montagem da Placa Solar. Fonte: Autor (2022).



Figura 17 - Montagem da Placa Solar e Estrutura. Fonte: Autor (2022).

Os ajustes e alinhamentos dos mancais e das engrenagens foram feitos com todos os componentes montados, a fim de garantir o melhor equilíbrio do protótipo, conforme montagem realizada, disponível em https://youtu.be/h5991gWvm_Y.

Os circuitos eletrônicos foram predispostos em um quadro de distribuição garantindo o abrigo ao sol e chuva, bem como a bateria e o controlador de carga solar, montados também em um quadro de distribuição conforme mostrado na Figura 18.

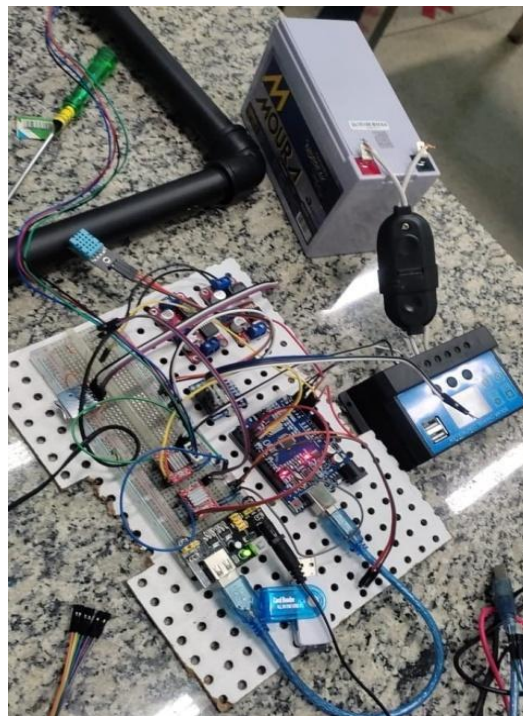


Figura 18 - Montagem do Circuito. Fonte: Autor (2022).

A data do teste e coleta de dados do protótipo foi no dia 10/07/2022 no período das 08:30h às 16:30h. Neste dia, a previsão do tempo estava com temperatura mínima de 17°C e máxima de 27°C, parcialmente nublado, com variações de irradiância entre 300 e 500 W/m².

A lógica de programação foi feita especificamente para a data do teste do protótipo, se baseado nos dados referentes à posição solar da cidade de Feira de Santana no estado da Bahia, conforme Tabela 4, e considerando um ponto de

melhoria, existe a possibilidade de ser criado um banco de dados e a programação ser executada para todos os dias do ano.

Tabela 4 - Posição Solar

Data	10/07/2022	
Coordenadas	-12.2578934, -38.9598047	
Hora	Elevação	Azimute
08:30h	19,5°	60,9°
09:00h	25,8°	57,7°
09:30h	31,9°	53,9°
10:00h	37,6°	49,1°
10:30h	42,9°	43,2°
11:00h	47,5°	35,9°
11:30h	51,4°	27,0°
12:00h	54,1°	16,4°
12:30h	55,5°	4,6°
13:00h	55,3°	352,4°
13:30h	53,6°	340,8°
14:00h	50,5°	330,6°
14:30h	46,5°	322,1°
15:00h	41,6°	315,2°
15:30h	36,2°	309,6°
16:00h	30,4°	305,1°
16:30h	24,3°	301,4°

Fonte: SUNEARTHTOOLS (Adaptado) (2022).

Os dados obtidos em ângulos foram convertidos em pulsos para que, depois de carregados os dados no Arduino, estes sejam executados como passos nos motores, onde, após cada sequência de comandos, os motores fiquem travados, mantendo assim a posição do módulo fotovoltaico até que novamente sejam executadas as próximas sequências de comandos. A programação desenvolvida é armazenada na base de dados *datalogger*, assim como os relatórios de dados dos resultados. A programação recebe os dados meteorológicos do sensor de temperatura DHT11, alimentando o relatório gerado pelo Arduino com as informações meteorológicas. O sistema é atualizado com data e horário automaticamente através do módulo de tempo real (RTC) DS1307. O sensor de

corrente alimenta o Arduino através da geração de energia da placa fotovoltaica, que em conjunto com resistores é medida a tensão.

Considerando uma linearidade após a análise dos dados referentes a inclinação inicial da nascente do Sol, foi determinada a posição inicial, e assim sistema foi programado para que, ao final do dia, em horário programado, o módulo fotovoltaico retorne à posição inicial referente ao início do dia seguinte.

RESULTADOS

Buscando a praticidade no sistema de automação do seguidor solar, o sistema Arduino foi escolhido, em conjunto com sua facilidade na disponibilidade de módulos dentre outros componentes também utilizados, assim como também a sua comunicação direta com o notebook utilizado para coleta dos dados.

Com a utilização do controlador de carga modelo PWM30A em conjunto com a bateria estacionária modelo 12MVA-7 foi garantida a autonomia independente do sistema.

Foram coletados os dados da tensão e amperagem geradas pela placa solar acoplada ao protótipo desenvolvido, que teve seu funcionamento adaptado para se comportar de forma fixa, como habitualmente são instaladas as placas fotovoltaicas em sistemas residenciais considerando apenas o desvio azimutal, e no funcionamento com dois graus de liberdade, o sistema de automação direcionou o módulo fotovoltaico perpendicularmente na direção do sol durante todo o seu período de funcionamento. Os dados foram coletados a cada 30 minutos, onde, no mesmo período, o protótipo foi adaptado para que fossem coletados os dados do sistema fixo. Após a coleta, o sistema foi ligado para que o módulo se posicionasse coordenadamente através do banco de dados programado, assim se repetiu no intervalo de tempo informado da coleta dos dados (Figura 19).

Os dados meteorológicos referentes à temperatura do ambiente foram obtidos através do posicionamento do sensor DHT11 nas mesmas condições do módulo fotovoltaico. Os dados coletados referentes à irradiância incidente sob o módulo fotovoltaico foram coletados através do sensor BPW34, conectados ao circuito e posicionados no mesmo nível do módulo solar.



Figura 19 - Protótipo Desenvolvido em Teste. Fonte: Autor (2022).

Posicionamento Fixo do Módulo Fotovoltaico

Utilizando o mesmo módulo fotovoltaico do protótipo para coleta de dados do sistema fixo de geração de energia limpa, o protótipo foi desligado e adaptado para que se comportasse de forma fixa durante todo o período de teste, simulando seu posicionamento fixo em um telhado com sua face direcionada ao norte geográfico e foi considerada a angulação de 12° referentes à latitude do local do teste.

Ao final do período foram coletados os dados referentes à temperatura (°C), tensão (V) e corrente (A) (Tabela 5 e Tabela 6).

Tabela 5 - Módulo Solar Fixo (Temperatura, tensão e corrente).

Horário	Temperatura (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)
08:30	25,1	18,7	0,6
09:00	25,8	19,9	0,6
09:30	26,1	18,8	0,7
10:00	28,3	19,1	0,7
10:30	29,6	19,4	0,9
11:00	34,0	18,6	0,8
11:30	31,2	19,8	0,9
12:00	32,4	19,9	1,0
12:30	35,6	19,8	1,0
13:00	33,7	19,8	1,0
13:30	35,3	19,9	1,0
14:00	32,9	18,8	0,9
14:30	31,4	18,1	0,9

15:00	29,2	16,8	0,8
15:30	28,0	18,6	0,7
16:00	27,3	18,5	0,7
16:30	26,0	17,7	0,7

Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 - Módulo Solar Fixo (Irradiância e potência).

Horário	Irradiância (W/m ²)	Potência (W)
08:30	300,4	10,8
09:00	324,8	12,3
09:30	329,4	12,6
10:00	331,5	13,2
10:30	360,6	17,1
11:00	369,4	15,1
11:30	378,3	17,6
12:00	398,3	19,5
12:30	426,9	19,8
13:00	460,4	19,8
13:30	493,6	19,9
14:00	381,3	17,7
14:30	373,8	16,7
15:00	351,3	12,6
15:30	310,4	12,8
16:00	308,3	12,8
16:30	304,9	12,2

Fonte: Autor (2022).

Seguidor Solar com Dois Graus de Liberdade

No mesmo local da coleta de dados com o módulo fotovoltaico fixo, o sistema foi destravado e energizado para seu devido acionamento. Após a leitura e atualização de dados através dos sensores interligados no sistema Arduino, os comandos foram encaminhados aos motores de passo para devida rotação em cada eixo, posicionando o módulo fotovoltaico na rotação e inclinação programada nos intervalos de tempo. Assim, foram coletados os dados referentes à temperatura (°C), tensão (V) e corrente (A) (Tabela 7 e Tabela 8).

Tabela 7 - Sistema com Dois Graus de Liberdade (Temperatura, tensão e corrente).

Horário	Temperatura (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)
08:30	25,1	20,5	0,7
09:00	25,8	21,1	0,7
09:30	26,1	20,1	0,7
10:00	28,3	21,5	0,7
10:30	29,6	21,6	0,9
11:00	34,0	20,9	0,9
11:30	31,2	21,3	0,9
12:00	32,4	21,2	1,0
12:30	35,6	21,5	1,0
13:00	33,7	21,4	1,0
13:30	35,3	21,5	1,2
14:00	32,9	20,1	1,0
14:30	31,4	19,9	1,0
15:00	29,2	18,2	0,8
15:30	28,0	19,2	0,7
16:00	27,3	19,8	0,7
16:30	26,0	19,1	0,7

Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 - Sistema com Dois Graus de Liberdade (Irradiância e potência).

Horário	Irradiância (W/m ²)	Potência (W)
08:30	319,5	13,7
09:00	332,6	14,3
09:30	347,3	13,7
10:00	367,1	15,1
10:30	379,8	19,4
11:00	387,3	18,6
11:30	389,9	19,2
12:00	403,1	21,0
12:30	432,8	21,5
13:00	441,8	21,4
13:30	495,1	25,8
14:00	388,4	19,3
14:30	386,6	19,1
15:00	370,4	14,4
15:30	339,0	13,4

16:00	315,9	13,9
16:30	310,2	13,2

Fonte: Autor (2022).

Análises dos Dados Coletados

Através dos dados coletados no período de teste e dispostos na Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, podem ser feitas análises através do método da comparação de resultados, que mostram diferentes comportamentos no módulo fotovoltaico ao longo do dia nos sistemas testados, onde a irradiância (W/m^2) teve maior incidência no sistema biaxial.

Na Figura 20 está apresentado o gráfico I-C (irradiância versus corrente) dos sistemas fixo e biaxial, onde a corrente obtida através do sistema de posicionamento biaxial se mostrou maior ou equivalente ao sistema de posicionamento fixo ao decorrer do dia, visto que quanto maior a irradiância, maior é a capacidade de o módulo fotovoltaico fornecer correntes próximas aos limites de geração informados pelo fabricante.

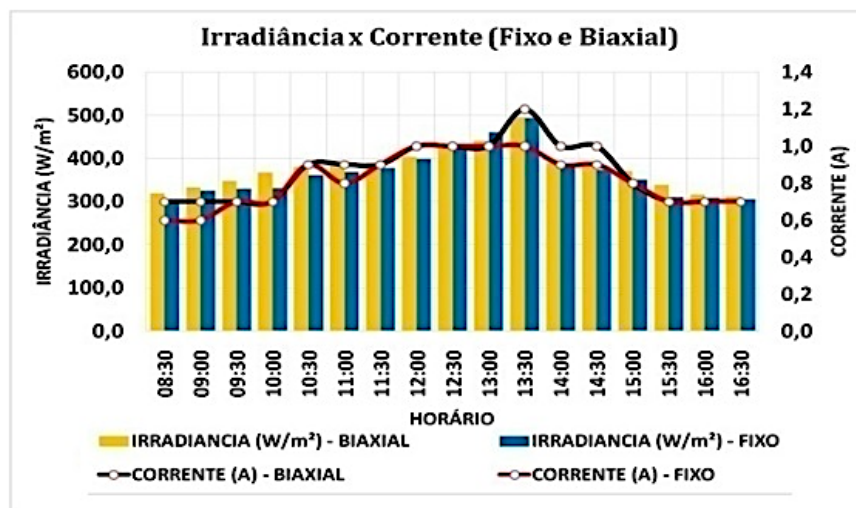


Figura 20 - Irradiância x Corrente (Sistemas Fixo e Biaxial). Fonte: Autor (2022).

Na Figura 21 está discorrido o gráfico I-T (irradiância versus tensão) dos sistemas fixo e biaxial, onde é a tensão gerada pelo sistema de posicionamento biaxial foi superior em relação ao sistema de posicionamento fixo durante todo o

período de teste, apesar das variações de temperatura e nebulosidade ao longo do dia.

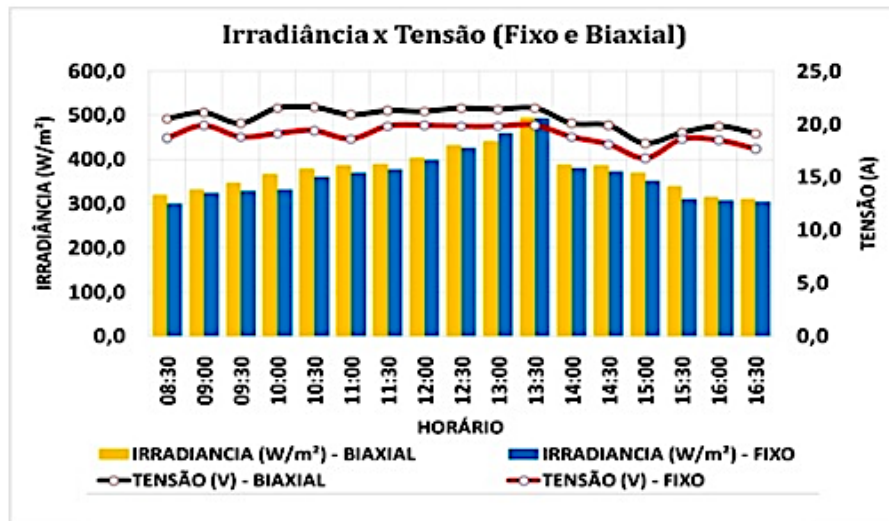


Figura 21 - Irradiância x Tensão (Sistemas Fixo e Biaxial). Fonte: Autor (2022).

Na Figura 22 está disposto o gráfico I-P (irradiância versus potência) dos sistemas fixo e biaxial, onde se percebe a interferência direta dos fatores naturais no módulo fotovoltaico se refletindo na potência, pois mesmo apesar da potência gerada pelo sistema de posicionamento biaxial se manter maior do que a gerada pelo sistema de posicionamento fixo durante todo o período de teste.

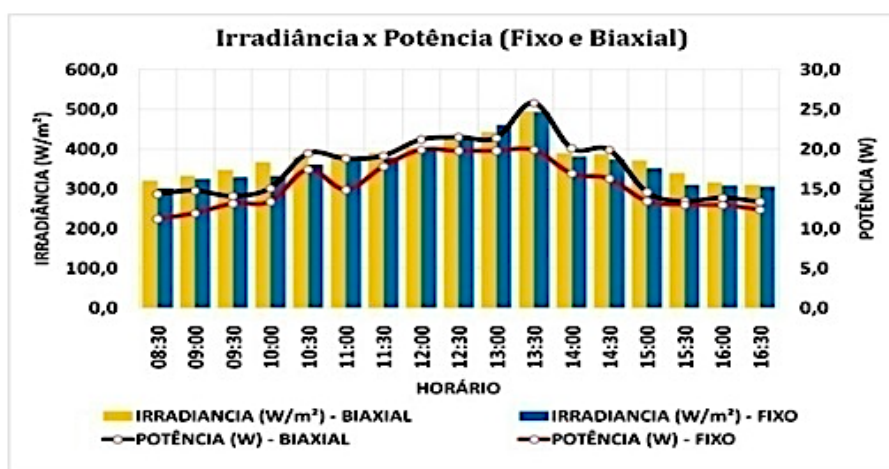


Figura 22 - Irradiância x Potência (Sistemas Fixo e Biaxial). Fonte: Autor (2022).

CONCLUSÃO

O presente artigo detalhou o desenvolvimento, experimentação e análise dos dados coletados de um protótipo do tipo seguidor solar com sistema biaxial de posicionamento programado, foram obtidos dados satisfatórios quando comparado com o sistema fixo de posicionamento, onde foram comparados os dados de tensão (V), corrente (A), potência (W) e irradiância (W/m^2) concluindo que em todas as análises comparativas o sistema de posicionamento biaxial do módulo fotovoltaico foi mais eficiente ao ser comparado com o sistema de posicionamento fixo, mesmo em dias nublados, com melhorias de 12,5% na geração de corrente elétrica (A), 7,9% na geração de tensão elétrica (V) e 14,2% na potência (W) gerada pelo módulo fotovoltaico, e sendo utilizado em projetos de larga escala, ocorrerá um aumento significativo nos resultados já obtidos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e no mundo.** Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 26 ago. 2022.

ALVES, Marliana de O. L. **Energia Solar: Estudo da Geração de Energia Elétrica Através dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Off-Grid.** Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

ALVES, Alceu F. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos.** Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/101817>>. Acesso em: 2 out. 2021.

CONFESSOR, Sâmya L. de M. **Análise comparativa de controladores mppt aplicados a um sistema fotovoltaico.** Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/tede/525>>. Acesso em: 3 jun. 2022.

CUNHA, Guilherme H. B. **Modelagem matemática e implementação computacional no ATP de um sistema solar fotovoltaico conectado a rede de baixa tensão.** Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14577/1/ModelagemMatematicaImplementacao.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

FADIGAS, Eliane, A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica.** Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/apostila-de-energia-solar/4941183/>>. Acesso em: 27 out. 2021.

JACINTO, Manuela P. **Jr-control: dispositivo para monitoramento de máquinas industriais com controle de temperatura ambiente**. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4195>>. Acesso em: 15 maio 2022.

MATOS, Leonardo R. **Projeto de Sistema de Posicionamento Automático para Painel Solar**. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24296/1/2019_LeonardoRochaMatos_tcc.pdf>. Acesso em: 27 out. 2021.

NICÁCIO, Leandro da S. **Sistema de posicionamento de painéis fotovoltaicos utilizando microcontrolador**. Disponível em: <<https://semanaacademica.org.br/artigo/sistema-de-posicionamento-de-paineis-fotovoltaicos-utilizando-microcontrolador>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

ONS. **Escassez Hídrica**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210707-escassez-hidrica-2021.aspx>>. Acesso em: 27 out. 2021.

PEREIRA, Enio B., *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

ROCHA, Lucas M.; ASSUNÇÃO, Thiago M. **Análise técnica e econômica entre sistemas fotovoltaicos fixos e móveis para microgeração**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/15324>>. Acesso em: 2 maio 2022.

SILVA, Jarlan S. **Análise da influência da temperatura na geração de energia utilizando painéis fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos**. Disponível em: <<https://dspace.unipampa.edu.br/handle/rii/1534>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

SILVA, Luzilene S. *et al.* **Avaliação de Custo-Benefício da Utilização de Energia Fotovoltaica**. RCT – Revista de Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/184280734-Avaliacao-de-custo-beneficio-da-utilizacao-de-energia-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 12 out. 2021.

USINAINFO. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. p. 17, 40-41, 62, 65-68.

VITORINO, Ana P. *et al.* **Piranômetro**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Disponível em: <http://meteorologia.florianopolis.ifsc.edu.br/formularioPI/arquivos_de_usuario/20092B.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

WWF - BRASIL. **Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília**. Programa

Mudanças Climáticas e Energia. Disponível em:
<[https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/wwf_potencial_solar_para_interne
t.pdf](https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/wwf_potencial_solar_para_interne
t.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2021.