



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

Curso de Licenciatura em Engenharia Electrónica – Laboral

Trabalho de Licenciatura

**Proposta de um sistema seguidor solar simples de baixo
custo usando o ESP32**

AUTOR

Albino Simione Ngoenha

Maputo, Outubro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

Curso de Licenciatura em Engenharia Electrónica – Laboral

Trabalho de Licenciatura

**Proposta de um sistema seguidor solar simples de
baixo custo usando o ESP32**

AUTOR

Albino Simione Ngoenha

Supervisor

Prof. Doutor. Acácio José Zimbico, Eng^o

Maputo, Outubro de 2024

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha querida, amada mãe e ao querido amado meu pai (*in memore*) que investiram tempo e dinheiro para a minha educação. As suas mãos cuidadosas e seus corações generosos moldaram o meu caminho, e este trabalho é um reflexo do amor e do vosso sacrifício.

Agradecimentos

O fim de uma jornada sempre dá início a outra. Antes de iniciar a outra fase do percurso (à espreita) da vida, expressar a minha gratidão:

A Deus pelo dom do favor imerecida, pois sem tal dádiva, não seria possível frequentar o curso de licenciatura em Engenharia Electrónica. Foi em sua luz que encontrei força e direcção para chegar até aqui.

Aos meus progenitores Ivone Cuco e Simione Ngoenha (*in memore*) que sempre deram o seu máximo de modo a me tornar um ser humano cada vez melhor. Suas vozes ressoam em meu coração como melodias eternas de amor e dedicação por mim.

As minhas irmãs: Florinda Nguenha, Lidia Nguenha e Wina Ngoenha que sempre estiveram ao lado nos momentos bons e maus. Vocês são as estrelas que iluminam meus caminhos, mesmo nas noites mais escuras que tive na faculdade de Engenharia.

Aos colegas da faculdade nomeadamente: Milton Chiluvane, Fénex Siteo, Gerson Chissambule, Amanda Parruque e Arcénio Cumbi por sempre compartilharem conhecimento e experiências que enriqueceram o nosso debate académico. Sou muito grato pelos momentos que juntos partilhamos, por cada risada, cada dúvida esclarecida, e cada vitória celebrada.

Aos Técnicos de Engenharia da Linhas aéreas de Moçambique (LAM) -Direcção técnica – pela força e conhecimento transmitido durante a elaboração deste trabalho.

A todos, o meu sincero obrigado!

Epígrafe

"O sol é a nossa maior fonte de energia. Aproveitar seu potencial é o caminho para um amanhã mais brilhante." – Desconhecido

Resumo

O crescimento da população e a demanda pela utilização de energia eléctrica tem impulsionado a procura de alternativas de energias limpas e renováveis. Assim, a energia solar fotovoltaica tem-se mostrado como opção. Geralmente, este tipo de energia é obtida através de módulos fotovoltaicos instalados em uma posição fixa determinada pela latitude de inclinação do local da instalação. Nessa ordem, o presente trabalho aborda a prototipagem de um sistema seguidor solar de um eixo horizontal utilizando uma plataforma microcontroladora de código aberto, com o objectivo de otimizar a geração de energia fotovoltaica. O sistema foi projectado para posicionar automaticamente os módulos fotovoltaicos na direcção da luz solar de acordo com a posição horária do sol, visando maximizar a potência gerada. Para isso, foram utilizados componentes de baixo custo, como a plataforma de microcontrolador *ESP32*, servo motor, sensores de tensão e corrente. O estudo incluiu a aquisição de dados do sistema com e sem o seguidor solar. Os resultados obtidos demonstraram um bom desempenho dos componentes utilizados no protótipo, embora tenha sido observada uma falha ocasional no envio de dados para a plataforma *ThingSpeak* e um problema de superaquecimento no microcontrolador *ESP32*. Apesar desses eventos inesperados, o protótipo mostrou capacidade de movimentação na direcção leste – oeste. Em termos de eficiência, o sistema com o seguidor solar alcançou uma eficiência de 8,09% em relação ao sistema sem o mecanismo de seguimento durante o período analisado.

Palavras-chave: Seguidor solar, módulos fotovoltaicos, *ESP32*, eficiência, *ThingSpeak*.

Abstract

The growth of the population and the demand for the use of electrical energy have driven the search for clean and renewable energy alternatives. Thus, photovoltaic solar energy has emerged as a viable option. Generally, this type of energy is obtained through photovoltaic modules installed in a fixed position determined by the latitude of the installation site. In this context, the present work addresses the prototyping of a single-axis solar tracker system using an open-source microcontroller platform, aiming to optimize photovoltaic energy generation. The system was designed to automatically position the photovoltaic modules towards the sunlight to maximize the generated power. Low-cost components, such as the ESP32 microcontroller, servo motor, and voltage and current sensors, were used. The study included data acquisition from the system with and without the solar tracker. The results demonstrated good performance of the components used in the prototype, although occasional failures in data transmission to the *ThingSpeak* platform and an overheating issue with the ESP32 microcontroller were observed. Despite these unexpected events, the prototype showed the ability to move in the east-west direction. In terms of efficiency, the system with the solar tracker achieved an 8.09% efficiency increase compared to the system without the tracking mechanism during the analyzed period.

Keywords: Solar tracker, photovoltaic modules, ESP32, efficiency, *ThingSpeak*.

ÍNDICE

Resumo	iv
Abstract	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problematização	2
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 OBJECTIVOS.....	5
1.3.1 Objectivo geral	5
1.3.2 Objectivos específicos	5
1.4 METODOLOGIA.....	6
1.4.1 Quanto a abordagem	6
1.4.2 Quanto aos procedimentos	6
1.4.3 Quanto aos objectivos.....	6
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
CAPÍTULO II	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	9
2.2 Célula e módulo fotovoltaica	10

2.3 Princípio de funcionamento de um módulo fotovoltaica	11
2.4 Parâmetros eléctricos de um módulo fotovoltaico.....	12
2.5 Factores que influenciam a produção de energia num módulo fotovoltaico	14
2.5.1 Intensidade da radiação solar	14
2.5.2 Orientação e Inclinação dos módulos fotovoltaicos	16
2.5.3 Sombreamento	17
2.5.4 Temperatura das células fotovoltaicas.....	19
2.6 Sistemas Seguidores Solares	20
2.7 Classificação dos seguidores solares	21
2.7.1. Quanto ao número de eixos.....	21
2.7.2 Quanto a estrutura de suporte	23
2.7.3 Quanto ao mecanismo de rastreamento	25
2.7.3.1 Seguidor polar	25
2.7.3.2 Seguidor de eixo azimutal ou vertical	26
2.7.3.3 Seguidor de eixo horizontal	26
2.7.3.4 Seguidor de dois eixos polar equatorial.....	26
2.7.3.5 Seguidor de dois eixos azimutal/elevação	26
2.8 Quanto ao tipo de controlo	27
2.8.1 Seguidor passivo	27
2.8.2 Seguidor activo	28
CAPÍTULO III	29
3. COMPONENTES DE UM SISTEMA SEGUIDOR SOLAR.....	29
3.1 Microcontrolador	29

3.2 Motores eléctricos	29
3.2.1 Motores de Passo	30
3.2.2 Motor CC	30
3.2.3 Motores de indução	31
3.2.4 Servo motor	31
3.3 Sensores	31
3.4 Servidor NTP	32
3.5 ThinkSpeak	32
CAPÍTULO IV	34
4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	34
4.1 Visão Geral do Seguidor Solar	34
4.2 Selecção e descrição dos componentes utilizados	35
4.2.1 ESP32	36
4.2.2 Módulo fotovoltaico	37
4.2.3 Motor de Movimentação	39
4.3 Medição da potência	40
4.3.1 Medição de corrente	40
4.4 Estrutura do seguidor solar	42
4.5 Configuração do software de colecta de dados	43
4.5.1 Configuração do <i>thingspeak</i>	43
4.6 Princípio de funcionamento	45
4.7 Testes do Protótipo e Resultados	48
4.7.1 Resultados Obtidos	48

4.8 Comparação da eficiência do sistema seguidor e sistema fixo.....	51
4.9 Custo do protótipo.....	52
CAPÍTULO V.....	54
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	54
5.1 Conclusão.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXOS.....	60
Anexo 1: Dados De Colectados No <i>thingspeak</i>	60
Anexo 2: Estrutura Do Seguidor Solar.....	62
Anexo 3: Dados Do Suncal Usados No Código Para O Experimento Do Protótipo (Mês De Março).....	63
Anexo 4: Dados Do Sistema Fotovoltaico Fixo.....	64
Anexo 5: Dados Do Sistema Seguidor Fotovoltaico.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Efeito fotovoltaico numa célula fotovoltaica	11
Fig. 2: Curva característica da célula fotovoltaica	15
Fig. 3: Eficiência de conversão <i>versus</i> radiação.....	16
Fig. 4: Orientação da face do módulo fotovoltaico.....	17
Fig. 5: Ligação de díodos de desvio nas células fotovoltaicas	18
Fig. 6: Separação entre os módulos fotovoltaicos	18
Fig. 7: Efeito da temperatura numa célula fotovoltaica.....	20
Fig. 8: Seguidor solar de um eixo; a) Horizontal; b) Vertical; c)Inclinado	21
Fig. 9: Seguidor solar de dois eixos.....	22
Fig. 10: Seguidor solar híbrido (de três eixos).....	23
Fig. 11: Seguidor solar com estrutura de plataforma giratória	24
Fig. 12: Seguidor de estrutura pedestal.....	24
Fig. 13: Seguidor de estrutura de eixo inclinado.....	25
Fig. 14: Seguidor solar passivo.....	27
Fig. 15: Exemplo de um microcontrolador Atmega 328P	29
Fig. 16: Exemplo de motor de passo (à esquerda) e motor CC (à direita)	30
Fig. 17: Motor de indução	31
Fig. 18: Diagrama de blocos do sistema seguidor solar	35
Fig. 19: Microcontrolador ESP32	36
Fig. 20: Módulo fotovoltaico do protótipo	39
Fig. 21: Servo Motor do protótipo	39
Fig. 22: Circuito divisor de tensão.....	41
Fig. 23: Estrutura do seguidor solar feito em Autocad	42
Fig. 24: Página inicial.....	43
Fig. 25: Criação de um canal	44
Fig. 26: Obtenção de chaves da API	45
Fig. 27: Fluxograma de aquisição de dados do sistema seguidor solar	46
Fig. 28: Fluxograma do funcionamento do sistema seguidor solar	47
Fig. 29: Calibração do relógio interno do <i>ESP32</i>	48
Fig. 30: Variação da tensão do seguidor ao longo do tempo	49
Fig. 31: Variação da potência do seguidor ao longo do tempo.....	49
Fig. 32: Variação da tensão do sistema fixo ao longo do tempo	50
Fig. 33: Variação da potência do sistema fixo ao longo do tempo	51
Fig. 34: Variação da potência do sistema seguidor <i>versus</i> sistema fixo.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características e especificações do <i>ESP32</i>	37
Tabela 2: Características e especificações do módulo solar da <i>Solar Shine</i>	38
Tabela 3: Características e especificas do servo motor MG995	40
Tabela 4: Custo dos componentes para a montagem do protótipo seguidor solar	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
A	Ampère
API	<i>Application Programming Interface</i>
GPIOs	<i>General Propose Input-Output</i>
I/O	<i>Input /Output</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
KB	<i>Kilobyte</i>
Kg.cm	Quilograma Centímetro
KHZ	<i>Kilohertz</i>
KΩ	<i>Kiloohm</i>
LED	<i>Ligth Emission Diode</i>
MATLAB	<i>Mathematics Laboratory</i>
MHZ	<i>Megahertz</i>
Mm	Milímetro
MT	Metical
mV/A	Milivolt por Ampere
mΩ	Miliohm
NTPv4	<i>Network time protocol version 4</i>
PIC	<i>Programable interface control</i>
RAM	<i>Read Access Memory</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
STC	<i>Standard Temperature Condition</i>

UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	<i>Volt</i>
W	<i>Watt</i>
W/m²	<i>Watt por metro quadrado</i>
Fig	<i>Figura</i>
S.d	<i>Sem data</i>
Eq.	<i>Equação</i>

1. INTRODUÇÃO

A demanda pela energia eléctrica e crescente busca de fontes de energias limpas sustentáveis tem ganhado mais destaque no mundo. Isso vem sendo impulsionado pelas mudanças climáticas e também pela necessidade de redução da dependência por recursos não renováveis (como o petróleo, o gás e o carvão). No entanto, a energia solar fotovoltaica, tem-se mostrado como uma alternativa certa no suprimento crescente da demanda por energia eléctrica e pela redução das emissões de CO₂ na atmosfera.

Assim, a energia solar fotovoltaica é aquela que é conseguida através do efeito fotovoltaico utilizando dispositivos designados de células fotovoltaicas que convertem directamente a radiação solar em electricidade. Essas células são constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais utilizado. Este tipo de energia vem sendo implementado em zonas rurais, possibilitando a implementação de vários projectos sociais, de irrigação e de telecomunicações devido às facilidades que a mesma apresenta como, por exemplo, a modularidade, baixo custo de manutenção e vida longa, tornando-se de extrema importância para locais sem acesso a rede eléctrica. (CRESESB, s.d).

Embora a energia solar fotovoltaica se mostre vantajosa em relação às outras, ela apresenta limitações no que diz respeito ao seu custo de (instalação) e ao desempenho em algumas estações do ano quando instalado numa posição fixa e quando comparado as fontes não renováveis de geração de electricidade.

Assim, visando maximizar o desempenho (eficiência) dos módulos fotovoltaicos faz-se necessária a utilização de seguidores. Os sistemas seguidores solares surgem como solução para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Esses dispositivos permitem que os módulos fotovoltaicos estejam sempre expostos na direcção do sol permitindo que produzam mais electricidade, aumentando desse modo a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

1.1. Problematização

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia proveniente do sol, convertida em energia eléctrica através de dispositivos conhecidos como módulos fotovoltaicos. Estes módulos captam a radiação solar e transformam-na em energia utilizável. No entanto, o processo de geração de energia através dos módulos fotovoltaicos enfrenta diversas limitações devido a factores como a radiação incidente, a temperatura ambiente, a orientação dos módulos e a inclinação com que estes estão dispostos em relação ao sol (PINHO; GALDINO, 2014).

Para que os módulos fotovoltaicos alcancem o seu máximo potencial de eficiência e, conseqüentemente, uma maior produção de energia, é essencial que estejam constantemente expostos e orientados na direcção do sol. Contudo, devido à movimentação da terra em relação ao sol ao longo do dia, não é possível que um módulo fotovoltaico fixo (com orientação estática) mantenha o alinhamento ideal para captar a luz solar durante todas as horas do dia. Isto implica uma perda de eficiência na captação de energia solar, especialmente nos períodos em que o ângulo de incidência solar não é o mais adequado para maximizar a geração de energia.

Além disso, a inclinação fixa e o ângulo de azimute dos módulos fotovoltaicos frequentemente resultam numa produção de energia insuficiente, pois os módulos não permanecem constantemente alinhados com a trajectória do sol (movimento da terra), que está em movimento contínuo. Este desfasamento provoca perdas significativas de captação da radiação solar, principalmente em horários extremos do dia (amanhecer e entardecer), quando a posição do sol varia mais drasticamente.

O problema torna-se ainda mais crítico/grave quando consideramos que a produção de energia eléctrica depende directamente da intensidade e duração da exposição solar. Módulos mal posicionados ou fixos perdem a capacidade de captar a quantidade máxima de radiação, o que compromete o desempenho geral do sistema. Esta limitação afecta tanto a quantidade quanto a qualidade da energia gerada, especialmente em cenários onde o objectivo é maximizar a eficiência energética e garantir uma geração sustentável.

Assim, a necessidade de adoptar uma solução que permita a maximização da captação solar ao longo do dia torna-se evidente. Neste contexto surge a seguinte questão de pesquisa:

Que mecanismo pode ser adoptado para maximizar a geração de energia fotovoltaica, garantindo o alinhamento contínuo dos módulos com a posição do sol ao longo do dia?

1.2 JUSTIFICATIVA

A energia solar fotovoltaica possui um potencial de desenvolvimento, apesar dos desafios que ela enfrenta especialmente em termos de eficiência. As melhores células fotovoltaicas disponíveis apresentam índices de eficiência relativamente baixos, variando entre 11% e 25%, dependendo dos materiais utilizados (FREITAS, 2012 *apud* SOARES, 2021). No entanto, pesquisas relativas a eficiência indicam um progresso positivo, sendo que nos últimos 10 anos, houve um aumento na eficiência dos módulos fotovoltaicos acompanhado por uma significativa redução nos custos de produção (FREITAS, 2012 *apud* SOARES, 2021; FADIGAS, 2012).

Um outro problema enfrentado pelos módulos fotovoltaicos reside no facto de que eles não conseguem manter uma orientação perpendicular aos raios solares de forma consistente ao longo do dia. Essa falta de alinhamento compromete ainda mais a capacidade de geração de energia (MEDEIROS, 2016).

Diante desse cenário, surge a necessidade de explorar soluções inovadoras de forma a aumentar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, garantindo que os módulos estejam sempre direccionados ao sol.

Assim, o estudo se propõe a investigar uma abordagem específica com a finalidade de orientar de forma dinâmica os módulos fotovoltaicos para maximizar a geração de energia fotovoltaica pela exposição aos raios solares através da prototipagem de um sistema seguidor solar usando o ESP32.

1.3 OBJECTIVOS

1.3.1 Objectivo geral

Desenvolver um protótipo de um sistema seguidor solar simples de baixo custo usando o ESP32.

1.3.2 Objectivos específicos

- Identificar diversos sistemas seguidores solares;
- Descrever os componentes necessários para a prototipagem do sistema seguidor solar;
- Realizar a aquisição de dados dos níveis de tensão e corrente do sistema seguidor solar e do sistema fixo;
- Comparar a eficiência entre o sistema de seguidor solar e o sistema fixo.

1.4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho é feita a construção de um protótipo. Além de ser feita a revisão da literatura por meio da pesquisa documental e bibliográfica.

1.4.1 Quanto a abordagem

Uma pesquisa quanto a abordagem pode ser classificada com qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa consiste em analisar e interpretar aspectos profundos, descrevendo a complexidade do comportamento humano, etc., enquanto a pesquisa quantitativa caracteriza-se pelo emprego da quantificação tanto nas modalidades de recolha de informações, quanto no tratamento delas por meio de técnicas estatísticas. (LAKATOS, 2003).

Neste trabalho é realizada uma abordagem quantitativa, pois a pesquisa lida com dados numéricos dos parâmetros eléctricos obtidos do sistema seguidor solar e do sistema fotovoltaico fixo.

1.4.2 Quanto aos procedimentos

Tendo em conta o objectivo geral, recorreu-se a pesquisa bibliográfica, sendo esta desenvolvida a partir de informações de livros, artigos, *websites*, revistas electrónicas, trabalhos de conclusão de cursos, teses e dissertações, auxiliando deste modo nas diferentes etapas da elaboração do projecto/proposta. Este tipo de pesquisa foi principalmente utilizado a revisão da literatura teórica do projecto.

Por outro lado, a pesquisa experimental é utilizada, pois esta envolve testes do protótipo seguidor solar e análise das vantagens da implementação do mesmo comparando com um sistema fotovoltaico fixo. Além disso, foi utilizada uma pesquisa de campo, pois foram obtidos dados reais sobre o aumento de potência adquirida pelo sistema fotovoltaico com o uso do sistema seguidor.

1.4.3 Quanto aos objectivos

Quanto aos objectivos o presente trabalho é de carácter descritivo, exploratório e explicativo.

Usando o método descritivo são apresentadas todas as partes que compõem um sistema seguidor solar incluindo os diferentes tipos de seguidor e os materiais utilizados na sua montagem.

É utilizado também a pesquisa explicativa, com vista a dar explicações do sistema protótipo desenvolvido por meio de diagramas e de gráficos dos dados dos parâmetros eléctricos obtidos durante o tempo de teste/funcionamento do sistema.

Para alcançar os objectivos propostos no projecto de pesquisa, foram realizados os seguintes passos:

- Análise e avaliação dos sistemas de controlo para seguimento solar fotovoltaico;
- Selecção do algoritmo para o sistema electrónico de controlo;
- Selecção do *hardware* e *software* do sistema de controlo do rastreador solar;
- Construção e montagem da estrutura física para o seguidor solar fotovoltaico;
- Implementação do algoritmo adequado para o controlo do sistema;
- Conexão para envio de dados ao *ThingSpeak*;
- Realização de testes de funcionamento do sistema;
- Comparação dos parâmetros eléctricos entre o sistema fotovoltaico fixo e o sistema seguidor solar construído.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos que são:

Capítulo 1: Introdução, objectivo, justificativa e a metodologia;

Capítulo 2: Revisão da literatura;

Capítulo 3: Componentes de um sistema seguidor solar;

Capítulo 4: Desenvolvimento do protótipo;

Capítulo 5: Conclusão e recomendações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é uma forma de energia renovável obtida através da conversão da luz solar em electricidade, utilizando células fotovoltaicas. Essas células, geralmente feitas de silício, capturam a energia dos fótons da luz solar e a transformam em corrente eléctrica contínua. Esse processo é conhecido como efeito fotovoltaico e é a base da geração e conversão de energia solar fotovoltaica.

O efeito fotovoltaico foi observado no ano de 1839 por **Edmond Becquerel** ao demonstrar que havia uma possibilidade de converter a radiação luminosa em electricidade, ao incidir a luz sobre um eléctrodo em uma solução de electrólito (MEDEIROS, 2016).

Em 1877, na Inglaterra, **W. G. Adams** e **R. E. Day** observaram o mesmo efeito num dispositivo no estado sólido fabricado com selênio, indicando que a luz poderia ser convertida em electricidade em um material semiconductor (FADIGAS, 2012; PINHO; GALINO, 2014).

Esta revelação inicial preparou o terreno para descobertas subsequentes, sendo que no ano de 1883 foi criada a primeira célula solar por **Charles Fritts** utilizando o selênio apresentando uma eficiência de conversão de aproximadamente 1% (PINHO; GALDINO, 2014).

Na década de 1930, cientistas pioneiros como **Lange**, **Grandahl** e **Schottkl** contribuíram com avanços significativos na compreensão do efeito fotovoltaico em junções de estado sólido. No entanto, o verdadeiro avanço ocorreu em 1941, quando **Ohl** produziu a primeira fotocélula de silício monocristalino, um avanço importante a tecnologia fotovoltaica (FADIGAS, 2012).

O ano de 1954 foi o mais importante, marcado pela criação da fotocélula de silício que compartilha semelhanças fundamentais com as fotocélulas modernas, atingindo uma eficiência de 6%. Ao mesmo tempo, os programas espaciais começaram a

utilizar amplamente as células solares, tornando-se essenciais para missões espaciais e satélites (FADIGAS, 2012).

A crise energética de 1973 impulsionou o interesse renovado pelas aplicações terrestres da energia solar, levando a avanços significativos na redução de custos de produção das células solares. Nos anos seguintes, em 1993, os Estados Unidos alcançaram uma produção significativa de células fotovoltaicas, principalmente à base de silício, o segundo elemento mais abundante na Terra (CRESESB, s.d).

Actualmente existem materiais semicondutores especialmente adaptados para a conversão fotovoltaica. Entre esses materiais, o silício cristalino e o silício amorfo hidrogenado são os mais comumente utilizados, mas apresentam diferenças estruturais significativas. No silício cristalino, os átomos ocupam posições regulares no espaço, formando uma estrutura cristalina perfeitamente organizada. Em contraste, o silício amorfo hidrogenado, uma opção mais recente e promissora do ponto de vista econômico possui uma estrutura menos ordenada (BRAGA, 2008).

2.2 Célula e módulo fotovoltaica

A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do sistema fotovoltaico, responsável pela conversão directa da energia solar em energia eléctrica. As células fotovoltaicas, individualmente, por apresentarem uma baixa tensão, corrente e uma quantidade de energia limitada, são interconectadas ou agrupadas em série ou em paralelo com objectivo de aumentar a energia disponível das células. A esse conjunto ou grupos de células interconectadas electricamente e encapsuladas recebem o nome de **módulo fotovoltaico**, **painel solar**, ou **placa solar**. Quando há vários módulos fotovoltaicos interconectados designa-se **array** (ALVES, 2016; CRESESB, s.d).

Os módulos fotovoltaicos são componentes fundamentais para os sistemas fotovoltaicos pois, sem a presença dos mesmos não seria possível realizar a conversão da energia solar em energia eléctrica e geralmente são constituídas por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série/paralelo de acordo com as características ou parâmetros eléctricos mais adequados a aplicação do módulo (CORTEZ, 2013; PINHO; GALDINO, 2014).

2.3 Princípio de funcionamento de um módulo fotovoltaica

O princípio de funcionamento do módulo fotovoltaico baseia-se na conversão de energia proveniente do sol em energia eléctrica através do efeito fotovoltaico. Este fenómeno/efeito ocorre em materiais semicondutores, sendo os mais comuns o germano e o silício, sendo este último largamente utilizado na produção de módulos fotovoltaicos devido à sua abundância na natureza (ARAÚJO, 2012).

O silício puro, enquanto cristal, é um mau condutor eléctrico, pois não possui electrões livres (ARAÚJO, 2012). Este problema é resolvido através da dopagem, que envolve a adição de pequenas quantidades de outros elementos químicos. A introdução de fósforo, por exemplo, proporciona ao silício electrões livres, transformando-o em um material com carga negativa, conhecido como silício tipo **N**. Por outro lado, a adição de boro cria uma deficiência de electrões, transformando-o em um material com carga positiva, chamado de silício tipo **P**.

Assim, quando os raios do Sol incidem na célula fotovoltaica, ocorre a excitação dos electrões que estão presentes na estrutura de silício, gerando uma diferença de potencial nas extremidades do material. Isso resulta em um fluxo de electrões entre o silício do tipo **N** e o silício do tipo **P**. Se um fio condutor for conectado a esse dispositivo, uma corrente eléctrica será conduzida por ele até sistemas que armazenarão ou consumirão a energia eléctrica gerada, conforme é ilustrado na figura 1 (SOARES, 2021).

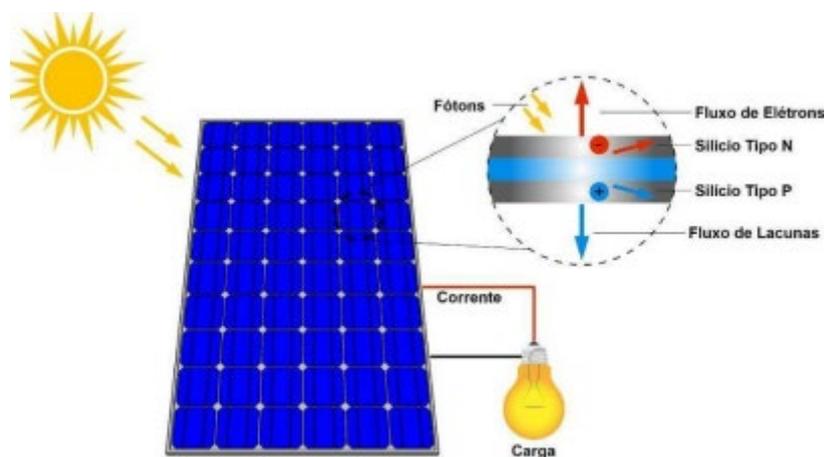


Fig. 1: Efeito fotovoltaico numa célula fotovoltaica

Fonte: SOARES, 2021

2.4 Parâmetros eléctricos de um módulo fotovoltaico

Os parâmetros eléctricos que caracterizam uma célula ou módulo fotovoltaico são: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), factor de forma (**FF**) e eficiência do módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.1 Tensão de circuito aberto (V_{oc})

É a tensão entre terminais do módulo quando não há circulação de corrente e representa a máxima tensão produzida pelo módulo. Essa tensão pode ser medida por meio de um voltímetro e depende essencialmente da corrente de saturação I_0 , da corrente eléctrica fotogerada e da temperatura, conforme a equação:

$$V_{oc} = \frac{K \cdot T}{q} * \ln\left(\frac{I_0}{I_L} + 1\right) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

V_{oc} – Tensão de circuito aberto (V);

K – Constante de Boltzman ($1,38 * 10^{-23} J/K$);

I_0 – Corrente de saturação reversa de díodo (A);

q – Carga eléctrica ($1,6 * 10^{-19} C$);

I_L – Corrente eléctrica fotogerada (A).

2.4.2 Corrente de curto-circuito (I_{sc})

É a corrente máxima mensurável quando os terminais do módulo encontram-se em curto-circuito (a tensão é zero)

2.4.3 Factor de forma (**FF**)

É a razão entre a máxima potência (PMP) e o produto da corrente máxima como a tensão de circuito aberto.

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

FF – Factor de forma (sem unidade);

P_{MP} – Máxima potência (W);

V_{OC} – Tensão de circuito aberto (V);

I_{SC} – Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico para a irradiação G e temperatura de 25 °C (A).

2.4.4 Eficiência (η)

É o parâmetro que determina o quão eficaz é o processo de conversão de energia solar em energia eléctrica. Ela representa a relação entre a potência eléctrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente. Matematicamente, a eficiência de uma célula solar é dada pela expressão:

$$\eta = \frac{I_{SC} * V_{OC} * FF}{A * G} * 100\% = \frac{P_{MP}}{A * G} * 100\% \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

A – área da célula (m²);

G – radiação solar incidente (W/m²);

I_{sc} – corrente de curto-circuito (A);

V_{oc} – tensão de circuito aberto (V);

FF – Factor de forma (sem unidade);

P_{MP} – Máxima potência (W).

2.5 Factores que influenciam a produção de energia num módulo fotovoltaico

Segundo Mello (2021), a produção de energia usando módulos fotovoltaicos pode ser influenciada por diversos factores externos, sendo os principais:

- A intensidade da radiação solar incidente;
- Orientação e inclinação dos módulos;
- O sombreamento;
- Temperatura das células fotovoltaicas.

Por outro lado, Fadigas (2012), destaca a temperatura e a radiação incidente como principais factores que influenciam a produção de energia num módulo fotovoltaico.

2.5.1 Intensidade da radiação solar

A radiação solar provoca um aumento na corrente de curto-circuito e na tensão de circuito aberto. A intensidade da radiação solar varia constantemente devido à rotação da Terra e seu movimento ao redor do Sol. Ao nível do mar, ao meio-dia e em condições de céu limpo, ou seja, sem nuvens, a intensidade da radiação solar atinge aproximadamente 1000 W/m^2 quando o Sol está no zênite (MELLO, 2021).

Se adquirirmos um módulo fotovoltaico de, por exemplo, 58 Wp, isso significa que o módulo fornecerá 58 Watts quando exposto a uma radiação solar de 1000 W/m^2 na superfície da Terra. Portanto, a corrente gerada pelo módulo será máxima durante a incidência de radiação máxima (FADIGAS, 2012).

Com baixas intensidades de radiação solar, como em dias nublados, por exemplo, a corrente produzida diminuirá proporcionalmente. No entanto, a redução da tensão de circuito aberto é pequena conforme é ilustrado na figura 2 da curva característica de corrente (I) em relação à tensão (V) de uma célula ou módulo fotovoltaico para diferentes intensidades de radiação solar incidente.

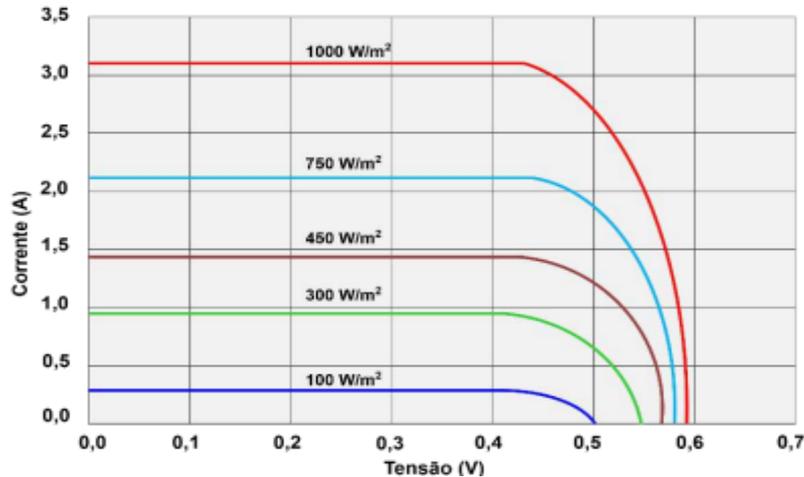


Fig. 2: Curva característica da célula fotovoltaica

Fonte: SOARES, 2021

A corrente de curto-circuito (I_{SC}) de uma célula pode ser calculada em relação à irradiância incidente usando a Equação 4.

$$I_{SC} = I_{SC}^{STC} * \frac{G}{1000} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

I_{SC} – corrente de curto-circuito do módulo;

I_{SC}^{STC} – Corrente de curto-circuito do módulo em condições padrões de teste (STC);

G (W/m^2) – irradiância incidente sobre o módulo;

$1000 W/m^2$ – irradiância nas STC.

No contexto da eficiência fotovoltaica, é fundamental considerar tanto a irradiação solar directa quanto a difusa. Se a irradiação solar directa for alta, é esperado que a eficiência fotovoltaica solar também seja alta. No entanto, essa relação não é suficiente para compreender completamente a eficiência de geração. O factor determinante é a quantidade total de irradiação solar directa e difusa recebida na área total do sistema fotovoltaico. Em outras palavras, a capacidade do sistema fotovoltaico de aumentar sua eficiência não está directamente ligada à alta irradiação solar directa ou difusa. Se o sistema fotovoltaico tivesse essa capacidade, a

quantidade de electricidade gerada poderia ser duas ou três vezes maior do que a observada actualmente (MELLO, 2021).

A eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica apresenta uma variação muito pequena em relação à radiação solar. A Figura 3 mostra a eficiência da célula em função do nível de radiação solar, indicando que, para uma ampla faixa de radiação, a eficiência permanece praticamente constante (FADIGAS, 2012).

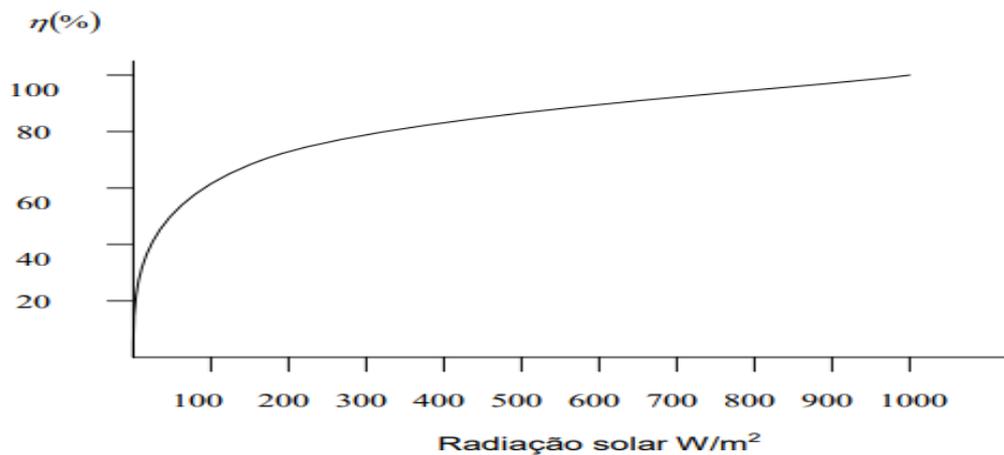


Fig. 3: Eficiência de conversão *versus* radiação

Fonte: FADIGAS, 2012

2.5.2 Orientação e Inclinação dos módulos fotovoltaicos

A orientação e a inclinação adequada dos módulos fotovoltaicos é fundamental para obter o melhor desempenho possível. O ideal é que a luz solar incida verticalmente sobre os módulos fotovoltaicos.

Geralmente, para que os módulos fotovoltaicos operem de forma eficiente, estes devem estar orientados à linha do equador. Para isso, os sistemas de energia solar instalados no hemisfério sul, os módulos fotovoltaicos devem estar voltados para o lado norte e os sistemas localizados no hemisfério norte devem estar orientados ao sul, e inclinados em um ângulo otimizado em relação ao sol conforme é ilustrado na figura 4. (PINHO; GALDINO, 2014; OFERTA SOLAR, 2022).

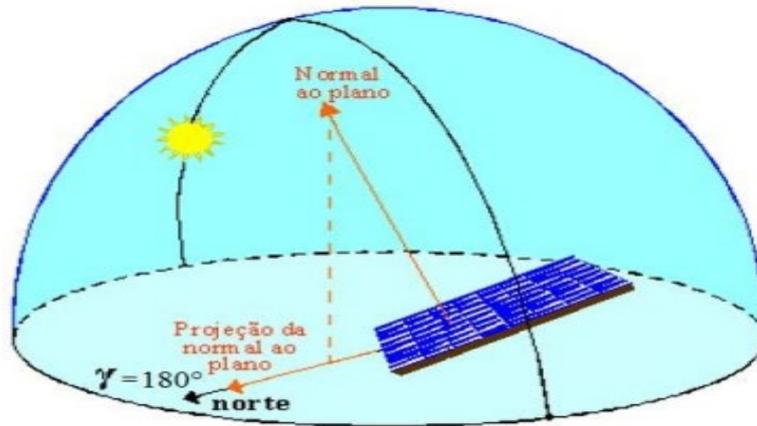


Fig. 4: Orientação da face do módulo fotovoltaico

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

2.5.3 Sombreamento

O sombreamento ou a interferência sobre o módulo fotovoltaico pode afectar negativamente o desempenho e bom funcionamento dos sistemas fotovoltaicos. No entanto, durante a concepção do projecto fotovoltaico é necessário ter em conta esse factor de maneira a obter um bom funcionamento e bom desempenho do sistema fotovoltaico.

Diante disso, mostra-se fundamental a análise do sombreamento durante a concepção do projecto de energia fotovoltaica, pois quando uma parte do módulo é sombreada, as células fotovoltaicas deixam de funcionar como fontes de corrente e passam a actuar como uma "barreira" para o fluxo de corrente eléctrica. Esse fenómeno tem dois efeitos prejudiciais: primeiro, impede que qualquer energia gerada pela série seja aproveitada; segundo, a parte sombreada, ao bloquear o fluxo de corrente, pode aquecer e danificar o módulo. Em sistemas que empregam rastreamento solar, o sombreamento pode ainda desorientar os módulos fotovoltaicos (CORTEZ, 2013; VIERA, 2014).

Quanto maior for o efeito do sombreamento sobre o sistema fotovoltaico, maior serão as perdas e dependendo da gravidade, as perdas podem chegar até aos 75% ou ainda afectar a produção inteira de energia (ENERGÊS, 2020).

Como forma de evitar o sombreamento, torna-se necessária a utilização de díodos *by-pass* como mostrado na figura 5. Esses díodos têm a função de desviar a corrente das células sombreadas, evitando assim, o seu aquecimento e permitir também a colecta da energia gerada pelas células restantes (CORTEZ, 2013).

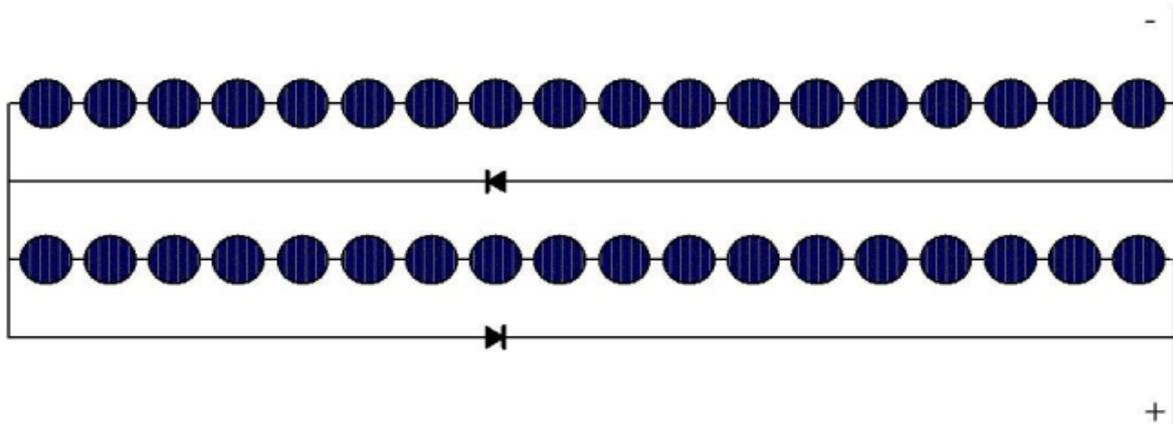


Fig. 5: Ligação de díodos de desvio nas células fotovoltaicas

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

A figura 6 ilustra como o sombreamento pode ser evitado fundamentalmente por uma distância mínima entre os arranjos dos módulos. Isso garante que uma estrutura não projecte a sua sombra sobre a outra em nenhum momento do dia (VIERA, 2014).

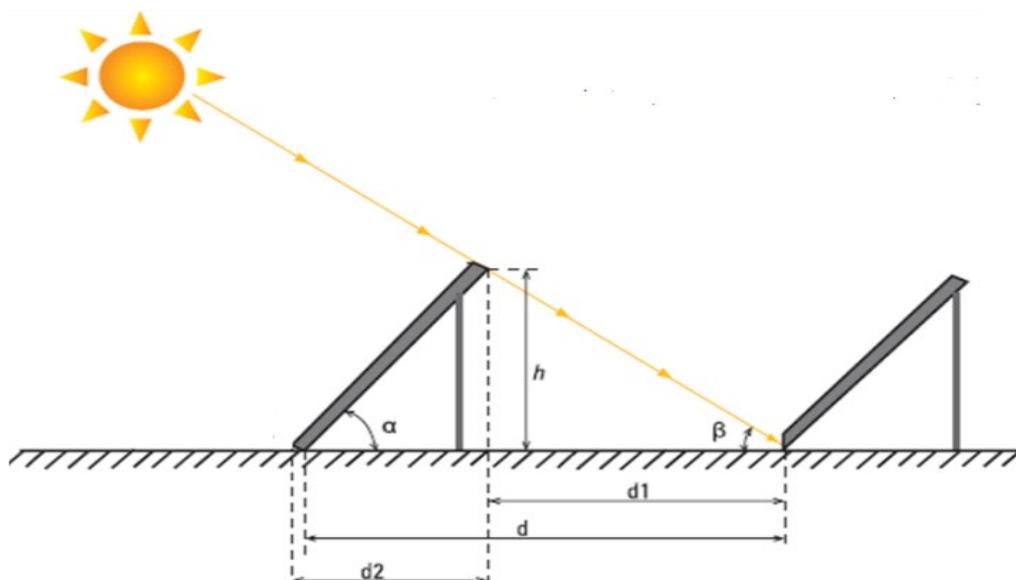


Fig. 6: Separação entre os módulos fotovoltaicos

Fonte: CORTEZ, 2013

A distância de separação entre os dois *arrays* é dada pela equação:

$$d = b * \left(\cos \beta + \frac{\text{sen } \alpha}{\text{tg } \beta} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

d – Afastamento entre as fileiras dos módulos;

b – comprimento do módulo fotovoltaico;

h –Altura;

β – Ângulo que corresponde à altura mínima do Sol;

α – Inclinação dos módulos.

2.5.4 Temperatura das células fotovoltaicas

A temperatura de operação das células solares que compõem os módulos fotovoltaicos é afectada pela variação da radiação incidente e pela temperatura ambiente. Assim, um aumento significativo do nível da radiação incidente e/ou da temperatura provoca um aumento da temperatura da célula e redução da sua eficiência. Isso acontece porque quando a temperatura da célula aumenta, a corrente de curto-circuito sofre um pequeno aumento, quase que desprezível enquanto a tensão de circuito aberto sofre uma diminuição conforme é ilustrado na figura 7 (FADIGAS, 2012; PINHO; GALDINO,2014)

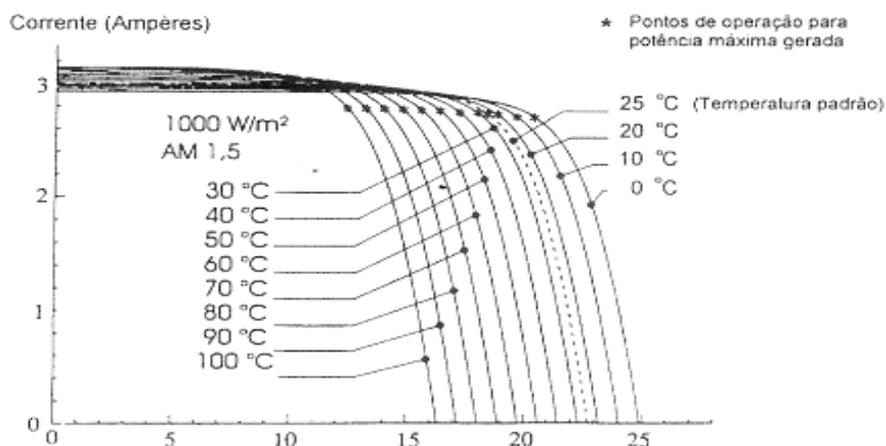


Fig. 7: Efeito da temperatura numa célula fotovoltaica

Fonte: FADIGAS, 2012

2.6 Sistemas Seguidores Solares

Os seguidores solares, também conhecidos como rastreadores solares, desempenham um papel importante na maximização da eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Esses dispositivos são projectados para direccionar os módulos fotovoltaicos de forma dinâmica, acompanhando o movimento do sol ao longo do dia para optimizar a captação de luz solar.

Cortez (2013), define os seguidores solares como dispositivos mecânicos cuja função é garantir que os módulos fotovoltaicos fiquem todo o tempo na posição de radiação solar máxima possível.

Viera (2014), afirma que os seguidores solares são dispositivos que seguem o sol a partir do leste até ao oeste durante o dia, buscando manter o módulo fotovoltaico ou os *arrays* dos módulos ou colectores solares orientados aos raios solares, regulando deste modo o raio de incidência e o ângulo do módulo em 90°.

Recentemente, os seguidores solares têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações de energia solar. Embora anteriormente fossem predominantemente empregados na geração de energia solar térmica, nos últimos anos, a sua utilização tem aumentado, especialmente em conjunto com a energia fotovoltaica, devido à redução dos custos nessa tecnologia (CORTEZ, 2013).

Reis (2016), evidência que quando um sistema fotovoltaico equipado de um sistema seguidor solar consegue captar cerca de 50% de luz solar no período de verão e 20% adicional no inverno, porém estes dados podem diferir-se em função da latitude.

2.7 Classificação dos seguidores solares

Viera (2014), classifica os seguidores de acordo com número de eixos rotativos, à estratégia de rastreamento da posição do sol, o tipo de estrutura e o tipo de controlo.

2.7.1. Quanto ao número de eixos

Os seguidores solares quanto ao número de eixos rotativos podem apresentar um (1) ou dois (2) eixos. Além disso, pesquisas recentes têm explorado seguidores solares com mais de dois eixos, sendo estes conhecidos como seguidores solares híbridos (MUSA *et al.*, 2023).

Os sistemas seguidores solares de um eixo, conforme ilustra a figura 8, são os sistemas projectados de modo a realizarem rastreamento do sol no sentido norte-sul ou leste-oeste. Estes sistemas podem ser fixos numa posição inclinada, vertical ou horizontal.

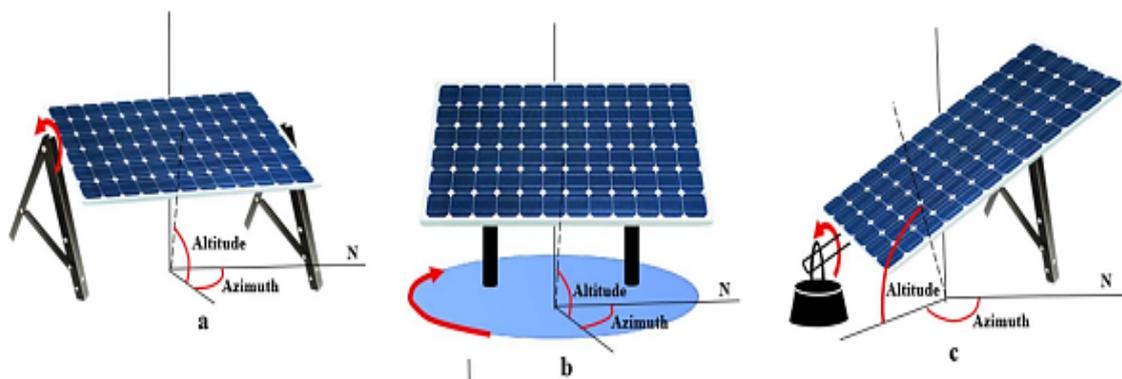


Fig. 8: Seguidor solar de um eixo; a) Horizontal; b) Vertical; c) Inclinado

Fonte: MUSA *et al.*, 2023

Estes tipos de seguidores apresentam uma baixa eficiência, pelo facto de o seguimento do sol ser feito numa única direcção, porém em regiões equatoriais a sua eficiência é maior pois a variação das estações não apresentam grande influência

anual na posição aparente do sol. Em termos financeiros, tem um custo menor pela simplicidade da sua estrutura mecânica e controlo, e são extremamente fáceis de usar por exigirem pouca manutenção (BARBOSA, 2016; CORTEZ 2013).

A figura 9 ilustra um **sistema seguidor de dois eixos**. Este tipo de seguidor é projectado para seguir o movimento do sol em duas direcções, ou seja, este segue o movimento do sol no sentido norte-sul e leste-oeste.

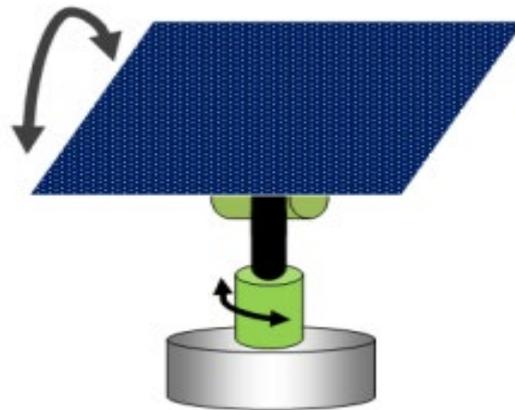


Fig. 9: Seguidor solar de dois eixos

Fonte: BARBOSA, 2016

Desta forma, o seguidor solar de dois eixos consegue obter a maior eficiência pela habilidade que tem de seguir o sol ao longo da horizontal e na vertical simultaneamente. Este tipo de sistema devido a sua complexidade de construção mecânica e controlo de posição é muito caro quando comparado ao seguidor de um eixo e devido ao movimento em dois sentidos (azimutal e elevação) e a utilização desse tipo de seguidor requer uma área de terreno maior.

Nos sistemas seguidores solares híbridos, também conhecido como seguidores solares de três eixos o acompanhamento do sol é realizado ao longo de três eixos conforme ilustrado na figura 10 e foi desenvolvido para resolver as lacunas deixadas pelos outros sistemas seguidores, especialmente em dias nublados e com nevoeiros. Este tipo de seguidor permite capturar energia solar durante a maior parte do dia e com o alinhamento mais preciso com a posição do sol em diferentes estações e condições climáticas (MUSA et.al, 2023).

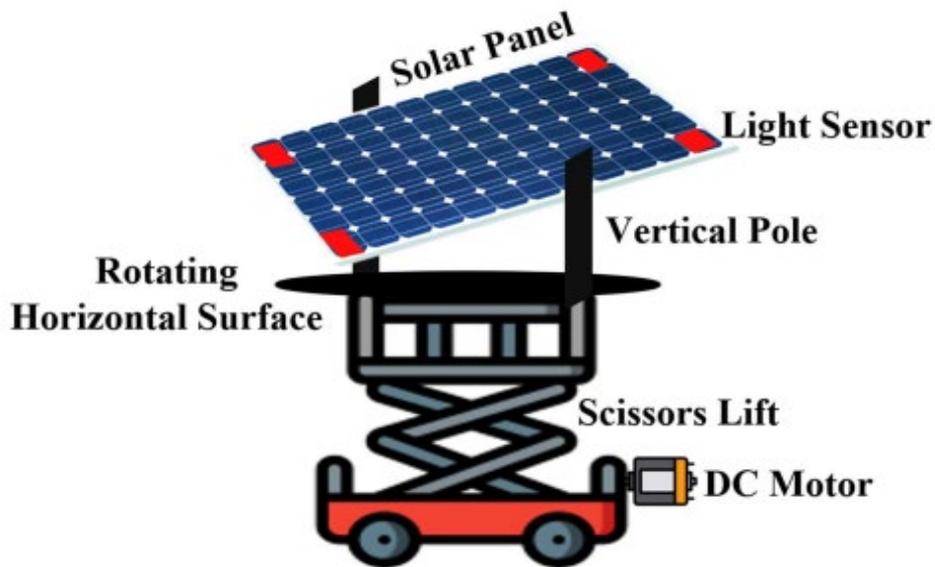


Fig. 10: Seguidor solar híbrido (de três eixos)

Fonte: MUSA *et.al*, 2023

2.7.2 Quanto a estrutura de suporte

Relativamente às estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos, os seguidores solares podem ser classificados em três tipos: plataforma giratória, pedestal e inclinação lateral (*rol- tilt*) (LIRA, 2014).

A configuração com plataforma giratória é frequentemente empregada em sistemas de grande porte, como concentradores solares, suportes para extensos conjuntos de módulos fotovoltaicos ou composições de vários módulos solares. Esta estrutura possui a características de ter uma base circular que permite o movimento ao longo do eixo horizontal conforme é ilustrado na figura 11 (BARBOSA, 2016).



Fig. 11: Seguidor solar com estrutura de plataforma giratória

Fonte: ARAÚJO, 2012

A figura 12 mostra um sistema seguidor solar do tipo pedestal. Este tipo de seguidor apresenta uma estrutura bastante simples, composto por um eixo vertical que gira para movimentar a estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos. Esse movimento rotativo é impulsionado por uma caixa de engrenagens. Devido às forças mecânicas causadas pelo vento, é necessário contar com uma base robusta que pode ser fixada ao solo por meio de uma fundação de concreto (BARBOSA, 2016).



Fig. 12: Seguidor de estrutura pedestal

Fonte: LIRA, 2014

A figura 13 mostra um exemplo típico de um seguidor de tipo *rol-tilt*. Assim, nesta configuração de eixo inclinado (*rol-tilt*), existe um eixo de rotação horizontal para o ajuste dos módulos, permitindo que eles sigam o movimento diário do sol. A inclinação é controlada por eixos perpendiculares ao eixo de rotação. Esses sistemas são mais complicados de instalar devido à presença de vários mecanismos mecânicos responsáveis por seu movimento (LIRA, 2014).

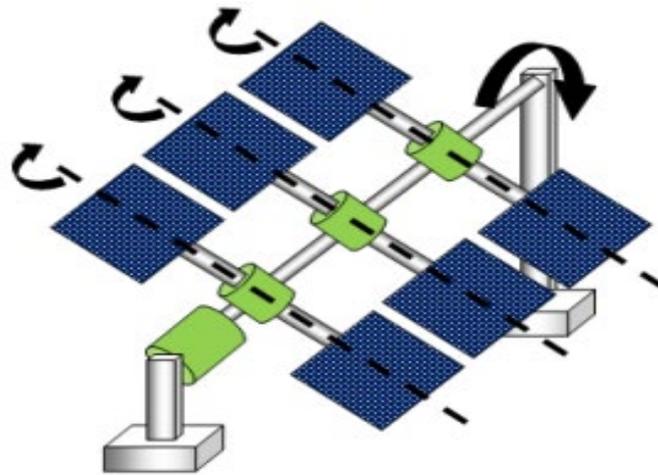


Fig. 13: Seguidor de estrutura de eixo inclinado

Fonte: BARBOSA, 2016

2.7.3 Quanto ao mecanismo de rastreamento

O mecanismo de rastreamento da luz solar varia consoante o número de eixos presentes nos módulos fotovoltaicos. Nos sistemas de um eixo, existem três formas de rastreamento: polar, vertical/azimutal e horizontal. Por outro lado, nos sistemas de dois eixos, existem duas opções de rastreamento: polar equatorial e azimutal/elevação (VIERA, 2014).

2.7.3.1 Seguidor polar

O seguidor polar possui um eixo Norte-Sul fixo em um ângulo, geralmente na latitude do local. Esse eixo serve como o eixo de rotação para o seguidor. Ao adotar esse eixo como o eixo de rotação, garante-se que o módulo fotovoltaico estará

perpendicular ao sol durante os equinócios da primavera e do outono. (CORTEZ, 2013).

2.7.3.2 Seguidor de eixo azimutal ou vertical

Este seguidor movimenta-se no eixo vertical, no sentido leste-oeste, estratégia que apresenta bom desempenho em diversas latitudes e em estações do ano com dias longos. O ajuste da inclinação dos módulos fotovoltaicos é realizado manualmente ao longo do ano (OLIVEIRA, 2007).

A vantagem desse tipo de seguidor é sua robustez e facilidade de implementação. Em muitos casos, essa vantagem compensa a menor quantidade de radiação capturada, o que explica o aumento do uso desse tipo de seguidor (CORTEZ, 2013).

2.7.3.3 Seguidor de eixo horizontal

O seguidor horizontal pode ter orientação sul-norte ou leste-oeste, dependendo da configuração, com seu plano de orientação disposto horizontalmente. Esse método de rastreamento é utilizado tanto em concentradores solares quanto em módulos fotovoltaicos (LIRA, 2014). Embora sua eficiência não seja tão alta quanto a de outros tipos de seguidores, ele permanece uma opção viável para aumentar a eficiência geral do sistema, especialmente porque pode suportar um grande número de módulos fotovoltaicos (CORTEZ, 2013).

2.7.3.4 Seguidor de dois eixos polar equatorial

O seguidor polar equatorial permite a máxima absorção de energia possível, porém, o seu custo é mais elevado em relação às outras configurações e necessita de uma área relativamente grande devido ao sombreamento dos seguidores adjacentes. Nesse tipo de estrutura, um eixo é inclinado de acordo com a latitude local, e o ângulo de seguimento acompanha o ângulo horário (BARBOSA, 2016).

2.7.3.5 Seguidor de dois eixos azimutal/elevação

Os seguidores solares azimutal/elevação utilizam rastreamento nos dois eixos e possuem características bastante semelhantes ao seguidor polar equatorial. A principal diferença entre as duas configurações é que o eixo de rotação no sentido leste-oeste ser eixo vertical, permitindo desse modo, colectar o máximo de energia

possível, embora ocupe uma área maior de terreno para evitar sombreamento nas adjacências.

2.8 Quanto ao tipo de controlo

Relativamente ao controlo dos seguidores solares podem ser classificados da seguinte maneira: seguidores passivos e seguidores activos.

Os seguidores solares passivos utilizam o controlo mecânico e termo-hidráulico, enquanto os seguidores solares activos utilizam dispositivos electrónicos para o controlo sendo comum a utilização de sensores electro-ópticos e microprocessados (VIERA, 2014).

2.8.1 Seguidor passivo

O seguidor solar passivo tem o funcionamento fundamentado em princípios termo-hidráulicos. A termo-hidráulico é o estudo de fluxos hidráulicos em fluidos térmicos que são afectados por variações de temperatura ou pressão (MUSA, et.al, 2023).

O sistema é composto por dois copos que contém um fluido mantido sob pressão montados ao lado do módulo fotovoltaico conforme é ilustrado na figura 14.

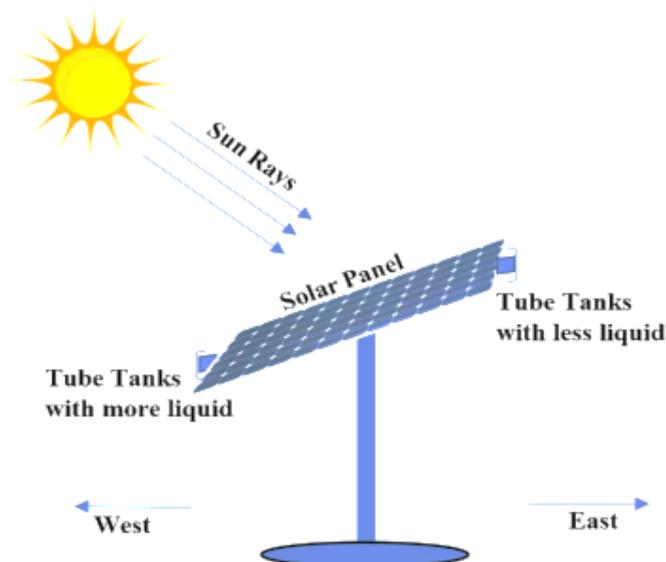


Fig. 14: Seguidor solar passivo

Fonte: MUSA et.al, 2023

O módulo inicia o seu ciclo virado a leste, na direcção do nascer do sol, e à medida que ocorre a transferência de calor entre os raios solares e o fluido contido nos cilindros, o módulo começa a movimentar-se. Desta forma, o módulo acompanha a luz solar, que serve como fonte de calor para as trocas com o fluido contido nos cilindros. A velocidade do movimento é controlada/limitada por meio de um sistema de amortecedores (VIERA, 2014).

Este tipo de seguidor apresenta melhores resultados a altas temperaturas. No entanto, é sensível a perturbações causadas pelo vento, fazendo com que a captura da energia seja reduzida em condições de falta ou parcial radiação solar como em dias nublados ou durante o nascer do sol.

Relativamente ao custo, os seguidores passivos são mais baixo e eles também são menos propensos a serem afectados pela iluminação (BARBOSA, 2016; MUSA et.al, 2023)

2.8.2 Seguidor activo

O seguidor solar activo tem o seu funcionamento baseado em dispositivos electrónicos ou digitais. Estes tipos de seguidores utilizam geralmente sensores ópticos como, por exemplo, foto-díodos, foto-transístores, LDRs (Light Dependent Resistors) e células fotovoltaicas, bem como dispositivos de controlo como: microprocessadores, microcontroladores e PLC (Programmable Logic Control) para detectarem a posição do sol.

Este tipo de sistema utiliza motores e trens de engrenagens no seu sistema de movimentação/posicionamento para alinhar o módulo na direcção do Sol. A movimentação da estrutura do seguidor e/ou módulo é efectuado quando as informações obtidas pelos sensores são enviadas ao dispositivo de controlo, activando desse modo o motor ou actuador.

A vantagem desse sistema é a de apresentar melhores resultados em dias de condições climáticas favoráveis, e a desvantagem reside no facto de em dias nublados o sistema não puder se posicionar correctamente em virtude da fraca luminosidade.

3. COMPONENTES DE UM SISTEMA SEGUIDOR SOLAR

3.1 Microcontrolador

O microcontrolador é um circuito integrado programável com características de um computador, que é projectado para realizar tarefas específicas com linguagem de comando específica. O desenvolvimento destes dispositivos teve início na década dos anos 80, tendo a intel fabricado o microcontrolador 8041, e actualmente existem diversos tipos de microcontroladores, como por exemplo os da família Atmega da figura 15 na qual é baseado o Arduino.

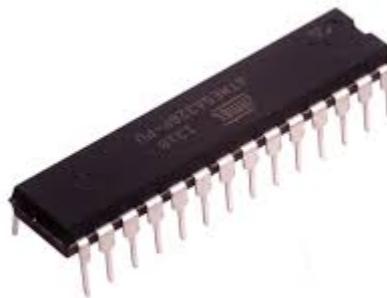


Fig. 15: Exemplo de um microcontrolador Atmega 328P

Fonte: DAAKYTECH, s.d

3.2 Motores eléctricos

Um motor eléctrico é uma máquina eléctrica rotativa que faz a conversão de energia eléctrica em energia mecânica cinética. Num motor, a simples presença e circulação de corrente contínua ou alternada faz com que haja a rotação do eixo do motor.

Os motores eléctricos quanto ao tipo de corrente de alimentação classificam-se em duas categorias: Motores de corrente contínua e motores de corrente alternada.

3.2.1 Motores de Passo

O motor de passo, ilustrado na figura 16 à esquerda, é dispositivo electromecânico que converte pulsos eléctricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é girado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos eléctricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste (BRITES; SANTOS, 2008).

A rotação do motor tem relação directa com esses pulsos, a velocidade do motor de passo é definida pela frequência com que esses pulsos são enviados e o número de voltas do eixo é definida pela quantidade de pulsos. O dispositivo que faz o controlo desses pulsos eléctricos que são enviados para o motor, é chamado driver (NEON MOTION, s.d).

3.2.2 Motor CC

O Motor CC, ilustrado na figura 16 à direita, é um motor eléctrico que é alimentado por uma CC, sendo que esta alimentação pode ser proveniente de uma bateria ou qualquer outra de fonte de alimentação CC. A sua velocidade pode ser controlada apenas variando a sua tensão, diferentemente de um motor eléctrico de corrente alternada cuja velocidade é controlada variando a frequência.



Fig. 16: Exemplo de motor de passo (à esquerda) e motor CC (à direita)

Fonte: AUTOR, 2023

3.2.3 Motores de indução

A figura 17 ilustra um motor de indução, também chamado de motor assíncrono. Este motor é alimentado por uma corrente alternada (CA) e é mais usada na indústria devido a sua simplicidade, traduzindo-se em baixo custo, máxima eficácia e manutenção mínima.



Fig. 17: Motor de indução

Fonte: SOUSA, s.d

3.2.4 Servo motor

O servo motor é um dispositivo electro-mecânico que diferentemente dos outros motores se desloca com precisão em resposta a um sinal electrónico. Este motor eléctrico permite o controlo exacto da velocidade, aceleração e posição angular. Sua característica distintiva está na capacidade de responder a comandos específicos, assegurando um posicionamento preciso e oferecendo controlo eficaz sobre seu movimento, sendo ideal para aplicações que requerem movimentação controlada e precisa de objectos (KALATEC AUTOMAÇÃO, s.d).

3.3 Sensores

Sensores são frequentemente transdutores que convertem uma forma de energia em outra. Portanto, Pode-se definir sensores então como: o elemento que percebe o estado de variáveis que monitora durante os processos, informando aos sistemas de controlo (MARTELLI, 2012).

3.4 Servidor NTP

O *Network Time Protocol* (NTP), ou simplesmente protocolo de tempo para redes, é um padrão que possibilita a sincronização de relógio de dispositivos em uma rede, envolvendo servidores, computadores, roteadores e outros equipamentos. Fora de estabelecer uma comunicação em si, o NTP estabelece algoritmos fundamentais para a consulta de servidores, calcular diferenças de tempo, estimar erros, seleccionar melhores referenciais e ajustar os relógios locais (NTP.BR, s.d). Operando na porta UDP 123, o NTP é especialmente projectado para lidar com os efeitos de latência variável em redes de dados orientadas por pacotes. Utilizando a escala de tempo UTC (Tempo Universal Coordenado), o NTP suporta a correcção dos segundos intercalares. Teoricamente, a versão NTPv4 pode assegurar uma precisão de 10 milissegundos na internet pública e atingir uma precisão de 200 microssegundos em uma rede local sob condições ideais, destacando-se como um sistema redundante por natureza (INFOCONTROL, s.d).

3.5 ThinkSpeak

É uma plataforma de *IoT* que permite a colecta, visualização e análise de dados em tempo real, colectados por diferentes sensores e/ou dispositivos. Além disso, a plataforma *ThingSpeak* permite com que os dados lidos possam ser exportados em formato Excel (CSV), permitindo assim uma análise posterior dos dados de acordo com o período e a variável de interesse.

Os principais recursos do *ThingSpeak* são:

- **Colecta de dados:** permite que os dados dos diferentes sensores e/ou dispositivos sejam enviados a canais específicos na plataforma;
- **Visualização:** depois do envio dos dados ao canal especificado, o *ThingSpeak* oferece ferramentas de visualização para a criação de gráficos, facilitando deste modo a visualização e compreensão das tendências de dados colectados dos sensores e/ou dispositivos;
- **Análise:** fora da visualizar dados, o *ThingSpeak* fornece capacidades indispensáveis a análise dos dados colectados. Assim, pode-se utilizar o *MATLAB* para criar algoritmos específicos e análises avançadas para melhor entender os padrões dos dados colectados;

- **Integração:** o *thingspeak* pode ser facilmente integrado com outras plataformas e serviços de *IoT*, como por exemplo *email*, *twitter* e *MATLAB Analytics*;
- **Alertas:** permite com que notificações sejam emitidas quando um determinado limiar é atingido pela leitura do sensor.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

4.1 Visão Geral do Seguidor Solar

O protótipo do seguidor solar desenvolvido neste trabalho é classificado da seguinte forma: **Quanto ao número de eixos:** 1 eixo; **Quanto ao mecanismo de rastreamento:** Horizontal; **Quanto ao tipo de controle:** Activo. Esta escolha é derivada do principal objectivo deste trabalho, que é a prototipagem de um seguidor solar simples e de baixo custo que visa otimizar a eficiência na geração de energia pelo módulo fotovoltaico, uma vez que sistemas fotovoltaicos de orientação fixa apresentam uma baixa eficiência na captação da energia solar.

Este sistema seguidor consiste no movimento do módulo fotovoltaico em um eixo, de leste a oeste, utilizando o microcontrolador ESP32 (figura 19) utilizando o servidor NTP. O ESP32 é responsável por controlar o movimento do motor e colectar dados de sensores que monitoram grandezas físicas, como corrente, tensão e potência. Essa abordagem visa ajustar dinamicamente a posição do módulo fotovoltaico de acordo com a hora e a posição do sol, otimizando assim a captação de energia solar.

A conectividade com o servidor NTP é fundamental, pois permite que o ESP32 obtenha e sincronize com precisão o tempo, garantindo um posicionamento preciso do módulo fotovoltaico no ângulo definido – programado. Além disso, o ESP32 monitora constantemente o desempenho do sistema ao longo do dia por meio de uma plataforma *IoT* de visualização e armazenamento de dados designados por *Thingspeak*. O diagrama de blocos da integração de todos os subsistemas e/ou componentes do protótipo desenvolvido é ilustrado na figura 18.

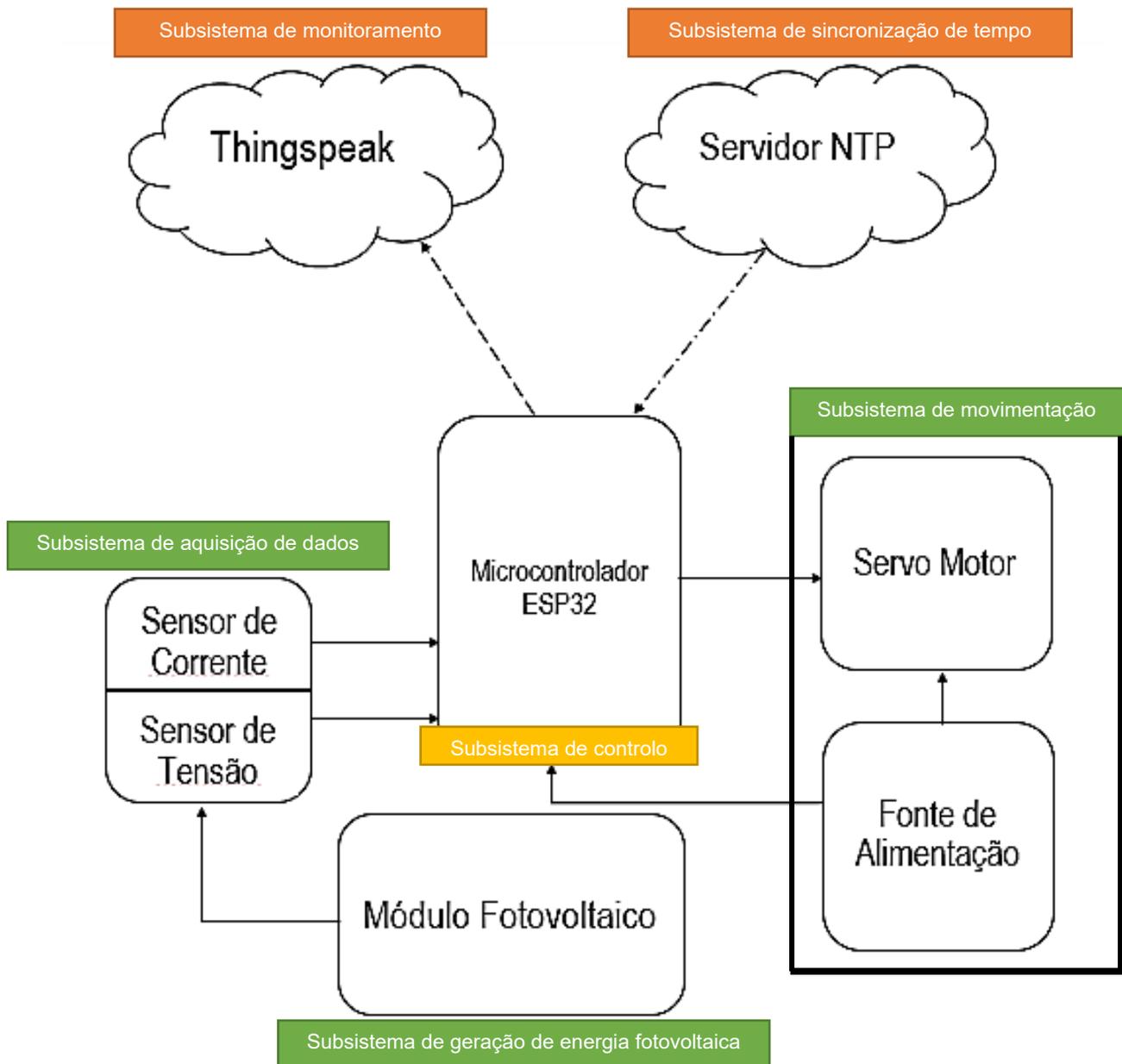


Fig. 18: Diagrama de blocos do sistema seguidor solar

Fonte: AUTOR, 2024

4.2 Seleção e descrição dos componentes utilizados

A Seleção de componentes a utilizar no projecto protótipo é fundamental para o sucesso do mesmo. Para tal, os componentes foram seleccionados orientados pelos requisitos de baixo custo e eficiência. Deste modo, serão apresentados os critérios de escolha e os motivos por detrás da sua utilização neste projecto.

O *ESP32* foi seleccionado como plataforma principal de controlo do sistema seguidor solar, devido à sua versatilidade, capacidades de comunicação *Wi-Fi* e suporte

robusto da comunidade. Optou-se por um pequeno módulo fotovoltaico comercial, um mini servo motor de baixo consumo e sensores (de corrente e tensão).

4.2.1 ESP32

O ESP32, ilustrado na Figura 19, é uma plataforma microcontrolador desenvolvido pela empresa chinesa *Espressif Systems* tendo sido lançado em 2016. Este microcontrolador é notável por suas características técnicas avançadas, conquistando um espaço significativo entre os programadores devido a sua versatilidade, velocidade de processamento e conectividade o tornando uma escolha popular em uma variedade de aplicações.

Este processador é muito robusto possuindo de 32 bits e dois núcleos de processamento que pode ser: *single* ou *dual-core* melhorando desta forma a capacidade de execução de tarefas simultâneas e eficiência em termos de consumo de energia. Além disso, possui um limitador de tensão de 5 V para protecção contra excessos de alimentação, juntamente com um circuito de relógio de tempo real (RTC-*Real Time Clock*) para manter a data e a hora actualizados em casos de quedas de energia.

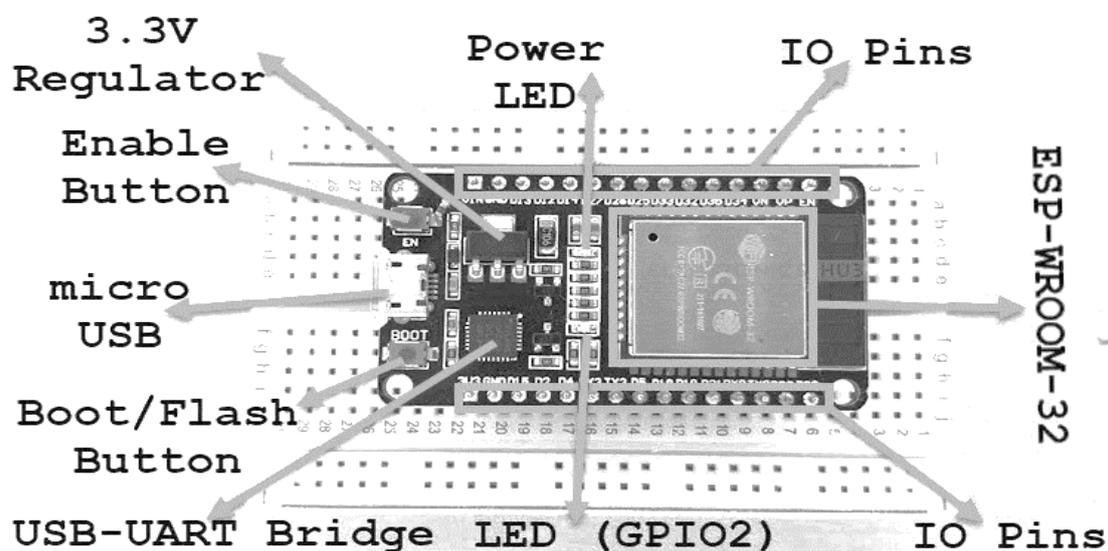


Fig. 19: Microcontrolador ESP32

Fonte: ELECTRONICSHUB, 2021

O *ESP32* foi escolhido como plataforma de controlo devido às suas características favoráveis, tais como:

- **Conectividade Wi-Fi:** Permite a comunicação sem fio para sincronização de tempo usando o *Network Time Protocol* (NTP) e envio de dados ao *Thingspeak*;
- **Capacidades de I/O:** Oferece uma variedade de pinos de entrada/saída, permitindo a fácil integração de sensores e controlo do motor.
- **Comunidade activa e suporte:** A comunidade activa e o amplo suporte da plataforma Arduino facilitam o desenvolvimento e a resolução de problemas.

As características e especificações são demonstradas na tabela 1.

Tabela 1: Características e especificações do *ESP32*

Característica	Especificação
Número de núcleos	2
Arquitectura	32 bits
Clock	240 MHz
RAM	512 Kb
Interfaces	<i>SPI, I2C, UART, I2S, CAN</i>
GPIOs	36
Flash	16 Mb
Criptografia	<i>AES, RSA, SHA e ECC</i>
Segurança	<i>WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS</i>
Protocolos de rede	<i>IPv4, IPv6, SSL, CP/UDP/HTTP/FTP/MQTT</i>
Linguagem de Programação	C/C++

Fonte: AUTOR, 2023

4.2.2 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é o principal elemento do seguidor solar, sendo responsável pela conversão da energia solar em electricidade.

O módulo fotovoltaico utilizado é um policristalino da marca **Solar shine** que apresenta as características nas condições padrões de teste (*STC*) são as seguintes:

Tabela 2:Características e especificações do módulo solar da *Solar Shine*

Característica	Especificação
Irradiação incidente (G)	1000 W/m ²
Máxima potência (PMP)	10 W
Tensão de máxima potência (VMP)	17,5 V
Corrente de máxima potência (IMP)	0,58 A
Tensão de circuito aberto (VCO)	21,5 V
Corrente de curto-circuito (ISC)	0,62 A
Tolerância na saída	± 5%
Número de células	36
Tamanho (comprimento e largura)	360mm x 160 mm

Fonte: AUTOR, 2023

A sua escolha baseia-se nos seguintes parâmetros:

Eficiência: foi escolhido um módulo de eficiência considerável de forma a garantir uma boa conversão de energia solar em eléctrica mesmo em baixa condição de sol.

O factor de forma (FF) do módulo fotovoltaico é determinado pela expressão da equação 2:

$$FF = \frac{10}{21,5 * 0,62} = 0,75$$

A eficiência do módulo fotovoltaico é obtida pela equação 3:

$$\eta = \frac{21,5 * 0,62 * 0,75}{1000 * 0,36 * 0,16} * 100\% = 17,35\%$$

Custo: buscou-se um módulo de baixo custo de maneira a alinhar com o objectivo principal do trabalho.



Fig. 20: Módulo fotovoltaico do protótipo

Fonte: AUTOR,2023

4.2.3 Motor de Movimentação

Uma vez tratar-se de um protótipo que não exige uma demanda alta de potência e alto torque para a movimentação e posicionamento do módulo fotovoltaico, optou-se pela utilização de um servo motor MG 995 (figura 21) de baixo custo.



Fig. 21: Servo Motor do protótipo

Fonte: AUTOR, 2023

A escolha deste tipo de motor foi devida as vantagens que o motor servo proporciona quanto à sua capacidade de precisão e resposta rápida aos comandos de controlo, facilidade de controlo e integração especialmente com sistemas usando microcontrolador como por exemplo de ESP32, Arduino, PIC, Raspberry PI. Por outro

lado, o alto torque que este motor MG 995 apresenta para a movimentação do sistema foi determinante para a escolha. A tabela 3 apresenta as características e especificações do servo motor MG995.

Tabela 3: Características e específicas do servo motor MG995

Característica	Especificação
Modelo	<i>TowerPro</i> MG995
Tensão de operação	4,8 -7,2 V
Modulação	Analógica
Velocidade de operação	0,17 seg/60graus (4,8 V sem carga); 0,13 seg/60graus (6,0 V sem carga);
Torque	13 kg.cm (4,8V) e 15 kg.cm (6,0V);
Faixa de rotação	180°
Dimensões	40 X 19 X 43 mm

Fonte: AUTOCOREBOTICA, s.d

4.3 Medição da potência

A medição da potência gerada pelo módulo fotovoltaico é feita por meio da medição de duas grandezas: tensão e corrente em que o produto das mesmas resulta no valor da potência eléctrica.

4.3.1 Medição de corrente

A medição de corrente é feita mediante a utilização do sensor ACS 712-5A. Este sensor de funcionamento a base do efeito *hall* e apresenta as seguintes especificações:

- Largura de banda de 80 kHz;
- Tensão de funcionamento de 5 V;
- Sensibilidade de saída de 66 mV/A;

- Sinal analógico de baixo ruído;
- Resistência interna do condutor de 1,2 mΩ;
- Erro total de saída de 1,5% em TA = 25 °C;
- Histerese magnética próxima de zero.

4.3.2 Medição de tensão

Para a medição de tensão é utilizado um circuito divisor de tensão, conforme é ilustrado na figura 22. No entanto, para que o ESP32 seja capaz de fazer a leitura, o divisor de tensão diminuirá a tensão de saída de maneira que esta seja no máximo 3,3 V que é a tensão de operação de uma entrada do microcontrolador.

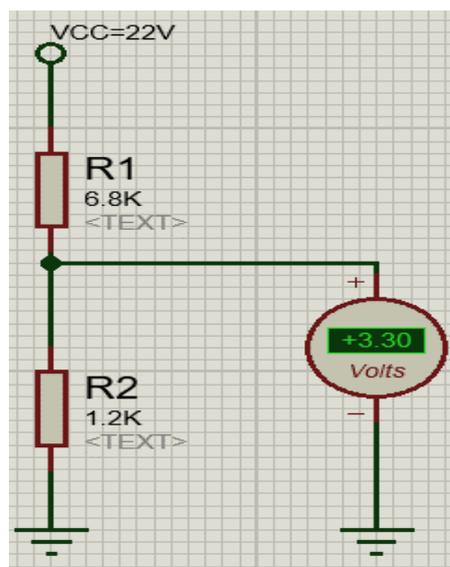


Fig. 22: Circuito divisor de tensão

Fonte: AUTOR, 2023

O valor do sinal de tensão de saída lido pelo microcontrolador é calculado pela expressão:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

V_{in} – Tensão de entrada (V);

V_{out} – Tensão de saída (V);

$R1$ e $R2$ – Resistência do circuito divisor de tensão (Ω)

Sendo V_{in} a tensão máxima de entrada que corresponde à tensão de circuito aberto (V_{oc}), tomando em consideração que o módulo fotovoltaico utilizado no projecto é de 22 V, e a tensão de saída (V_{out}) representa a tensão máxima que o *ESP32* recebe de 3,3 V. Assim sendo, os resistores $R1$, $R2$ devem ter valores 6,8 k Ω e 1,20 k Ω respectivamente.

4.4 Estrutura do seguidor solar

Primeiramente, projectou-se a estrutura do seguidor para o suporte do módulo fotovoltaico por meio do *software AutoCad*, conforme é ilustrado na figura 23.

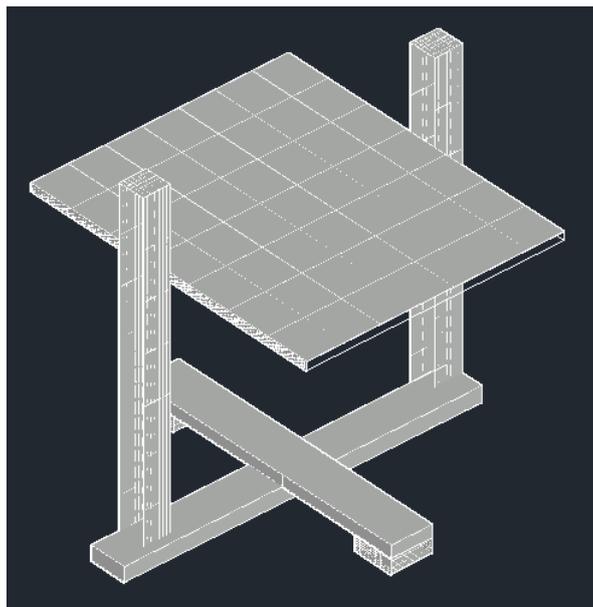


Fig. 23: Estrutura do seguidor solar feito em Autocad

Fonte: AUTOR, 2023

Esta estrutura é feita na base de madeira na qual foi utilizada uma variedade de ferramentas especializadas de modo a garantir a precisão e eficiência durante o processo. Entre as ferramentas utilizadas, destacam-se as serras circulares e de mesa, o berbequim, a rebarbadeira, as brocas e os instrumentos de medidas, que desempenharam papéis fundamentais na modelagem e ajuste da madeira.

Por se tratar de um protótipo, a escolha da madeira assenta-se em priorizar uma solução simples e de baixo custo. Além disso, a madeira foi escolhida porque é um material de fácil acesso no mercado nacional.

4.5 Configuração do software de colecta de dados

4.5.1 Configuração do *thingspeak*

O processo de configuração da plataforma de colecta, armazenamento e visualização de dados - *ThingSpeak*, foi feito envolvendo os seguintes passos:

1 Criação de uma Conta no *ThingSpeak*

- Acesso ao site do www.thingspeak.com;
- Depois do acesso a página do *thingspeak* é feita a criação da conta clicando em *sign up* como é ilustrado na figura 24.



Fig. 24: Página inicial

Fonte: AUTOR, 2023

2 Criação de um Canal (Channel)

A figura 25 ilustra a criação de um canal para a colecta de dados do protótipo seguidor solar. Para tal, depois do processo de criação da conta e acesso ao *website*, clica-se em *Channels* e depois em *My Channels*



Fig. 25: Criação de um canal

Fonte: AUTOR, 2023

3 Configuração dos detalhes do Canal

A configuração do canal é a parte mais importante da configuração, sendo esta responsável pelo carregamento e visualização dos parâmetros das variáveis criadas. A sequência de configuração é a seguinte:

- Preenchimento os detalhes do canal, como nome, descrição, campo de dados. Para este projecto os detalhes foram preenchidos conforme é ilustrado na figura;
- Configuração das configurações de privacidade conforme necessário;
- Guardar as configurações do canal, clicando o *Save Channel*.

4 Obtenção das Chaves da API

A Figura 26 ilustra o processo de obtenção das chaves da API, fundamentais para leitura (**READ API KEYS**) e escrita (**WRITE API KEYS**) de dados na plataforma. Como o objectivo é realizar a leitura os dados das variáveis, utilizou-se a chave de escrita – **WRITE API KEY**. O processo de obtenção foi o seguinte:

- No canal criado, clicar em "**API Keys**";
- Copiar a "**Write API Key**" (Chave de Gravação), que será utilizada para enviar dados ao canal.

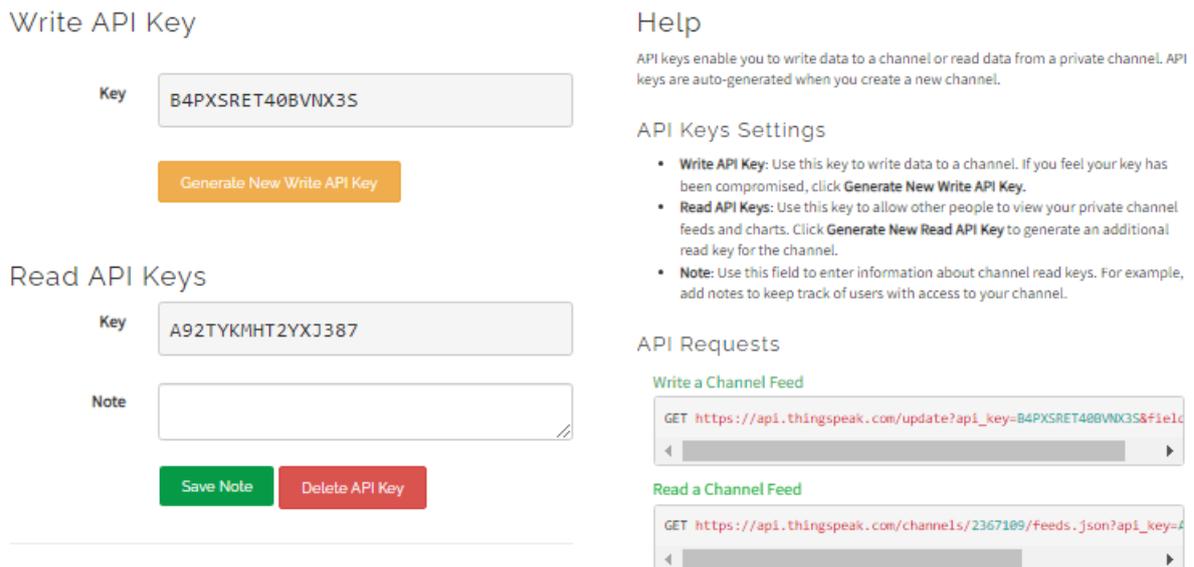


Fig. 26: Obtenção de chaves da API

Fonte: AUTOR, 2023

4.6 Princípio de funcionamento

O funcionamento do sistema seguidor de um eixo horizontal, proposto neste trabalho obedece a seguinte sequência:

1 Início: Inicialização do programa.

2 Conexão **Wi-Fi**:

- Tentativa de conexão com a rede **Wi-Fi**;
- Espera-se até a conexão ser estabelecida.

3. Conexão ao servidor **NTP**:

- Actualização da hora, minutos mês;
- Comparação do mês, hora e minutos recebida pelo **NTP**.

4. Leitura dos Sensores (figura 27): leitura dos valores de tensão e corrente.

5. Envio e armazenamento dos dados lidos pelos sensores na nuvem **ThingSpeak**.

6. Posicionamento do módulo fotovoltaico (figura 28) pelo servo motor.

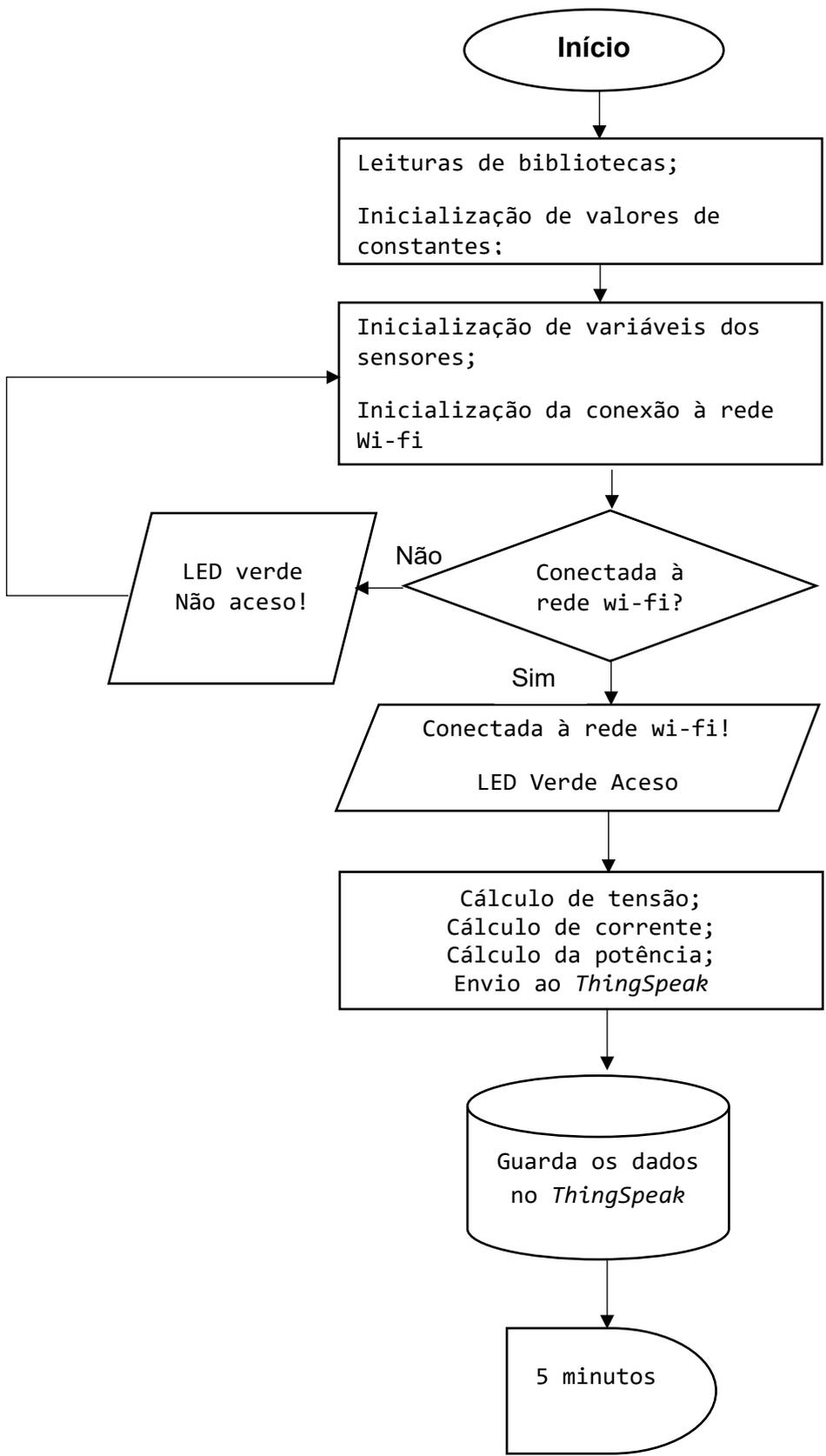


Fig. 27: Fluxograma de aquisição de dados do sistema seguidor solar

Fonte: AUTOR, 2024

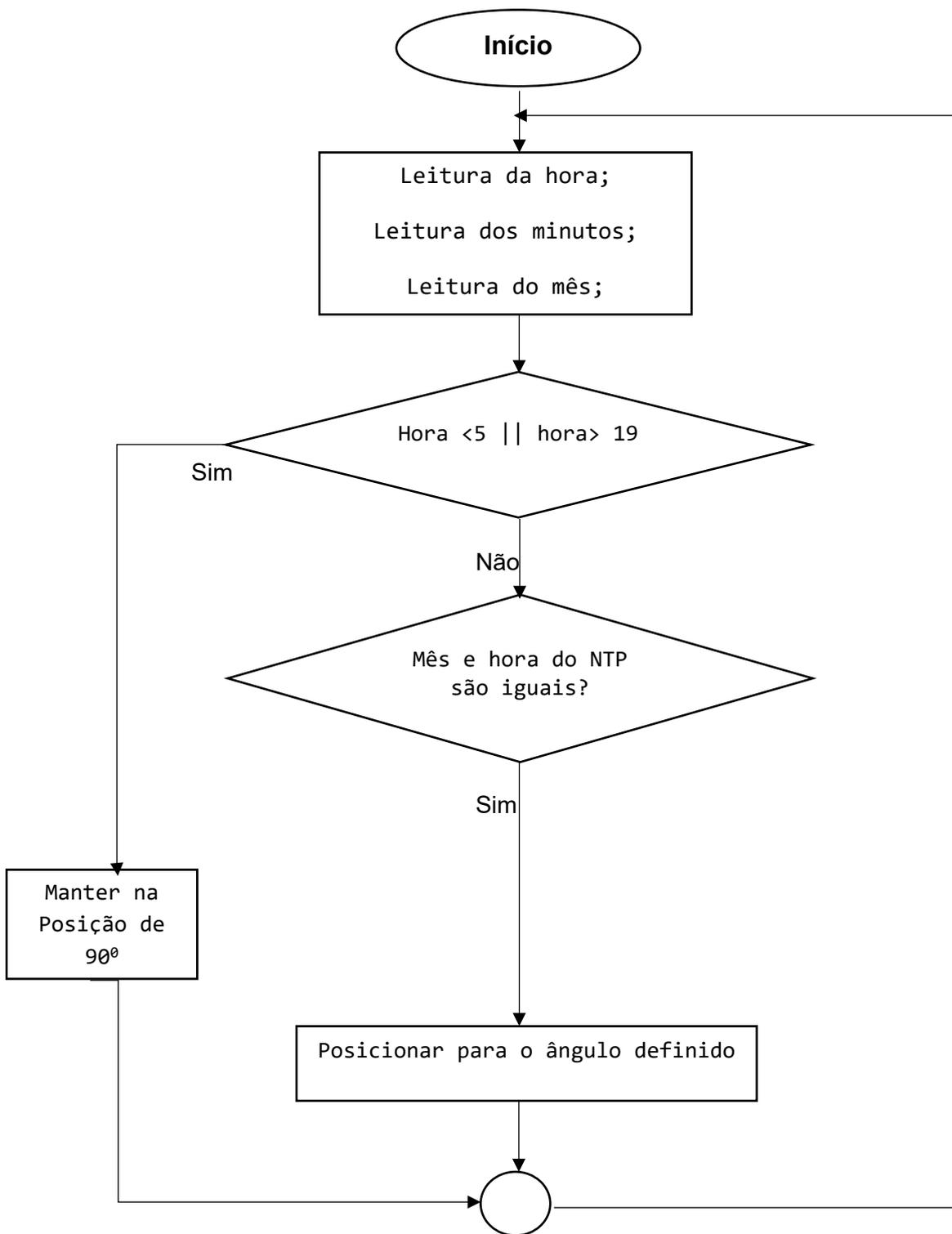


Fig. 28: Fluxograma do funcionamento do sistema seguidor solar

Fonte: AUTOR, 2024

4.7 Testes do Protótipo e Resultados

Após a etapa de escolha dos materiais/componentes electrónicos do protótipo seguiu-se ao processo de calibração do protótipo. A calibração começou com o ajuste da posição do módulo fotovoltaico ao eixo do motor, onde testes iterativos foram realizados de forma a determinar a posição inicial do funcionamento alinhado com o sol. Em seguida, os sensores foram calibrados de forma a garantir medições precisas. Além disso, a conectividade *Wi-Fi* foi configurada para permitir a comunicação com a plataforma *IoT – ThingSpeak*, com testes de estabilidade da conexão.

Por fim, o relógio interno do protótipo foi sincronizado com um servidor NTP de modo a assegurar a obtenção de marcação de tempo, com verificações periódicas da sincronização conforme ilustra a figura 29.

```
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";  
const long  gmtOffset_sec = 2 * 3600; // fuso horario Maputo  
const int  daylightOffset_sec = 0;    // Sem ajuste para horário de verão  
  
WiFiUDP ntpUDP;  
NTPClient timeClient(ntpUDP, ntpServer, gmtOffset_sec, daylightOffset_sec);
```

Fig. 29: Calibração do relógio interno do *ESP32*

Fonte: AUTOR, 2024

4.7.1 Resultados Obtidos

O protótipo de seguidor solar foi ensaiado em um ambiente externo com exposição solar directa, com mínimo de sombreamento e com intervalos de nuvens. Durante o funcionamento foram registados parâmetros eléctricos (tensão, corrente e potência) no sistema de monitoramento *ThingSpeak* conforme é mostrado no anexo 1. Estes dados foram posteriormente exportados para uma planilha excel no formato CSV para um melhor acompanhamento da sua curva durante o processo de medição de seus parâmetros conforme é ilustrado pela figura 30 da tensão em função do tempo.

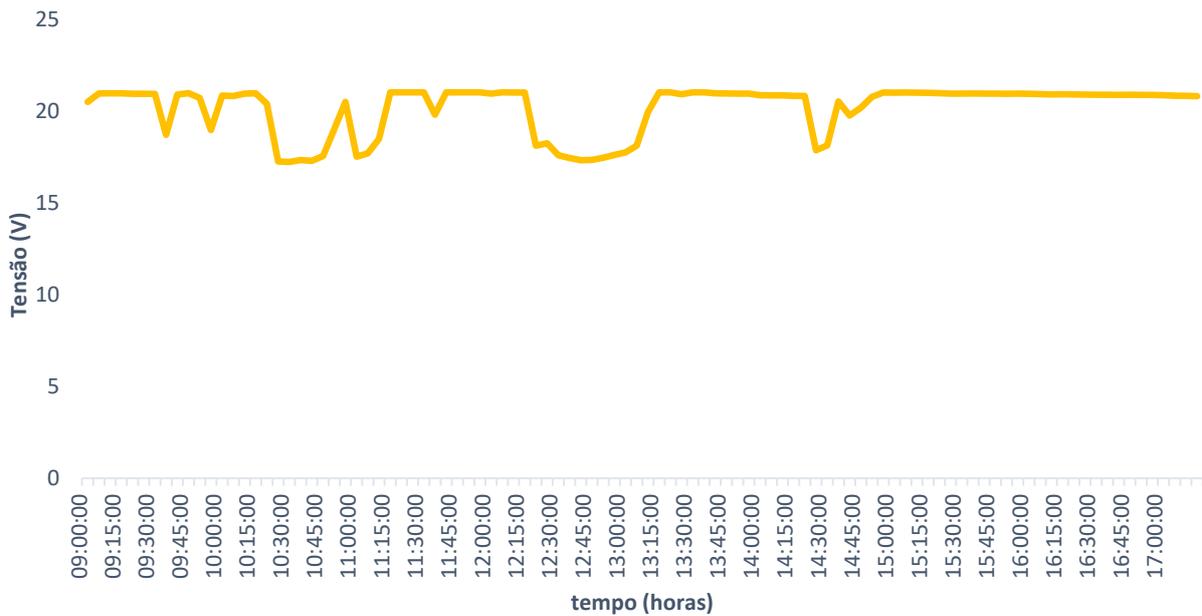


Fig. 30: Variação da tensão do seguidor ao longo do tempo

Fonte: AUTOR, 2024

Durante a medição dos parâmetros eléctricos, verificou-se que a corrente consumida pela carga (de motor CC) ligada ao módulo fotovoltaico não alterou. Portanto, observa-se que a curva da potência do sistema seguidor, ilustrado na figura 31 tem um mesmo comportamento ao longo do tempo quanto da tensão ilustrada na figura 30.

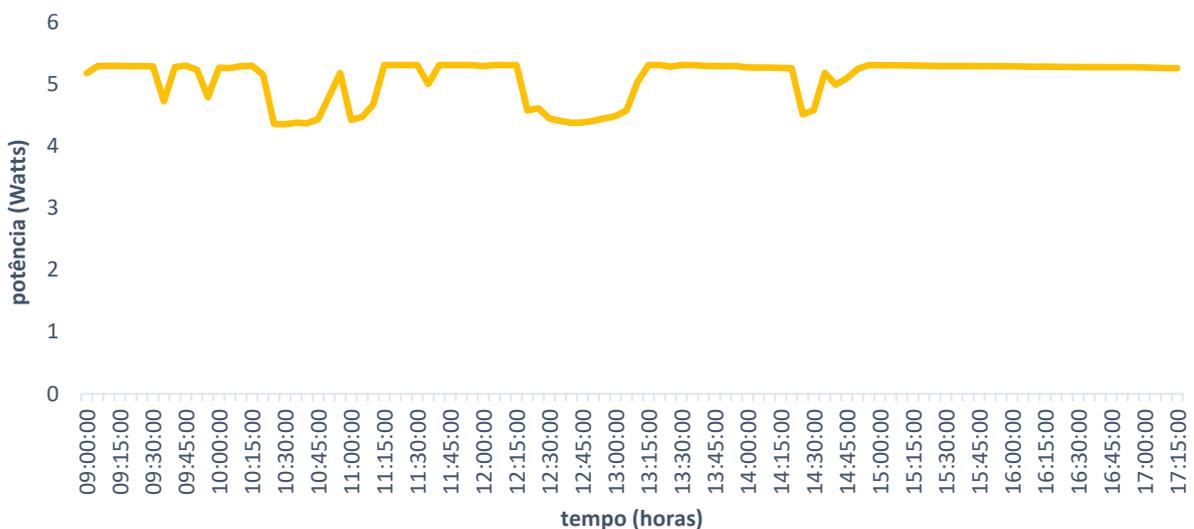


Fig. 31: Variação da potência do seguidor ao longo do tempo

Fonte: AUTOR, 2024

Noutro dia foram efectuadas medições do sistema sem a parte do seguimento solar. As curvas de tensão (figura 32) e potência (figura 33) obtidas, tendo em conta a carga de motor CC (consome a mesma corrente ao longo do tempo de funcionamento) no sistema foram as seguintes.

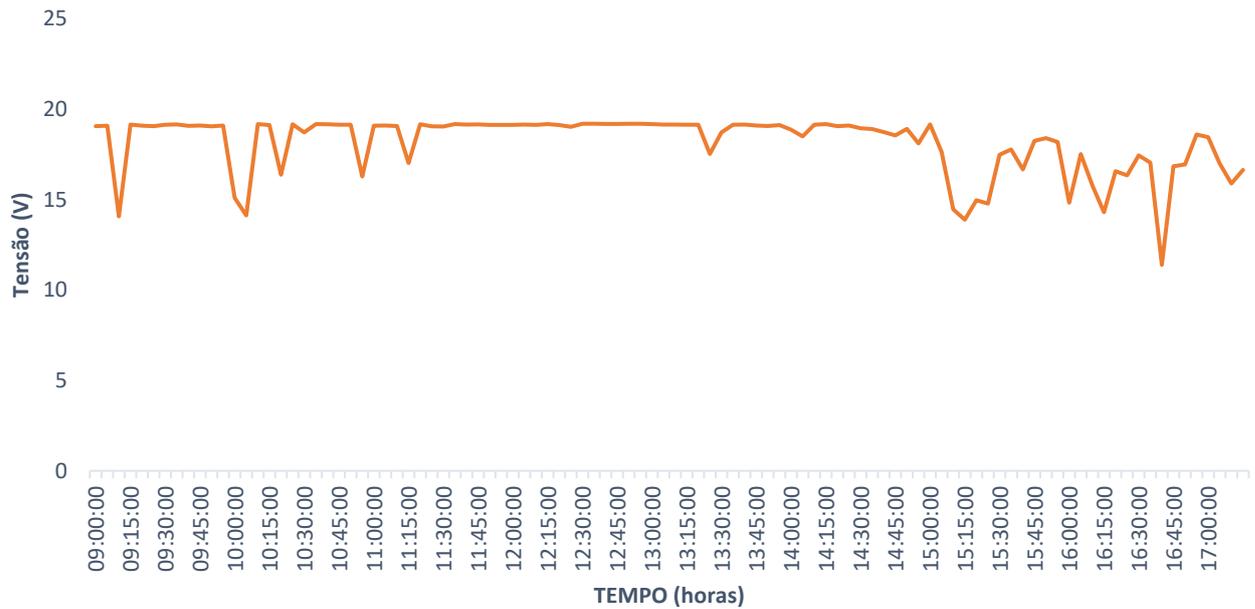


Fig. 32: Variação da tensão do sistema fixo ao longo do tempo

Fonte: AUTOR, 2024

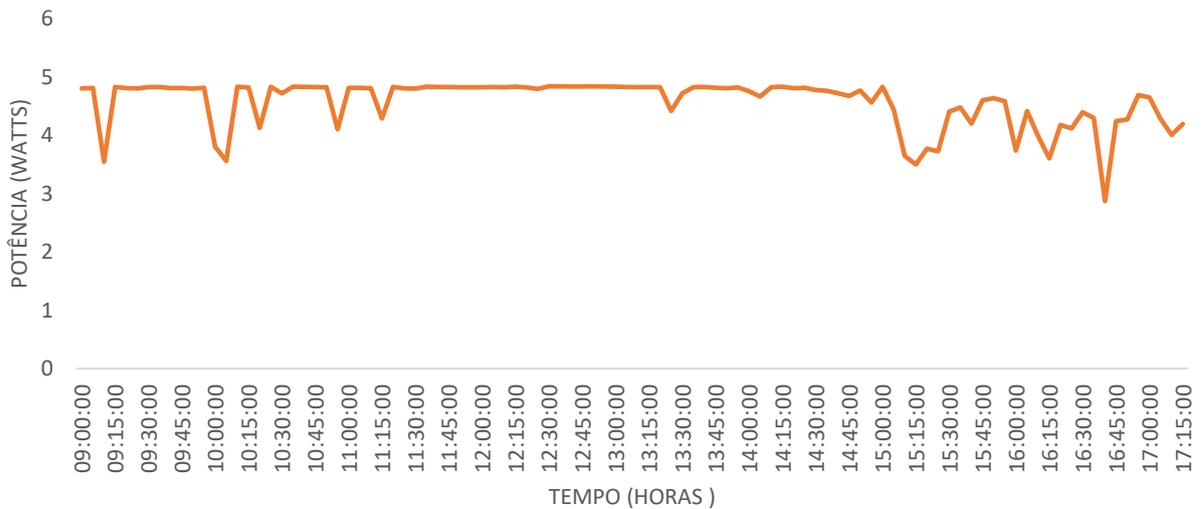


Fig. 33: Variação da potência do sistema fixo ao longo do tempo

Fonte: AUTOR, 2024

4.8 Comparação da eficiência do sistema seguidor e sistema fixo

A eficiência do sistema seguidor solar foi avaliada comparativamente com um sistema fixo sob condições dos dados adquiridos anteriormente no ponto 4.7.1. A análise focou na variação da produção de energia ao longo do dia no período compreendido entre as 9 e 17 horas e 15 minutos.

Esta eficiência pode ser calculada pela equação:

$$Ef (\%) = \frac{|PSS - PF|}{PF} * 100\% \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

PSS – Potência do sistema seguidor solar (W);

PF – Potência do sistema solar na posição fixa (W);

Ef (%) – eficiência percentual do sistema;

Observando a curva dos dois sistemas na figura 34, é possível verificar que a potência gerada pelo sistema seguidor solar está acima da curva da potência gerada pelo sistema fixo. No entanto, verifica-se pequenas oscilações ou quedas de potência em

determinadas horas do dia do experimento. Isso foi devido a factores temporários como por exemplo a passagem de nuvens, sombreamento e outros factores momentâneos.

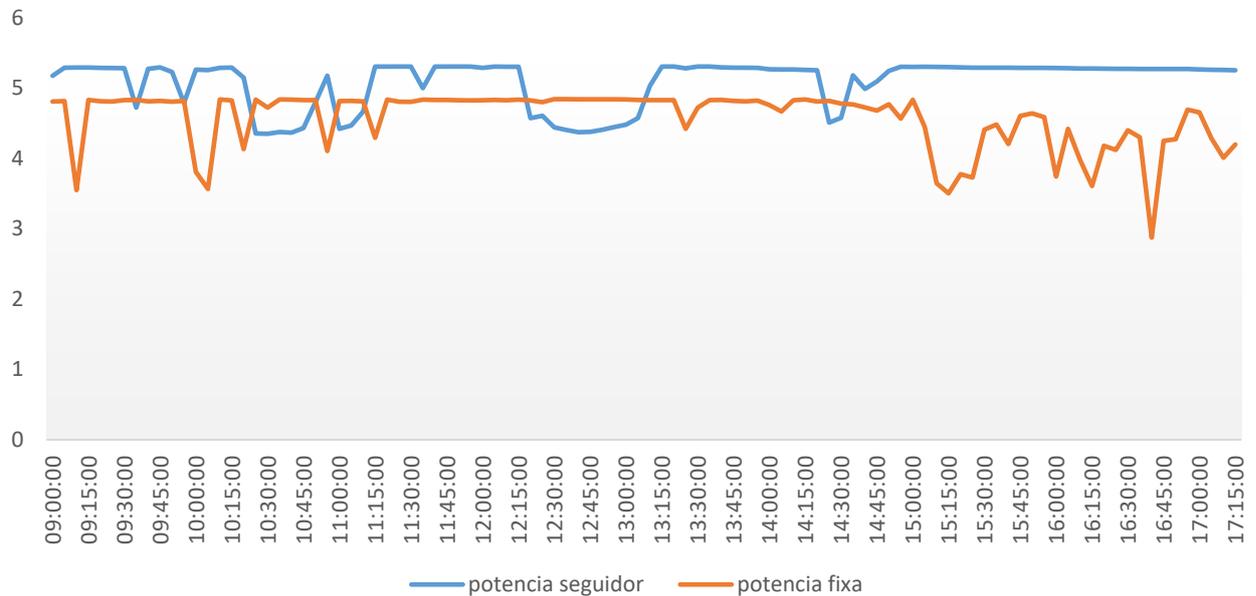


Fig. 34: Variação da potência do sistema seguidor *versus* sistema fixo

Fonte: AUTOR, 2024

Assim, a eficiência conseguida por este protótipo seguidor usando a equação 7, foi de 8,09% em relação ao sistema fixo durante o seu funcionamento das 9 horas as 17 horas e 15 minutos.

4.9 Custo do protótipo

Os custos do protótipo seguidor solar desenvolvido neste trabalho foram baseados nos componentes electrónicos utilizados e nos componentes utilizados na construção da estrutura do seguidor. Estes custos são baseados nos preços de aquisição dos materiais conforme mostra a tabela 4.

Tabela 4: Custo dos componentes para a montagem do protótipo seguidor solar

Materiais	Quantidade	Preço (MT)
Módulo fotovoltaico	1	1000,00
Servo motor MG995	1	1350,00
Sensor de corrente	1	450, 00
Resistores	2	40,00
Microcontrolador <i>ESP32</i>	1	1850,00
Estrutura do seguidor solar	1	1000,00
Total	7	5690,00

Fonte: AUTOR, 2023

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O trabalho propôs-se a desenvolver um protótipo de um sistema seguidor solar simples de baixo custo utilizando o microcontrolador ESP32, tendo como foco maximizar a geração de energia fotovoltaica. No entanto, este objectivo foi alcançado de forma satisfatória mediante o seguidor de um eixo horizontal.

Relativamente aos objectivos específicos, foi possível identificar diversos tipos de seguidores em que foi possível escolher a tipologia adequada ao trabalho. Foi possível realizar a aquisição de dados de parâmetros eléctricos (tensão, corrente e potência) do sistema seguidor solar de forma satisfatória por meio do envio dos dados a plataforma *ThingSpeak*. Desta feita, foi possível colectar, armazenar e visualizar esses dados e foram utilizados posteriormente para comparação da eficiência do sistema seguidor solar com o sistema fotovoltaico sem o mecanismo de seguimento.

Os componentes seleccionados e utilizados para a montagem do projecto do protótipo demonstraram um bom desempenho durante o seu funcionamento, apesar de algumas vezes o sistema ter falhado o envio de dados a plataforma *ThingSpeak* e ter-se verificado o superaquecimento do microcontrolador ESP32. No geral, os componentes mostraram-se confiáveis e o protótipo demonstrou capacidade de movimentação na direcção leste-oeste.

No que diz respeito a comparação do sistema seguidor e fixo, o protótipo construído conseguiu uma eficiência de 8,09% em relação ao sistema sem mecanismo de seguimento durante o período analisado. No entanto, para uma melhor análise de desempenho entre os dois sistemas é fundamental colocá-los simultaneamente em funcionamento, visto que os dados analisados foram obtidos em dias diferentes em que cada um tinha a sua irradiação característica.

Recomendações:

Considerando que o protótipo foi implementado de forma satisfatória algumas análises e melhorias podem ser incorporadas como por exemplo:

- Implementação de sensor de chuva em casos de condições climáticas adversas de modo que o módulo(s) fotovoltaico(s) seja(m) colocado na posição de segurança;
- Implementar o sistema com todos os componentes que compõem o sistema fotovoltaico incluindo a colocação de um LCD para a visualização dos dados localmente;
- Realizar a medição e a análise dos parâmetros eléctricos durante diferentes estações do ano de modo a observar em qual ano há mais incremento da potência;
- Implementar um sistema de resfriamento no local da instalação do microcontrolador de modo a baixar a sua temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Dennys Lopes. **Geração Solar Fotovoltaica**: conceitos básicos. 2016. Disponível em: <https://www.infolivros.org/pdfview/409-geracao-solar-fotovoltaica-dennys-lopes-alves/>

ARAÚJO, Leonardo Andrade. **Projeto de um seguidor para coberturas, destinado a painéis solares**. Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho, Guimarães, Dezembro de 2012.

DAAKYTECH. **ATMEGA328P Microcontroller IC (DIP-28)**. Disponível em: <https://www.daakyetech.com/store/ic-atmega328p/>

AUTOCOREBOTICA. **servo motor topwer mg995**. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/servo-motor-towerpro-mg995>

BARBOSA, Danielle Alves. **Análise Energética E Financeira De Um Dispositivo De Seguimento Solar Para A Geração Fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/20643/1/2016_dis_dabarbosa.pdf

BRAGA, Renato Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e aplicações**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Novembro de 2008

BRITES, FELIPE; SANTOS, VINICIUS. **Motor de Passo**. Universidade Federal Fluminense. Niterói – RJ Julho/2008. Disponível em: <https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de seguimento em produção de energia fotovoltaica**. Tese de Mestrado. Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de engenharia Universidade do Porto, Porto, 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/72632/1/000157958.pdf>

CRESESB – Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Energia solar. Princípios e aplicações.** S.d. Disponível em: <https://www.infolivros.org/pdfview/402-energia-solar-principios-e-aplicacoes-centro-de-referencia-para-energias-solar-e-eolica-sergio-de-sbrito/>

ELECTRONICSHUB. **Getting Started with ESP32 | Introduction to ESP32.** 2021. Disponível em: <https://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2021/02/ESP32-DevKit-Board-Layout.jpg>

ENERGÊS. **Como Minimizar O Efeito Da Sombra.** 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/como-minimizar-o-efeito-da-sombra/>

FADIGAS, Eliane. A. F. Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico-econômica.** GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo. 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf

INFOCONTROL. **Sincronismo Horário NTP – Network Time Protocol.** Disponível em: <https://www.infocontrol.pt/artigos-tecnicos/sincronismo-horario-ntp/>

KALATEC AUTOMAÇÃO. **O que é um servo motor, como funciona e quais as vantagens?**.s.d. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/o-que-e-servo-motor/>

LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica 1.** 5. ed. São Paulo. Editora Atlas. 2003.

LIRA, José Rômulo Vieira. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15490/1/JoseRVL_DISSERT.pdf

MARTELLI, Rafael. **Automação industrial.** Indaial. Grupo Uniasselvi. 2012.

MEDEIROS, Isaac Péricles Maia de. **Sistema de Controle Rastreável Para Painéis Fotovoltaicos: Protótipo.** 2016. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível

em:https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21683/1/IsaacPericlesMaiaDeMeiros_DISSERT.pdf

MELLO, Gabriel Osório Linhares de. **Estudo Da Influência Da Temperatura Na Produção De Energia Gerada Por Placas Fotovoltaicas**. Dissertação (pós-graduação em ciências de materiais) Universidade federal do mato grosso do sul, campo grande, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/bitstream/123456789/4264/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Final%20Revisada.pdf>

MUSA, Abdulwaheed; ALOZIE, Emmanuel; SULEIMAN, Suleiman. A.; OJO, J.A.; IMOIZE, A. L. **A Review of Time-Based Solar Photovoltaic Tracking Systems**. Information 2023. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/info14040211>

NEON MOTION. **Motor de passo neon**. Disponível em: <https://www.neomotion.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Cat%C3%A1logo-Datasheet-dos-motores-de-passo-R01.pdf>.

NTP.BR. **O NTP**. Disponível em: <https://ntp.br/conteudo/ntp/#seguranca>

OFERTA SOLAR. **Eficiência de painéis solares: Tudo que você precisa saber**. 4 de dezembro de 2022. Disponível em: <https://ofertasolar.com.br/eficiencia-de-paineis-solares/>

OLIVEIRA, Carlos António Alves de. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10013.pdf>

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco António. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB. 2014.

REIS, José. **Em que consiste um sistema seguidor solar fotovoltaico**. Portal Energia. Dez 19, 2016, 22:35. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>

SOARES, Rivanildo Alves. **Desenvolvimento De Um Seguidor Solar De Baixo Custo Para Sistemas Fotovoltaicos De Pequeno Porte**. 2021. Monografia

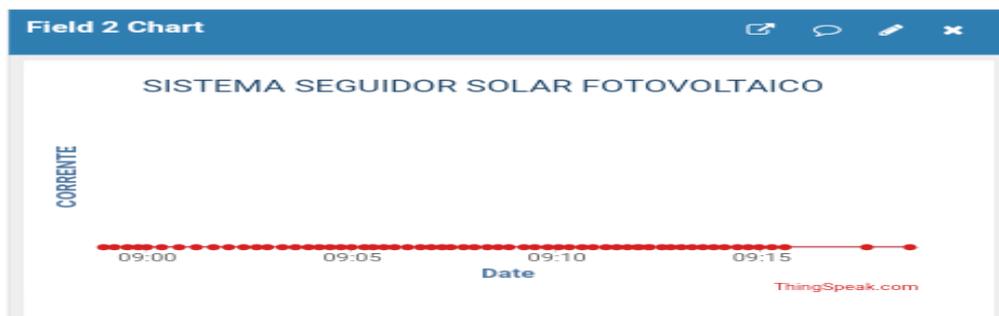
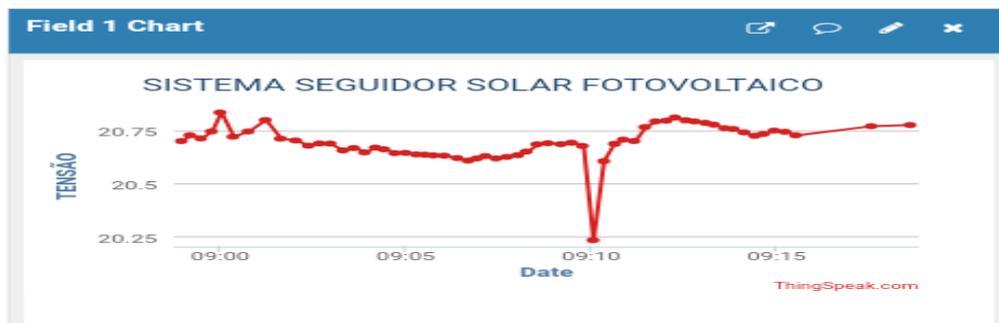
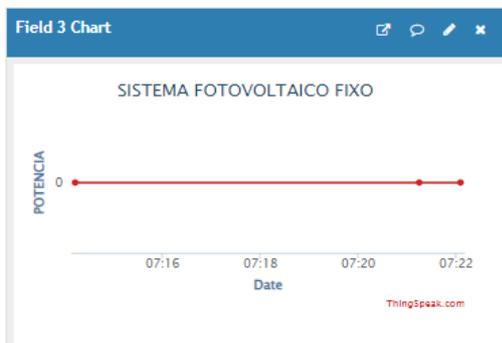
(Engenharia Eléctrica) – Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/21053>

SOUSA, José. **Manual de acionamentos e comandos eléctricos**. Escola Técnica Estadual Monteiro Lobato.

VIERA, Romênia Gurgel. **Análise do Desempenho Entre um Painel Solar Estático e com rastreamento no Município de Mossoró-RN**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Universidade Federal Rural do Semiárido-UFERSA, Mossoró. 2014. Disponível em: https://ppgee.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/61/2014/09/Disserta%C3%A7%C3%A3o_vers%C3%A3o-final-Rom%C3%AAnia-Gurgel-Vieira.pdf

ANEXOS

Anexo 1: Dados De Colectados No *thingspeak*



1 Chart



SISTEMA SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO

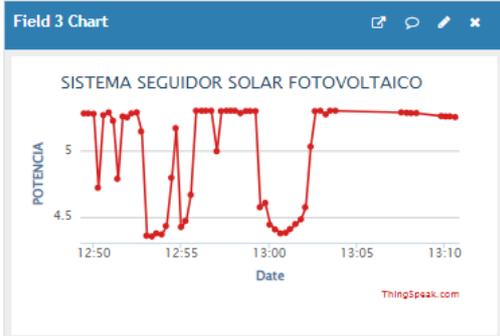
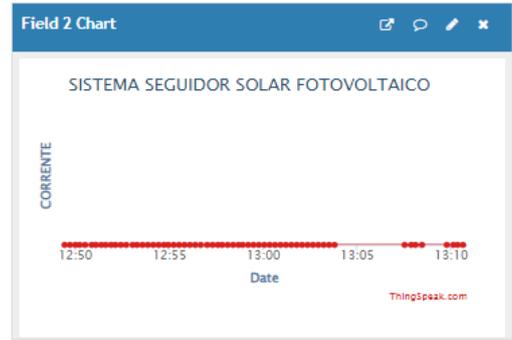
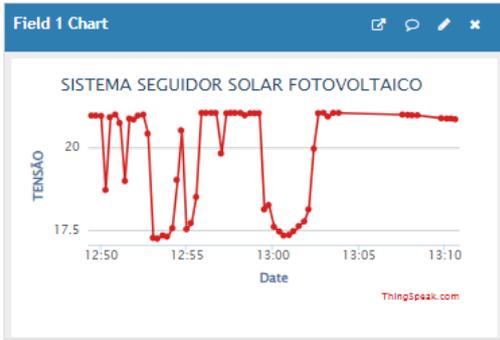


Field 3 Chart



SISTEMA SEGUIDOR SOLAR FOTOVOLTAICO





Anexo 2: Estrutura Do Seguidor Solar



Anexo 3: Dados Do Suncal Usados No Código Para O Experimento Do Protótipo (Mês De Março)

Time	Azimut	Altitude	Shadow length (object height: 1m)
06:00	89.70°	0.99°	57.97m
06:15	88.05°	4.14°	13.81m
06:30	86.39°	7.44°	7.66m
06:45	84.71°	10.76°	5.26m
07:00	82.98°	14.10°	3.98m
07:15	81.21°	17.42°	3.19m
07:30	79.37°	20.74°	2.64m
07:45	77.44°	24.03°	2.24m
08:00	75.42°	27.31°	1.94m
08:15	73.27°	30.55°	1.69m
08:30	70.98°	33.75°	1.50m
08:45	68.50°	36.91°	1.33m
09:00	65.82°	40.02°	1.19m
09:15	62.88°	43.05°	1.07m
09:30	59.64°	46.01°	0.97m
09:45	56.04°	48.86°	0.87m
10:00	52.02°	51.59°	0.79m
10:15	47.49°	54.16°	0.72m
10:30	42.39°	56.54°	0.66m
10:45	36.65°	58.68°	0.61m
11:00	30.20°	60.54°	0.56m
11:15	23.05°	62.05°	0.53m
11:30	15.25°	63.15°	0.51m
11:45	6.98°	63.80°	0.49m
12:00	358.46°	63.95°	0.49m
12:15	350.00°	63.61°	0.50m
12:30	341.89°	62.79°	0.51m
12:45	334.32°	61.52°	0.54m
13:00	327.43°	59.88°	0.58m
13:15	321.25°	57.90°	0.63m
13:30	315.76°	55.67°	0.68m
13:45	310.88°	53.21°	0.75m
14:00	306.56°	50.57°	0.82m
14:15	302.70°	47.80°	0.91m
14:30	299.25°	44.90°	1.00m
14:45	296.13°	41.91°	1.11m
15:00	293.29°	38.85°	1.24m
15:15	290.70°	35.72°	1.39m
15:30	288.30°	32.54°	1.57m
15:45	286.06°	29.32°	1.78m
16:00	283.97°	26.07°	2.04m
16:15	281.99°	22.78°	2.38m
16:30	280.10°	19.48°	2.83m
16:45	278.29°	16.16°	3.45m
17:00	276.54°	12.82°	4.39m
17:15	274.84°	9.49°	5.98m

17:30	273.17°	6.17°	9.26m
17:45	271.53°	2.90°	19.74m
18:00	269.89°	-0.12°	n/a

Anexo 4: Dados Do Sistema Fotovoltaico Fixo

HORA	Tensão (V)	Potência (w)
09:00:00	19,05713	4,807161
09:05:00	19,08204	4,813445
09:10:00	14,06699	3,548398
09:15:00	19,14958	4,830482
09:20:00	19,07969	4,812852
09:25:00	19,05536	4,806715
09:30:00	19,13997	4,828057
09:35:00	19,15013	4,83062
09:40:00	19,07205	4,810925
09:45:00	19,0905	4,815579
09:50:00	19,04703	4,804613
09:55:00	19,09451	4,81659
10:00:00	15,0904	3,806553
10:05:00	14,12414	3,562814
10:10:00	19,17266	4,836303
10:15:00	19,11736	4,822354
10:20:00	16,37635	4,130934
10:25:00	19,16287	4,833834
10:30:00	18,71566	4,721025
10:35:00	19,17307	4,836407
10:40:00	19,16381	4,834071
10:45:00	19,13907	4,82783
10:50:00	19,13659	4,827205
10:55:00	16,27367	4,105033
11:00:00	19,08776	4,814887
11:05:00	19,0929	4,816184
11:10:00	19,06796	4,809893
11:15:00	17,0147	4,291958
11:20:00	19,16368	4,834038
11:25:00	19,04728	4,804676
11:30:00	19,04172	4,803274
11:35:00	19,17094	4,83587
11:40:00	19,14764	4,829992
11:45:00	19,15296	4,831334
11:50:00	19,12618	4,824579
11:55:00	19,12501	4,824284

12:00:00	19,13198	4,826042
12:05:00	19,14604	4,829589
12:10:00	19,13143	4,825903
12:15:00	19,168	4,835128
12:20:00	19,12257	4,823668
12:25:00	19,01814	4,797326
12:30:00	19,1924	4,841283
12:35:00	19,19296	4,841424
12:40:00	19,1807	4,838332
12:45:00	19,18408	4,839184
12:50:00	19,18844	4,840284
12:55:00	19,18819	4,840221
13:00:00	19,1743	4,836717
13:05:00	19,14624	4,829639
13:10:00	19,14183	4,828527
13:15:00	19,13876	4,827752
13:20:00	19,14035	4,828153
13:25:00	17,52357	4,420321
13:30:00	18,71518	4,720904
13:35:00	19,13746	4,827424
13:40:00	19,14646	4,829695
13:45:00	19,09254	4,816093
13:50:00	19,06422	4,808949
13:55:00	19,117	4,822263
14:00:00	18,86461	4,758598
14:05:00	18,49644	4,665727
14:10:00	19,13437	4,826645
14:15:00	19,17205	4,83615
14:20:00	19,0601	4,80791
14:25:00	19,09651	4,817095
14:30:00	18,94304	4,778382
14:35:00	18,8943	4,766087
14:40:00	18,7292	4,724441
14:45:00	18,54593	4,678211
14:50:00	18,90758	4,769437
14:55:00	18,09954	4,565609
15:00:00	19,15797	4,832598
15:05:00	17,62722	4,446466
15:10:00	14,45561	3,646428
15:15:00	13,88227	3,501803
15:20:00	14,96414	3,774704
15:25:00	14,77426	3,726807
15:30:00	17,47611	4,408349
15:35:00	17,76598	4,481468

15:40:00	16,66426	4,20356
15:45:00	18,24457	4,602193
15:50:00	18,39411	4,639914
15:55:00	18,18097	4,58615
16:00:00	14,82585	3,739821
16:05:00	17,51574	4,418345
16:10:00	15,78455	3,981653
16:15:00	14,29765	3,606582
16:20:00	16,5707	4,179959
16:25:00	16,33567	4,120673
16:30:00	17,43857	4,398879
16:35:00	17,04458	4,299495
16:40:00	11,38906	2,87289
16:45:00	16,84238	4,24849
16:50:00	16,93444	4,271712
16:55:00	18,59687	4,69106
17:00:00	18,44954	4,653896
17:05:00	16,98562	4,284623
17:10:00	15,89153	4,008638
17:15:00	16,63457	4,19607
TOTAL	1479,39943	373,1785

Anexo 5: Dados Do Sistema Seguidor Fotovoltaico

Horas	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
09:00:00	20,50715	0,25225	5,17296
09:05:00	20,96779	0,25225	5,28915
09:10:00	20,97748	0,25225	5,2916
09:15:00	20,97659	0,25225	5,29137
09:20:00	20,95525	0,25225	5,28599
09:25:00	20,95158	0,25225	5,28507
09:30:00	20,94145	0,25225	5,28251
09:35:00	18,71323	0,25225	4,72044
09:40:00	20,9057	0,25225	5,27349
09:45:00	20,98646	0,25225	5,29386
09:50:00	20,72534	0,25225	5,228
09:55:00	18,9786	0,25225	4,78738
10:00:00	20,85758	0,25225	5,26135
10:05:00	20,83268	0,25225	5,25507
10:10:00	20,95622	0,25225	5,28623
10:15:00	20,97806	0,25225	5,29174
10:20:00	20,40751	0,25225	5,14782
10:25:00	17,26103	0,25225	4,35412

10:30:00	17,24063	0,25225	4,34897
10:35:00	17,33918	0,25225	4,37383
10:40:00	17,30092	0,25225	4,36418
10:45:00	17,56222	0,25225	4,43009
10:50:00	19,01464	0,25225	4,79647
10:55:00	20,51184	0,25225	5,17414
11:00:00	17,52366	0,25225	4,42037
11:05:00	17,70945	0,25225	4,46723
11:10:00	18,49705	0,25225	4,66591
11:15:00	21,03127	0,25225	5,30517
11:20:00	21,03002	0,25225	5,30485
11:25:00	21,03155	0,25225	5,30524
11:30:00	21,03144	0,25225	5,30521
11:35:00	19,81558	0,25225	4,99851
11:40:00	21,02746	0,25225	5,30421
11:45:00	21,03148	0,25225	5,30522
11:50:00	21,03155	0,25225	5,30524
11:55:00	21,03122	0,25225	5,30515
12:00:00	20,9587	0,25225	5,28686
12:05:00	21,02739	0,25225	5,30419
12:10:00	21,02392	0,25225	5,30331
12:15:00	21,01992	0,25225	5,3023
12:20:00	18,12535	0,25225	4,57214
12:25:00	18,25776	0,25225	4,60555
12:30:00	17,60117	0,25225	4,43992
12:35:00	17,45311	0,25225	4,40257
12:40:00	17,33514	0,25225	4,37281
12:45:00	17,35294	0,25225	4,3773
12:50:00	17,46411	0,25225	4,40535
12:55:00	17,61738	0,25225	4,44401
13:00:00	17,75786	0,25225	4,47944
13:05:00	18,12474	0,25225	4,57199
13:10:00	19,95275	0,25225	5,03311
13:15:00	21,02728	0,25225	5,30416
13:20:00	21,03154	0,25225	5,30524
13:25:00	20,92572	0,25225	5,27854
13:30:00	21,03155	0,25225	5,30524
13:35:00	21,03155	0,25225	5,30524
13:40:00	20,98029	0,25225	5,29231
13:45:00	20,968	0,25225	5,28921
13:50:00	20,96152	0,25225	5,28757
13:55:00	20,96023	0,25225	5,28725
14:00:00	20,87145	0,25225	5,26485
14:05:00	20,86619	0,25225	5,26353

14:10:00	20,8659	0,25225	5,26345
14:15:00	20,83958	0,25225	5,25681
14:20:00	20,82564	0,25225	5,2533
14:25:00	17,87169	0,25225	4,50816
14:30:00	18,13792	0,25225	4,57531
14:35:00	20,53041	0,25225	5,17882
14:40:00	19,76757	0,25225	4,9864
14:45:00	20,19271	0,25225	5,09364
14:50:00	20,7848	0,25225	5,24299
14:55:00	21,02238	0,25225	5,30292
15:00:00	21,01039	0,25225	5,2999
15:05:00	21,02005	0,25225	5,30234
15:10:00	21,01032	0,25225	5,29988
15:15:00	20,99974	0,25225	5,29721
15:20:00	20,98536	0,25225	5,29359
15:25:00	20,96379	0,25225	5,28815
15:30:00	20,96262	0,25225	5,28785
15:35:00	20,96793	0,25225	5,28919
15:40:00	20,96387	0,25225	5,28817
15:45:00	20,95686	0,25225	5,2864
15:50:00	20,95434	0,25225	5,28576
15:55:00	20,95628	0,25225	5,28625
16:00:00	20,94739	0,25225	5,28401
16:05:00	20,93617	0,25225	5,28118
16:10:00	20,91943	0,25225	5,27695
16:15:00	20,92245	0,25225	5,27772
16:20:00	20,91614	0,25225	5,27612
16:25:00	20,90448	0,25225	5,27318
16:30:00	20,89987	0,25225	5,27202
16:35:00	20,89672	0,25225	5,27122
16:40:00	20,89314	0,25225	5,27032
16:45:00	20,8957	0,25225	5,27097
16:50:00	20,89458	0,25225	5,27069
16:55:00	20,89478	0,25225	5,27074
17:00:00	20,87022	0,25225	5,26454
17:05:00	20,8486	0,25225	5,25909
17:10:00	20,83768	0,25225	5,25633
17:15:00	20,82308	0,25225	5,25265
Total	1599,127		403,382