



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

ALEXANDRE KASSIMO DIAS

**PROTÓTIPO DE POSICIONADOR SOLAR DE UM EIXO BASEADO EM
ARDUÍNO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A CIDADE DE BAMBADINCA**

REDENÇÃO – CE

2021

ALEXANDRE KASSIMO DIAS

**PROTÓTIPO DE POSICIONADOR SOLAR DE UM EIXO BASEADO EM
ARDUÍNO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A CIDADE DE BAMBADINCA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável – IEDS da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr Carlos Alberto Cáceres
Coaquira

REDENÇÃO – CE

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Dias, Alexandre Kassimo.

D541p

Protótipo de posicionador solar de um eixo baseado em arduino: simulação computacional para a cidade de bambadinca / Alexandre Kassimo Dias. - Redenção, 2021.

62f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira.

1. Energia fotovoltaico. 2. Guiné-Bissau. 3. Energia solar.
I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.48

ALEXANDRE KASSIMO DIAS

**PROTÓTIPO DE POSICIONADOR SOLAR DE UM EIXO BASEADO EM
ARDUÍNO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A CIDADE DE BAMBADINCA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável – IEDS da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 08/04/21

BANCA EXAMINADORA

Carlos Alberto Cáceres

Carlos Alberto Cáceres Coaquira
Professor de Mestrado Superior
Instituto de Engenharias e Desenvolvimento
Sustentável - SIAPE: 2865875

Prof. Dr Carlos Alberto Cáceres Coaquira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Rejane Félix Pereira

Prof.ª Dra. Rejane Félix Pereira

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

B. Yari Moise Bandiri

Prof. Dr Sabi Yari Moise Bandiri

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Às minhas rainhas, a Sra. Cesaltina Antonieta P. D. Mendes e a Sra. Adalgisa Pereira Dias e a toda a minha família. Ao meu pai António Eugênio Dias, minha mãe Maria Sandra K. Assad e a minha avó Dona Marcelina “Mamã”.

Ao meu avô Eugênio Dias (In memoriam)

AGRADECIMENTOS

A família Dias, minhas tias amadas, Cesaltina e Adalgisa pois sem vocês não teria conseguido, palavras não são suficientes para expressar o que significam para mim. A minha mãe Sandra, minha tia Rosantina.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Cáceres Coaquira pela orientação.

Ao Prof. Sabi Yari Moise Bandiri e a Prof^a. Rejane Félix Pereira pelo apoio e suporte durante a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, Remna, Erwin, Lizandro, Wilde, Jó, Leonel, Taufik, Ussufi, Laila, Kaira, Sara, Tia Jósephine “Dã” Barboza e Domingos por todo o apoio, suporte e por terem acreditado, agradeço a Deus por vos ter na minha vida e poder contar convosco a qualquer momento.

A minha família unilabiana, em especial a Gerda, Nicolas, Guilherme Prata, Jério, Nóe, Robna e Aladje pelos momentos vividos, altos e baixos durante esta caminhada, não escolheria e nem vos trocaria por nada, espero poder contar convosco sempre assim como podem contar sempre contigo, a melhor família que uma pessoa poderia ter e a todos que de forma direta ou indireta da minha formação acadêmica e pessoal.

“Y a-t-il un mot plus fort que 'merci' ? [...] J'suis personne, elle a fait d'moi quelqu'un [...] Que Dieu te garde le plus longtemps possible, J'vais tout faire pour que tu sois fier de ton fils” (Black M)

RESUMO

A eficiência das células fotovoltaicas na conversão da irradiação solar em energia elétrica depende diretamente da irradiação incidente sobre os módulos e o tempo de exposição destes à irradiação, a maioria dos sistemas fotovoltaicos são instaladas em uma estrutura de suporte fixa, com uma inclinação determinada como ótima, para otimizar a produção energética ao longo do ano. Com o avanço da tecnologia, vem-se desenvolvendo sistemas com o intuito de otimizar a produção energética dos módulos comerciais, dentre as quais se destacam os posicionadores solar de um e de dois eixos. Diante disso desenvolveu-se um sistema de posicionador solar de um eixo, com o controle *open loop* (circuito aberto), usando Arduino Uno e a plataforma *open source* (código aberto) Arduino IDE para o desenvolvimento e gravação do código fonte no microcontrolador. O sistema desenvolvido conta com o microcontrolador como a unidade lógica e de controle, com sensores de luminosidade fornecendo dados relacionado a posição do Sol no céu para unidade de controle e servomotor sobre a qual se encontra instalado o módulo fotovoltaico. Foi feita uma simulação computacional para fins comparativos, usando módulos fixos e módulos com posicionadores de um eixo, tendo como referência a central fotovoltaica localizada na cidade de Bambadinca, Guiné-Bissau, onde se obteve um ganho percentual de 25,26% e 25,92% para os sistemas com posicionador de um eixo em relação ao sistema fixo.

Palavras chaves: Energia solar fotovoltaico. Guiné-Bissau. Posicionador solar.

ABSTRACT

The efficiency of photostatic's cells at converting the solar irradiation into electricity depends directly from incident irradiation on the photovoltaic modules and the time of exposition of these to the irradiation, most of photovoltaic systems are installed in a fixed structure of support with a tilt angle determined as an optimum angle, to optimized the annual electricity production of system. With the advance of technology, systems have been developed in order to optimize energy production of commercials modules, where we have a single and two axis sun tracker's among these system's. In front of that, a one axis sun tracker system was developed, with the open loop type of control, using Arduino Uno and the open source platform Arduino IDE to develop and burn the project source into the microcontroller. The developed system has the microcontroller as a logic and control unit, with luminosity sensor's providing data related to the Sun position in the sky to the microcontroller and servo-motor where the photovoltaic's modules are installed. A computational simulation was performed for comparative purpose, using fixed and singles axis sun tracking system's, using as a reference the photovoltaic power plant located at Bambadinca's city, Guinea-Bissau, where a percentage gain of 25,26% and 25,92% was found on the electrical production for photovoltaic plant with the singles axis system's in comparison with fixed structure.

Key's words: Guinea-Bissau. Sun tracker. Solar photovoltaic energy

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Eficiência das células fotovoltaicas.....	31
Tabela 2: Resultado dos testes da fonte de alimentação.....	48
Tabela 3: Características dos módulos fotovoltaicos e inversores utilizados na simulação....	53
Tabela 4: Resultado das simulações para a unidade geradora.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização geográfica da Guiné-Bissau.....	17
Figura 2: Consumo final de energia por fonte – Guiné-Bissau.....	18
Figura 3: Distribuição da potência instalada.....	19
Figura 4: Localização geográfica da cidade de Bambadinca.....	20
Figura 5: Central fotovoltaica da cidade de Bambadinca, Guiné-Bissau.....	21
Figura 6: Potência fotovoltaica global, de acordo com país e região, 2009 – 2019.....	22
Figura 7: Participação das fontes na matriz elétrica mundial.....	22
Figura 8: Variação da posição da Terra em sua órbita em torno do Sol.....	24
Figura 9: Ângulos da geometria solar: azimutal, zenital e da altura solar.....	24
Figura 10: Estrutura das bandas de energia.....	27
Figura 11: Ilustração de um material semicondutor do tipo n.....	28
Figura 12: Ilustração da junção semicondutora.....	29
Figura 13: Estrutura de uma célula fotovoltaica.....	29
Figura 14: Ilustração da montagem do módulo fotovoltaico.....	30
Figura 15: Células fotovoltaicas de silício.....	31
Figura 16: Gráfico de curvas características I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.....	33
Figura 17: Influência da variação da irradiância na curva característica, $T = 25^{\circ} \text{C}$	34
Figura 18: Influência da temperatura na curva característica, $G = 1.000 \text{ W/m}^2$	35
Figura 19: Classificação dos posicionadores solar.....	37
Figura 20: Arduíno Uno REV3.....	38
Figura 21: Microcontrolador Atmega 328P.....	38
Figura 22: Resistor dependente de luz - LDR.....	39
Figura 23: Servomotor (Micro servo 9g).....	40
Figura 24: Simulação computacional da fonte de alimentação usando <i>PSIM</i>	44
Figura 25: Configuração das conexões do regulador de tensão integrado.....	44
Figura 26: Esquema utilizado para gravar o <i>bootloader</i>	45
Figura 27: Diagrama do circuito do posicionador solar.....	46
Figura 28: Ambiente de trabalho do PVsyst.....	47
Figura 29: Protótipo de posicionador solar desenvolvido.....	49
Figura 30: Código fonte do projeto.....	50
Figura 31: Irradiação solar direta média mensal na cidade de Bambadinca.....	51
Figura 32: Janela do PVsyst para determinação da orientação dos módulos.....	51

Figura 33: Janela de configuração do sistema (potência, seleção de módulos e inversores)....	52
Figura 34: Gráfico da produção energética dos arranjos.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 Justificativa.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Guiné-Bissau e aspectos energéticos.....	17
2.1.1 Matriz energética Guineense.....	17
2.2 Localização geográfica da cidade de Bambadinca.....	20
2.3 Panorama mundial do uso da energia fotovoltaica.....	21
2.4 Radiação Solar.....	22
2.4.1 Ângulos da geometria solar.....	24
2.5 Energia solar fotovoltaica.....	25
2.5.1 Breve histórico.....	26
2.5.2 Semicondutores.....	26
2.5.2.1 <i>Materiais semicondutores.....</i>	<i>27</i>
2.5.3 Efeito fotovoltaico e células fotovoltaicas.....	29
2.5.3.1 <i>Tipos de células fotovoltaicas.....</i>	<i>30</i>
2.5.4 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos.....	32
2.5.4.1 <i>Desempenho dos módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>34</i>
2.5.5 Ângulo de instalação dos módulos fotovoltaicos.....	35
2.6 Posicionador solar.....	35
2.6.1 Classificação dos posicionadores solares.....	36
2.6.1.1 <i>Classificação quanto ao sistema de controle.....</i>	<i>36</i>
2.6.1.2 <i>Classificação quanto à estratégia de rastreamento.....</i>	<i>36</i>
2.6.1.3 <i>Classificação quanto ao grau de liberdade.....</i>	<i>37</i>
2.6.2 Plataforma Arduino.....	37
2.6.2.1 <i>Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation – PWM).....</i>	<i>39</i>
2.6.3 Resistor Dependente de Luz (<i>Light Dependent Resistor – LDR</i>).....	39
2.6.4 Servomotor.....	39
2.6.5 PVsyst.....	40
2.6.6 PSIM.....	41

2.6.7 Estado da arte dos seguidores solares.....	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 Materiais.....	43
3.2 Metodologia.....	43
3.2.1 Fonte de alimentação.....	43
3.2.2 Montagem do protótipo.....	44
3.3 Simulação computacional.....	46
4 RESULTADOS.....	48
4.1 Fonte de alimentação e funcionamento do protótipo.....	48
4.2 Simulação.....	50
4.2.1 Resultados das simulações para módulos fixos e com posicionador.....	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERENCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A crise energética da década de 1970 obrigou o mundo a repensar e diversificar a sua matriz energética com o intuito de reduzir a participação do petróleo e seus derivados na matriz energética, incentivando a busca por outras formas de energia menos poluentes. Dentre as formas de energias de origem renovável, a energia solar vem se destacando nos últimos anos devido ao seu potencial e a disponibilidade da irradiação solar ao longo do ano para o aproveitamento energético desse recurso ao redor do mundo. A energia proveniente do sol vem sendo aproveitado desde os primórdios da humanidade, seja para suprir as necessidades básicas como a iluminação, aquecimento e alimentação (agricultura: controle da fotossíntese). (TOLMASQUIM, 2016).

O aproveitamento da energia solar para a produção da eletricidade vem ganhando espaço na matriz elétrica mundial nas últimas décadas, a conversão da irradiação em eletricidade é realizada através do emprego células fotovoltaicas, células essas construídas a base de materiais semicondutores que funcionam obedecendo o efeito descoberto por Becquerel, o efeito fotovoltaico. O uso da tecnologia fotovoltaica para fins energéticos em aplicações terrestres era limitado devido aos altos custos unitários (US\$/W) envolvidos, tornando assim o emprego dessa tecnologia viável apenas para aplicações espaciais ou para a eletrificação de áreas de difícil acesso até a década de 70, contudo, graças a políticas que visam o aumento da participação das fontes de energias renováveis na matriz elétrica, esse custo vem reduzindo, tendo como resultado o aumento da potência fotovoltaica instalada no mundo. (PINHO; GALDINO, 2014).

Com o crescimento exponencial das instalações fotovoltaicas, a tecnologia fotovoltaica encontra um novo empecilho, a eficiência de conversão da irradiação em eletricidade relativamente baixa das células fotovoltaicas comerciais. Pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de melhorar a eficiência das tecnologias já existente ou desenvolver células fotovoltaicas mais eficientes, contudo, essa eficiência não depende apenas da tecnologia de fabricação das células, ela depende também de outros fatores, tais como a irradiação incidente sobre as células e o tempo de exposição das células/módulos fotovoltaicos a irradiação solar.

A instalação dos módulos fotovoltaicos na maioria das unidades geradoras é feita em estruturas fixas com um ângulo ótimo, geralmente usa-se ângulo igual à latitude do ponto da instalação, para assim otimizar o aproveitamento da irradiação solar ao longo do ano. Devido a dinâmica do sol, a instalação dos módulos fixos tendem a aproveitar menos a irradiação

solar, isso porque os módulos conseguem captar a máxima irradiação por um período de tempo limitado dependendo do ângulo da inclinação.

Pesquisas vêm sendo realizados com o intuito de desenvolver sistemas capazes de realizar o rastreamento da posição do sol e corrigir a posição dos módulos fotovoltaicos de forma automática, por meio dos rastreadores/posicionadores solar (*Sun Tracker's*), aumentando o tempo de exposição dos módulos a irradiação, aumentando o aproveitamento da irradiação solar. Posicionador solar consiste de uma estrutura de suporte e orientação sobre a qual é montado um conjunto de módulos solares, esses posicionadores solar podem ser agrupados de acordo com o sistema de controle (passivo e ativo), grau de liberdade (um eixo e dois eixos) e estratégia de rastreamento (*closed loop* e *open loop*). Um sistema de posicionamento solar é considerado ideal quando for capaz de orientar o módulo solar de forma precisa, deixando o módulo sempre perpendicular aos raios solares. O aproveitamento da energia solar através da implementação do sistema de posicionamento solar é mais eficiente se o sistema for capaz de acompanhar as mudanças sazonais do Sol. (CHIN; BABU; MCBRIDE, 2011; MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de posicionamento solar *open loop*, do tipo horizontal Este-Oeste baseado em Arduino, através do emprego de microcontrolador da AVR Microchip, servomotor e sensores de luminosidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir a unidade lógica do posicionador solar de um eixo;
- Programar a unidade lógica para realizar a leitura dos dados fornecidos pelos sensores e realizar a correção da posição do módulo fotovoltaico, acompanhando o movimento aparente do Sol ao longo do dia;
- Simular e comparar os ganhos energéticos envolvendo sistemas fotovoltaicos fixos e com posicionadores solar de um eixo para a central fotovoltaica da cidade de Bambadinca, Guiné-Bissau.

1.2 Justificativa

A eficiência das células fotovoltaicas está relacionada com a sua eficiência em converter a irradiação solar em eletricidade, que depende da irradiação incidente sobre os módulos entre outros fatores, com base nisso tem-se feito estudos visando a melhoria da eficiência do processo da conversão da irradiação solar em energia elétrica, tornando assim a tecnologia mais competitivo em relação as outras fontes de energias. Diante do exposto, uma das soluções para a melhoria do aproveitamento da irradiação solar e auxiliar no aumento do rendimento das células fotovoltaicas, é o desenvolvimento de sistema rastreamento e posicionamento automático dos módulos fotovoltaicos, capazes de orientar os módulos ao longo do dia, maximizando o aproveitamento da irradiação solar para a produção da eletricidade.

Bahrami et al., (2017), afirmam que devido à variação da irradiação solar ao redor do mundo, um único modelo de posicionador solar (estratégia de rastreamento ou grau de liberdade ou sistema de controle) não pode ser adotado como ideal para todas as localidades, pois existe a necessidade de investigar e identificar o modelo que se enquadra melhor ao cenário da irradiação solar incidente e ao ponto em estudo para a instalação do sistema fotovoltaico.

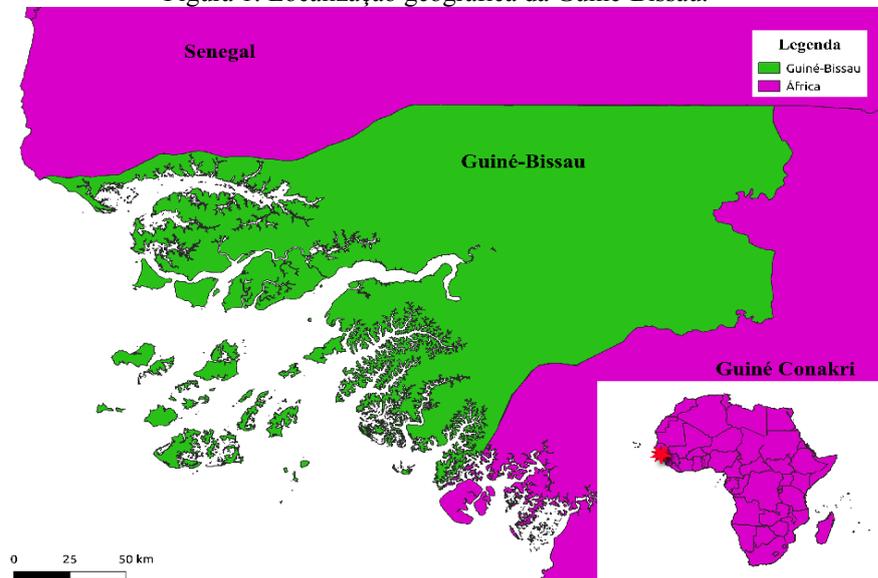
A cidade de Bambadinca, Guiné-Bissau, conta com uma central fotovoltaica híbrida com a potência de 312 kWp operando em plena capacidade, sendo necessário a expansão da central para atender a crescente demanda. A escolha da cidade de Bambadinca para fins de simulação computacional para fins comparativos foi baseado no problema relacionada ao aumento da demanda da eletricidade, partindo disso, fez-se a projeção de um sistema de posicionador solar de um eixo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Guiné-Bissau e aspectos energéticos

A Guiné-Bissau fica localizada na costa ocidental do continente africano. O país é composto por uma parte continental e um arquipélago formado por mais de 100 ilhas e ilhéus, o arquipélago dos Bijagós. O país é dividido administrativamente em oito regiões (Bafatá, Biombo, Bolama/Bijagós, Cacheu, Gabú, Oio, Quinara e Tombali) que por sua vez são divididos em trinta e seis setores além do Setor Autônomo de Bissau. O país faz fronteira com o Senegal ao norte e com a Guiné Conacri ao sul e leste, a capital do país é o Setor Autônomo de Bissau, ver Figura 1. A Guiné-Bissau conta com uma extensão territorial de 36125 km² e aproximadamente 1,45 milhão de habitantes. O país possui clima tropical e duas estações do ano dividido em duas épocas, a época seca e a época da chuva, a época das chuvas compreende os meses de maio a outubro e época de seca corresponde os meses restante. (ALER – ASSOCIAÇÃO LUSÓFONA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2018).

Figura 1: Localização geográfica da Guiné-Bissau.



Fonte: Adaptada da OpenStreetMap, 2021.

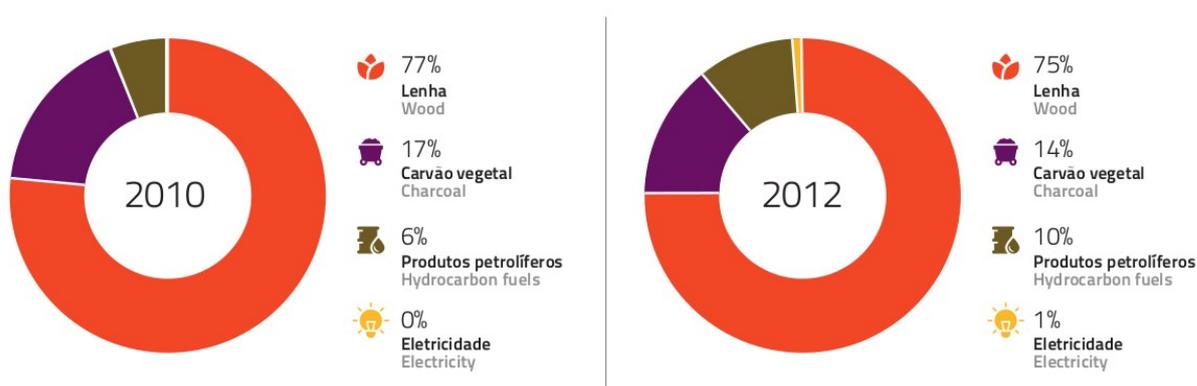
2.1.1 Matriz energética Guineense

Segundo o relatório do balanço energético de 2010 do Ministério da Energia e Indústria e Recursos Naturais da Guiné-Bissau (MEIRN), a matriz energética guineense se

caracteriza como sendo renovável, com a biomassa representando 87% da matriz seguido pelos produtos petrolíferos com 13%. Em termos de consumo final, o consumo da biomassa se destaca com 86,2%, seguido pelos produtos derivados do petróleo 13,7% e a eletricidade representando apenas 0,1%, a baixa participação da eletricidade na matriz energética está relacionado ao índice de eletrificação do país, taxa de acesso à eletricidade de 10%. Em termos de consumo por setor, o setor residencial foi responsável por 90,6% do consumo do país, seguido pelo setor de transporte com 9,1%, e 0,3% representando o consumo da indústria (0,01%), comércio e serviços públicos (0,05%) e outros (0,24%).

O consumo energético do setor residencial do país é caracterizado pelo alto consumo da biomassa, onde a lenha e o carvão vegetal representam quase 95,15% desse consumo, eletricidade com 0,03%, derivados do petróleo com (diesel e gasolina) 4,64% e o Gás Liquefeito de Petróleo – GLP com apenas 0,18%. Segundo o Plano de Ação Nacional para a Eficiência Energética do país (PANEE), nos anos 2010 e 2012, o consumo da lenha chegou a representar 77% e 75% respectivamente o consumo do país e houve um aumento no consumo dos produtos petrolíferos assim como da eletricidade, aumentando em 22% o consumo energético nos anos referidos, sendo o consumo dos produtos petrolíferos e da eletricidade os responsáveis por esse aumento no perfil energético do país, ver Figura 2. (ALER, 2018; GUINÉ-BISSAU. MINISTÉRIO DA ENERGIA E INDÚSTRIA E RECURSOS NATURAIS, 2010a, 2017).

Figura 2: Consumo final de energia por fonte – Guiné-Bissau.



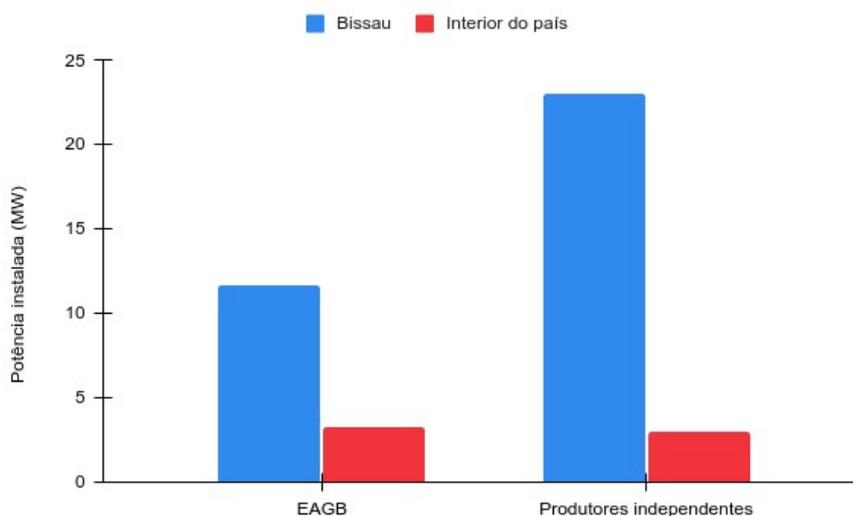
Fonte: ALER, 2018.

A matriz elétrica do país é predominada pelas fontes não renováveis, onde as centrais termoelétricas a diesel são responsáveis por 99% da eletricidade produzida no país. O monopólio da geração, transmissão e distribuição da eletricidade no país é da responsabilidade de empresa governamental Eletricidade e Água da Guiné-Bissau – EAGB no

Setor Autônomo de Bissau e das entidades regionais competentes nas demais regiões. A produção da eletricidade se encontra dividida entre a EAGB e os produtores independentes, estima-se que a potência total instalada no país seja de 41 MW, sendo os produtores independentes (através do uso de geradores a gasolina para a produção e consumo próprio ou para a comercialização) responsáveis por quase 63,41% (26 MW) da potência total instalada no país, como ilustra a Figura 3. (ALER, 2018; MEIRN, 2010b)

Devido à falta de informações actualizadas, é complicado contabilizar a potência instalada e operacional exacta da Guiné-Bissau. Como referido estima-se que, em 2018 a capacidade operacional da EAGB em Bissau é 11,7 MW e a capacidade dos centros de produção regionais é 3,3 MW. [...] os produtores independentes e autónomos operam aproximadamente 23 MW em Bissau e 3 MW nas regiões. Portanto, actualmente a nível nacional, a potência térmica operacional total é assim estimada em cerca de 41 MW. (ALER, p. 87)

Figura 3: Distribuição da potência instalada.



Fonte: Adaptado da ALER, 2018.

Estudos realizados pelo MEIRN (2010b), com base nos dados dos anos entre 2004 a 2010, indicam que a média anual da irradiação incidente em todo o território guineense se encontra entre 1800 e 2000 kWh/m², sendo as regiões costeiras as zonas com maior índice de irradiação solar. Quanto a participação das fontes renováveis na matriz elétrica, atualmente existem projetos de implementação de centrais fotovoltaicas para a geração *off-grid* em fases de estudos e outros já em operação em certas localidades do país. Dentre os projetos em operação é possível citar a central fotovoltaica híbrida, *off-grid* instalada na cidade de Bambadinca, que conta com uma potência instalada de 312 kWp¹, a central fotovoltaica de Contubel com 100 kWp de capacidade instalada e no ano de 2017 deu-se o início a construção

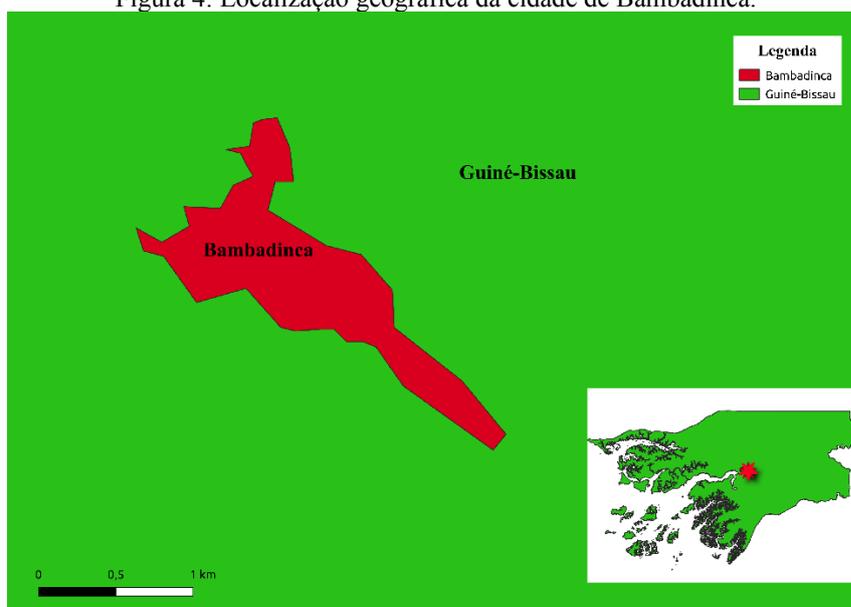
1 kWp (kilo watt-pico) é potência nominal dos módulos fotovoltaicos obtido nos laboratórios, sob condições-padrão de teste – STC.

de mais uma central, vale ressaltar que os projetos aqui citados se encontram localizados no interior do país. (ALER, 2018)

2.2 Localização geográfica da cidade de Bambadinca

Bambadinca é uma cidade que faz parte da região de Bafatá e fica localizada no leste da Guiné-Bissau, nas coordenadas geográficas Latitude: 12.016952° e longitude: -14.855351° a uma elevação de 27 metros acima do nível do mar, localizado a 120 km da capital Bissau, a cidade possui 6,4 mil habitantes, ver Figura 4. (ALER - ASSOCIAÇÃO LUSÓFONA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - COMUNICAÇÃO - NOTÍCIAS - PROGRAMA COMUNITÁRIO DE ACESSO A ENERGIA RENOVÁVEL DE BAMBADINCA “BAMBADINCA STA CLARO,” [s. d.]).

Figura 4: Localização geográfica da cidade de Bambadinca.



Fonte: Adaptada do OpenStreetMap, 2021

Até o ano de 2012, as cidades de Gabú, Bafatá, Contubel e Bambadinca eram alimentadas por um grupo de geradores com capacidade total estimada de 5 MVA², em operação desde 1983. Entre os anos 2011 a 2015, a cidade de Bambadinca se beneficiou de uma central fotovoltaica *off grid* (fora da rede elétrica) híbrida, com uma potência instalada de 312 kWp, Figura 5, atendendo a 625 unidades consumidores (residenciais e comerciais), nos últimos anos a demanda vem aumentando de modo que a central se encontra operando no limite da sua capacidade. (ALER, 2018).

2 MVA (mega volts-ampères) é unidade da potência, ou energia por unidade de tempo, podendo ser expresso em MW (mega watts).

Figura 5: Central fotovoltaica da cidade de Bambadinca, Guiné-Bissau.



Fonte: ALER, 2018.

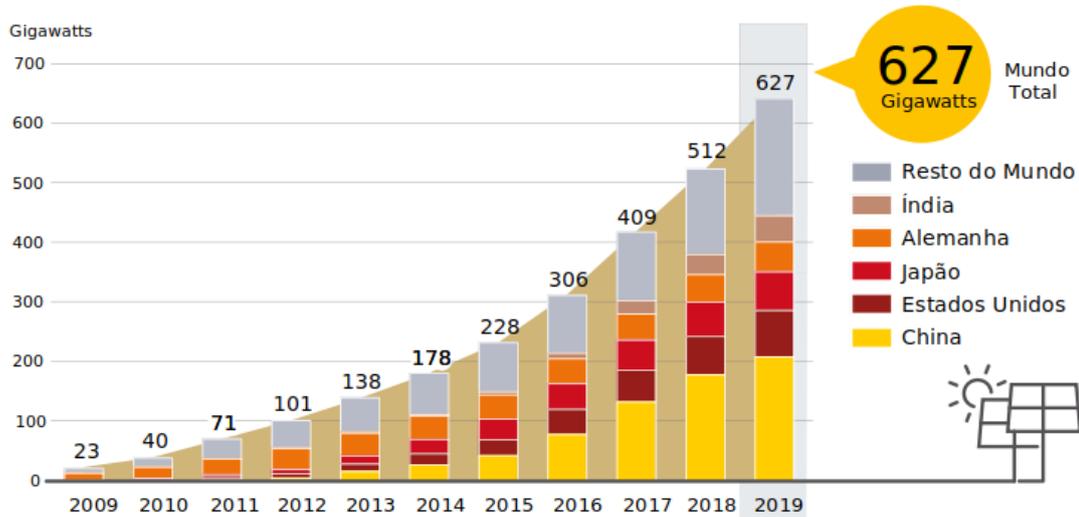
2.3 PANORAMA MUNDIAL DO USO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Até o início do século passado, a energia fotovoltaica era aproveitada apenas em projetos espaciais devido ao alto custo de geração energética com a tecnologia na época, sendo implementado posteriormente na eletrificação de áreas isoladas e/ou de difícil acesso (geração centralizada em sistemas *off-grid*). O emprego da tecnologia fotovoltaica para a geração distribuída ganhou popularidade no século XXI devido a redução de custos para a produção energética com a tecnologia. (TOLMASQUIM, 2016).

O custo de produção da eletricidade empregando tecnologia fotovoltaica na década de 1970 chegou a 150 US\$/Wp na Europa e nos EUA, custo esse que limitava o uso dessa tecnologia fotovoltaico para uso em projetos espaciais. De acordo com Pinho e Galdino (2014), com a adoção de políticas de inclusão de fontes de energias renováveis na matriz energética mundial, no final do ano 2013 esse custo caiu para 0,6 €/Wp e 0,65 US\$/Wp na Europa e nos EUA respectivamente.

Entre 2009 e 2019 houve um crescimento exponencial na potência fotovoltaica instalada (*on-grid* e *off-grid*) ao redor do mundo, que passou de 23 GWp para 627 GWp, o que representa um crescimento de cerca de 44% para o ano de 2019 em relação ao ano anterior, onde a China vem sendo a detentora da maior capacidade instalada, com um total de potência instalada de aproximadamente 200 GW, Figura 6. (REN21, 2020).

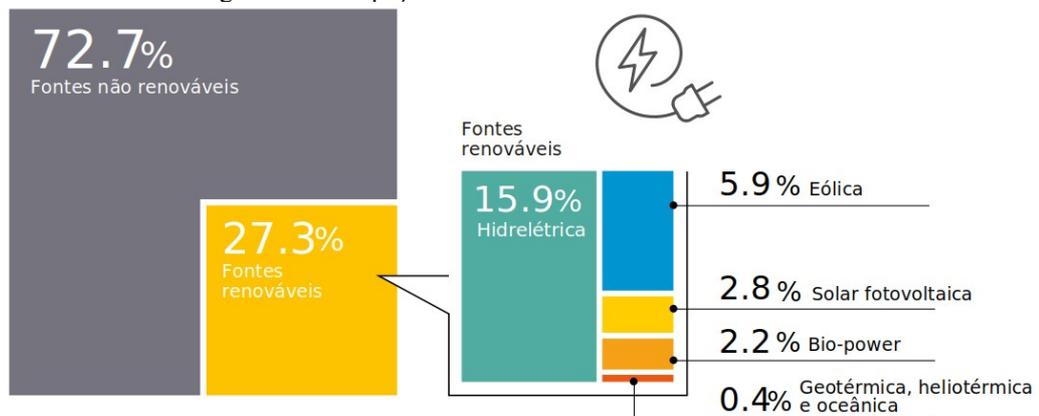
Figura 6: Potência fotovoltaica global, de acordo com país e região, 2009 – 2019.



Fonte: REN21, 2020.

Segundo o relatório da situação mundial das energias renováveis da REN21 (2020), as fontes de energias renováveis representaram 27,3% da matriz elétrica mundial no ano 2019, sendo que desses 27,3%, onde a energia fotovoltaica foi responsável 2,8% dessa participação como ilustra a Figura 7.

Figura 7: Participação das fontes na matriz elétrica mundial.



Fonte: REN21, 2020.

2.4 Radiação Solar

A principal fonte de energia do nosso planeta é o Sol, responsável pela manutenção da vida no planeta e responsável de forma direta e indireta de quase todas as outras fontes de energia conhecidas (eólica, biomassa, hídrica, combustíveis fósseis, etc.), com exceção da energia geotérmica. A energia solar, irradiação solar, é resultado das reações que ocorrem no

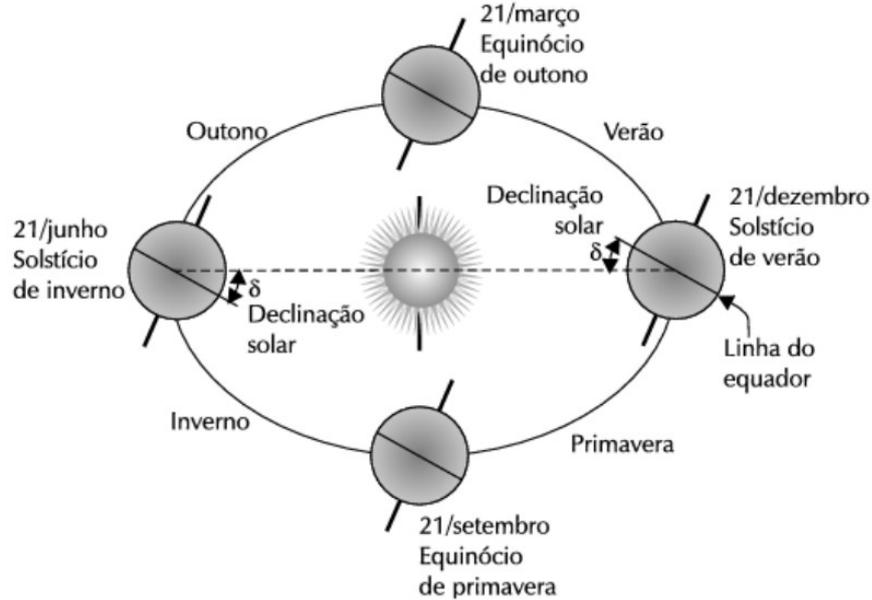
núcleo do Sol, a fusão nuclear, onde os átomos de hidrogênio são transformados em átomos de hélio, liberando uma quantidade enorme de energia na forma de luz e calor durante o processo, essa energia é transportado do Sol até a Terra na forma de ondas eletromagnéticas, constituída por um conjunto de ondas eletromagnéticas com frequências e comprimentos diferentes (ondas visíveis e não visíveis ao olho humano), denominado de espectro de radiação solar. (ÇENGEL; BOLES, 2013; NETO *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2017).

Estima-se que o Sol disponibiliza anualmente cerca de 170 mil TW de potência no topo da atmosfera terrestre, essa potência é bem maior quando comparado com a potência solar disponível na superfície terrestre. Essa diferença se dá pelo fato da irradiação solar interagir com a atmosfera antes de chegar a superfície. A interação da irradiação solar com a atmosfera se dá através da absorção, reflexão e espelhamento dos raios solares pelas moléculas de ar, vapor, poeiras e nuvens. Devido essa interação, a potência solar disponibilizada na superfície terrestre é de aproximadamente 94 mil TW. (BESSO, 2017; PINHO; GALDINO, 2014).

A irradiação solar que chega na camada mais externa da atmosfera terrestre é denominada de constante solar (G_0), cujo valor médio anual aproximado é de 1367 W/m^2 e tende a variar devido aos movimentos da Terra. Considerando que o espectro da radiação que chega na camada mais externa da atmosfera terrestre esteja organizado em linhas retas paralelas entre si, ao atravessar a atmosfera, a irradiação interage com a atmosfera fazendo com que a irradiação que chega na superfície seja dividido em dois componentes: a irradiação difusa e a irradiação direta. A componente direta compreende a irradiação solar que chega na superfície terrestre em linha reta, de forma direta e uniforme, sem interagir com a atmosfera. A componente difusa corresponde a toda a irradiação solar refletida e espelhada, provenientes de todas as direções. (MUNIZ, 2017; SILVA, 2010; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A Terra descreve duas trajetórias que dão origem as variações dos dias ao longo do ano e as estações do ano, o movimento de translação e rotação. O movimento de translação corresponde a trajetória elíptica descrita pela Terra em torno do Sol, com duração aproximada de 365 dias. Já o movimento de rotação, é o movimento realizado pela Terra em torno do seu eixo polar, Figura 8. O eixo polar da Terra possui uma inclinação de aproximadamente $\pm 23,45^\circ$, essa inclinação é a responsável pela variação da duração dos dias ao longo do ano em certas localidades. A combinação do movimento de translação e a inclinação do eixo polar, dão origem às estações do ano. (BACK *et al.*, 2019; NETO *et al.*, 2019; PINHO; GALDINO, 2014; SANTOS, 2013).

Figura 8: Variação da posição da Terra em sua órbita em torno do Sol.



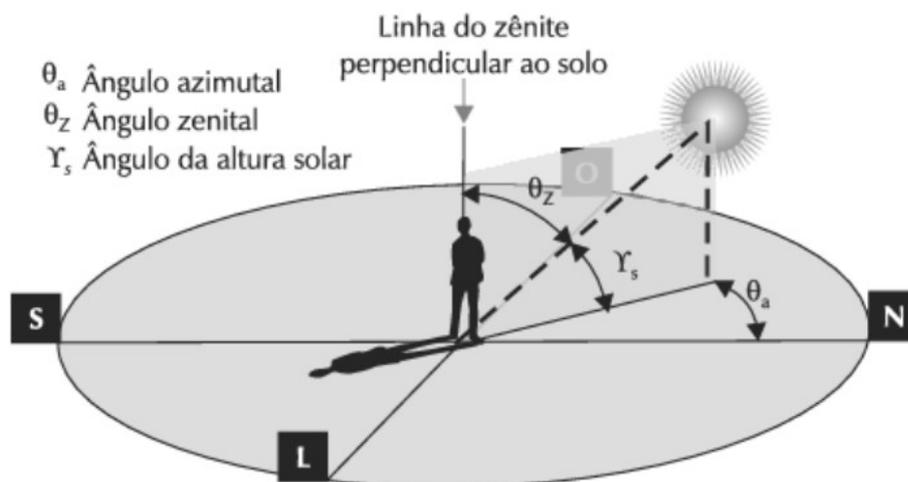
Fonte: Villalva e Gazoli, 2012.

2.4.1 Ângulos da geometria solar

A Figura 9 ilustra os ângulos solares que relacionam os ângulos dos raios solares e as suas variações ao longo do ano de acordo com movimento aparente do Sol. O conhecimento destes ângulos são de extrema importância na execução de projetos solares fotovoltaicos.

A altura solar (γ_s), de acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 72), “ângulo compreendido entre os raios do sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador)”.

Figura 9: Ângulos da geometria solar: azimutal, zenital e da altura solar.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012.

Devido à variação da posição do sol ao longo do dia e do ano, o ângulo da incidência da irradiação solar também varia ao longo do dia e do ano, segundo a norma técnica NBR 10899/2013 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013), o ângulo da incidência solar pode ser definido como sendo o ângulo da incidência dos raios solares em relação ao plano normal da superfície.

Hora solar (H_s) se baseia no dia solar médio, que possui 24 horas, com o sol aparente durante 12 horas, uma hora solar equivale a um deslocamento de 15° , por convenção, adota-se valores negativos de hora solar para o período de manhã e valores positivos para o período da tarde. O ângulo azimutal do sol (θ_a), é o ângulo formado entre a linha de projeção dos raios solares e o plano horizontal do observador, o ângulo azimutal do sol varia entre $180^\circ < \theta_a < -180^\circ$. O ângulo zenital solar (θ_z), corresponde ao ângulo formado entre o plano vertical do observador e pela direção dos raios solares. Ângulo horário do sol também conhecido como hora angular (ω), corresponde ao movimento angular do Sol ao longo de um dia, deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol observado a partir do meridiano local, a hora angular é calculada através da Equação 1, levando em conta a hora solar. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2013; PEREIRA et al., 2017; PINHO; GALDINO, 2014; SILVA, 2010).

$$\omega = (H_s - 12) * 15^\circ \quad 1$$

Onde:

- $\omega \rightarrow$ é a hora angular;
- $H_s \rightarrow$ é hora solar.

2.5 Energia solar fotovoltaica

O aproveitamento da energia solar pode ser dividido em dois grupos: o aproveitamento para fins térmico e elétrico. A utilização da energia para fins térmicos consiste no aproveitamento da irradiação solar para gerar calor, seja para conforto térmico, aquecimento da água para piscinas e para consumo humano ou na produção de vapor para fins elétricos (usinas heliotérmicas). O aproveitamento elétrico envolve o processo da conversão direta da irradiação solar em energia elétrica, processo que será tratado no item 2.5.3. (LABOURET; VILLOZ, 2010; NETO *et al.*, 2019).

2.5.1 Breve histórico

O efeito fotovoltaico foi descoberto pelo cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, que com dois eletrodos mergulhados em uma solução ácida, e ao iluminar a solução, Becquerel constatou uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos. Efeito similar foi observado em um dispositivo de estado sólido fabricado a base do selênio em 1876, pelos cientistas ingleses W. G. Adams e R. E. Day. A primeira célula fotovoltaica propriamente dita, foi fabricada a base de selênio pelo inventor norte-americano Charles E. Fritts em 1883. Após vários anos de estudos e pesquisas sobre os dispositivos de estado sólido, em 1918, o cientista polonês Jan Czochralski desenvolveu método de fabricação de cristais de silício, empregado para a fabricação dos módulos fotovoltaicos conhecidos atualmente. (ALVES, 2008; BACK *et al.*, 2019; BRITO; SILVA, 2006).

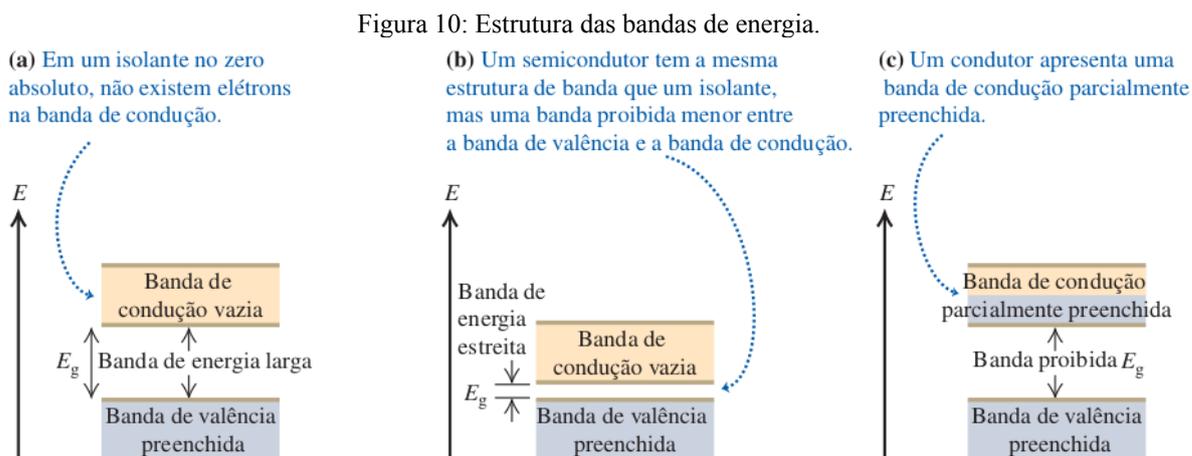
2.5.2 Semicondutores

Os materiais sólidos podem ser agrupados de acordo as suas propriedades elétricas em três grupos: condutores, isolantes e semicondutores. As propriedades elétricas de um material do estado sólido é determinado através da configuração dos elétrons nas bandas de energia na camada de valência dos átomos que formam esse material. Nas disciplinas da química estuda-se a configuração eletrônica dos compostos químicos. Durante a formação de um material sólido, as ondas dos elétrons se sobrepõem, como resultado da sobreposição, os elétrons das camadas mais externas do átomo (elétrons de valência) são reorganizados, formando as bandas de energia, banda de condução, banda de valência e a banda proibida, que são responsáveis pelas características elétricas dos materiais cristalinos. (BOYLESTAD; NASHESKY, 2013; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016; YOUNG; FREEDMAN, 2016).

Em um material semicondutor, a sobreposição das ondas dos elétrons tem como resultado o preenchimento por completo da banda de valência por elétrons e a banda de condução totalmente vazia, as duas bandas de energia se encontram separadas pela banda proibida (*gap*), como ilustra a Figura 10. A banda proibida ou *gap*, corresponde ao espaçamento existente entre a banda de condução e a banda de valência, os semicondutores apresentam *gap* pequeno em comparação aos isolantes, o que permite o deslocamento de elétrons da banda de valência para a banda de condução quando submetido a irradiação eletromagnéticas ou níveis de tensão superior a aquela exigida para superar a banda proibida

em materiais isolantes, o que justifica a classificação dos semicondutores com materiais com propriedades elétricas intermediário aos condutores e isolantes, ou seja, nem são bons condutores nem bons isolantes.

[...] um material semiconductor no zero absoluto tem uma banda de condução vazia acima da banda de valência totalmente preenchida. [...] a banda proibida entre essas bandas é relativamente pequena, e os elétrons podem saltar com maior facilidade para a banda de condução. (YOUNG; FREEDMAN, 2016, p. 387)



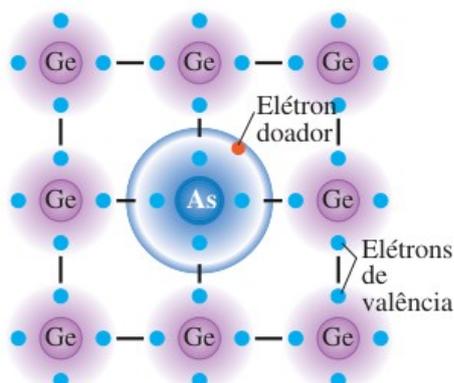
Fonte: Young e Freedman, 2016.

2.5.2.1 Materiais semicondutores

As propriedades elétricas dos materiais semicondutores podem ser modificados para fins específicos através da dopagem. A dopagem consiste da adição de átomos específicos a uma base do material semiconductor, Silício (Si) ou Germânio (Ge) por exemplo, são os mais utilizados, modificando assim as propriedades elétricas do semiconductor. Os dispositivos semicondutores utilizados tanto na fabricação dos dispositivos eletrônicos e dos módulos fotovoltaicos, consistem em dois tipos de semicondutores: semiconductor do tipo **n** e do tipo **p**. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Os materiais semicondutores do tipo **n** são fabricados através da adição de um elemento químico do grupo 5 (V) da tabela periódica, que possuem cinco elétrons na camada de valência, a uma base de silício puro. A adição da impureza a base de silício resulta em formação de quatro ligações covalentes entre o átomo de silício e o átomo da impureza, restando um elétron da impureza relativamente livre para locomover no material, como ilustra Figura 11, modificando assim a condutividade elétrica do material. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013; YOUNG; FREEDMAN, 2016).

Figura 11: Ilustração de um material semiconductor do tipo n.

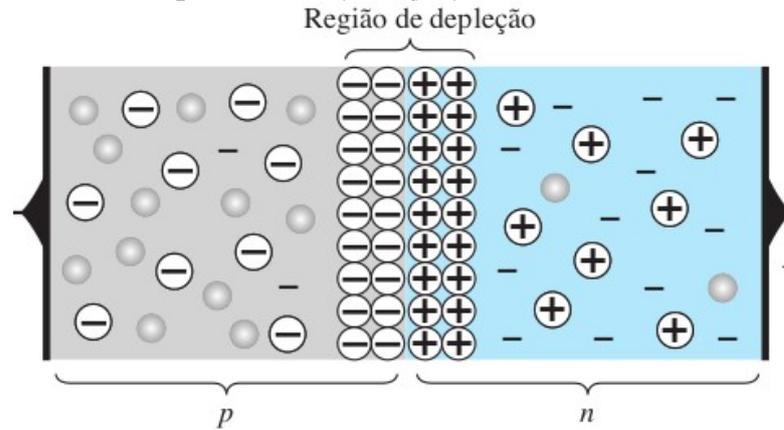


Fonte: Young e Freedman, 2016.

Os materiais semicondutores do tipo **p** são fabricados através da adição de átomos com três elétrons de valência (grupo III da tabela periódica) a uma base de silício ou germânio puro, como resultado da falta de elétrons por parte da impureza, são formados por três ligações covalentes deixando assim espaços vazios no material final, denominados de lacunas, tornando o produto final carregado positivamente. Ambos os materiais semicondutores, **p** e **n** possuem portadores majoritários buracos e elétrons respectivamente, porém ambos permanecem eletricamente neutro. (NETTO, 2019; PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A junção semicondutora, consiste da junção superficial dos materiais semicondutores do tipo **n** e do tipo **p**, com a superfície de ambos os materiais extremamente polidas. Ao juntar os materiais semicondutores, os elétrons do material do tipo **n** são atraídos pelas lacunas do material do tipo **p** na fronteira da junção, formando assim uma barreira de potencial elétrico que precisa ser superado através da aplicação de um nível de tensão nos terminais do material ou pela incidência da irradiação sobre a face do material semiconductor do tipo **n**, para que aja a circulação da corrente elétrica, essa barreira é denominado de região da depleção, como ilustra a Figura 12. (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 12: Ilustração da junção semicondutora.



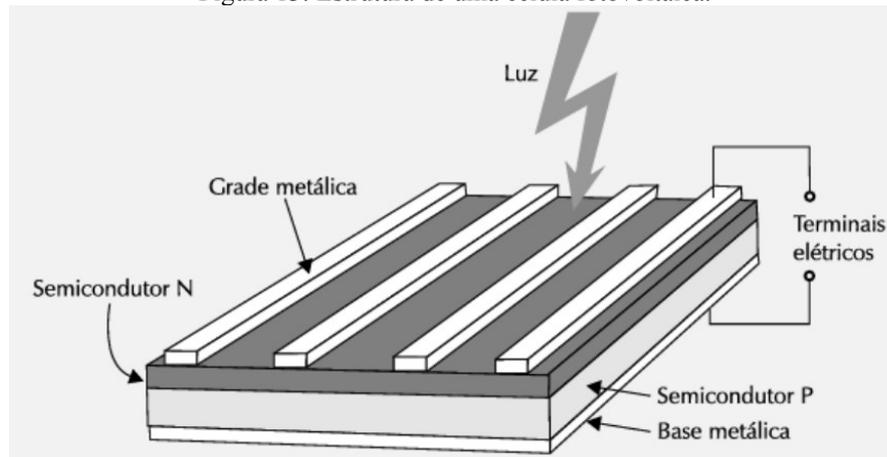
Fonte: Boylestad e Nashelsky, 2013.

2.5.3 Efeito fotovoltaico e células fotovoltaicas

O efeito fotovoltaico é o processo na qual a energia luminosa (irradiação solar) é convertida em energia elétrica de forma direta, essa conversão é feita usando junção semicondutora, as células fotovoltaicas. Células fotovoltaicas são dispositivos construídos por duas camadas de materiais semicondutores, junção **p-n**, Figura 13, com uma camada muito fina do material semicondutor do tipo **n** montada na face superior da célula, de modo a garantir que a irradiação penetre a junção, fornecendo energia suficiente para superar a barreira do potencial elétrico, gerando energia elétrica. (BESSO, 2017; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Para Villalva e Gazoli (2012, p. 74), “A célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico básico. Uma célula sozinha produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir painéis, placas ou módulos fotovoltaicos.”.

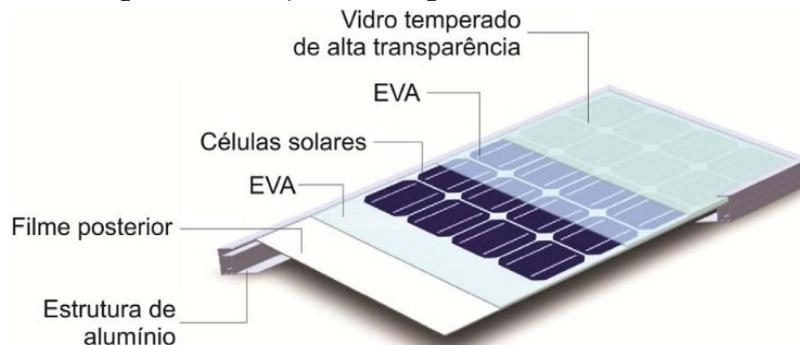
Figura 13: Estrutura de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012.

O módulo fotovoltaico ou o painel solar, é formado pela combinação em série ou em paralelo das células fotovoltaicas, montadas sobre uma estrutura rígida de alumínio, para servir de suporte e proporcionar resistência mecânica ao módulo, as células se encontram envolvidas por duas camadas de acetato de etil vinila (EVA, do inglês Ethylene-vinyl acetate) e conta com uma cobertura de vidro temperado de alta transparência na parte superior da célula fotovoltaica, como ilustrado na Figura 14. (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 14: Ilustração da montagem do módulo fotovoltaico.



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

2.5.3.1 Tipos de células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas empregadas na construção dos módulos fotovoltaicos comerciais são fabricadas a base de silício, devido à eficiência das células produzidos a base deste material semicondutor quando comparado a células fotovoltaicas fabricadas a base de outros materiais. Existem diversas tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas, umas bem consolidadas no mercado e outras em fase de desenvolvimento. Dentre as tecnologias de

fabricação dos módulos fotovoltaicos tem-se módulos de silício que dominam o mercado, devido a sua eficiência, ver Tabela 1. As células fotovoltaicas fabricadas a base de silício podem ser divididas em três grupos: células de silício monocristalino, policristalino e filmes finos. (BESSO, 2017; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Tabela 1: Eficiência das células fotovoltaicas.

Tecnologia	Eficiência (%)	
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	24,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos	20,1 ± 0,4
Compostos III A – V A (ou 13 – 15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (policristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios compostos II B – VI A (ou 12 – 16)	CIGS (CuIn _x Ga _(1-x) Se ₂) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe(filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo/nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células sensibilizadas por corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células orgânicas (filmes finos)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4 ± 0,4

Fonte: Adaptada de Pinho e Galdino, 2014.

As células de silício monocristalino são os mais empregados comercialmente, elas são fabricadas através do aquecimento dos blocos de silício puros em altas temperaturas, onde são submetidos ao processo de formação de cristal, resultando em um lingote monocristalino de silício. As células policristalinas são fabricadas através de um processo similar ao do silício monocristalino, porém menos rigoroso, o que resulta em lingote formado por um aglomerado de pequenos cristais, a Figura 15 ilustra as células de silício monocristalino e policristalino. A tecnologia de células de filme fino é relativamente recente em comparação com as do silício monocristalino e policristalino, as células de filmes finos são fabricadas através da deposição de camadas finas de silício (ou outros materiais como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe)) sobre uma base rígida ou flexível. (MUNIZ, 2017; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 15: Células fotovoltaicas de silício.



2.5.4 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

A corrente e a tensão fornecida na saída dos módulos não apresentam valores constantes, pois a tensão e a corrente de saída dependem uma da outra e a corrente além de depender da tensão, também depende da intensidade da irradiação solar incidente sobre o módulo. Além da irradiação incidente, a produção energética dos módulos fotovoltaicos também é afetada pela temperatura do módulo e outros fatores. A obtenção das características elétricas de um módulo fotovoltaico é realizado sob condições-padrão de ensaio (*Standart Testing Conditions – STC*), onde é adotado um valor de 1000 W/m^2 para a irradiação incidente e a temperatura de operação do módulo como sendo 25° C . (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

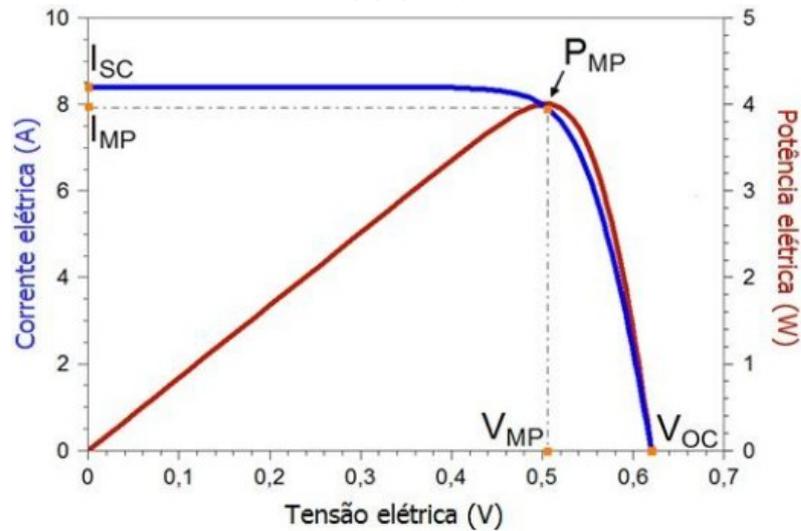
São realizados ensaios de curto-circuito e de circuito aberto para assim obter os parâmetros elétricos que caracterizam as células ou módulos fotovoltaicos, tais como a corrente de máxima potência (I_{MP}) e a tensão de máxima potência (V_{MP}), assim como a eficiência do módulo. Com base nos resultados dos ensaios, traça-se o gráfico da curva característica I-V do módulo. A curva característica segundo ABNT (2013, p. 3), “representação dos valores da corrente de saída de um gerador fotovoltaico, em função da tensão, para condições preestabelecidas de temperatura e de irradiância, também conhecida por curva I-V”.

O ensaio de curto circuito é realizado com o objetivo de obter a corrente de curto-circuito (I_{SC}). Nesse ensaio os terminais do módulo fotovoltaico são colocados em curto-circuito, resultando em um diferencial de potencial nos terminais do módulo igual a zero, fornecendo assim a máxima corrente que o módulo consegue gerar, I_{SC} depende da área da célula fotovoltaica e da irradiância solar. No ensaio de circuito aberto, a obtenção da tensão de

circuito aberto (V_{OC}), os terminais do módulo são deixados em aberto (sem a circulação da corrente elétrica), fornecendo assim valor máximo de tensão que o módulo consegue gerar, V_{OC} depende da temperatura. (ALVES, 2008; PINHO; GALDINO, 2014).

A eficiência dos módulos fotovoltaicos depende da tecnologia de fabricação, dimensão, eficiência de conversão da energia luminosa em energia elétrica, temperatura, radiação incidente e o tempo de exposição dos módulos fotovoltaicos à irradiação solar. (ALVES, 2008).

Figura 16: Gráfico de curvas características I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

A Figura 16 ilustra o gráfico da curva característica de um módulo fotovoltaico, onde é possível verificar a tensão e a corrente máxima fornecida pelo módulo (I_{SC} e V_{OC}), com base na qual se traça os gráficos das curvas características do módulo, curva característica corrente versus tensão (I-V) e a curva da potência versus tensão (P-V). A curva da potência versus tensão, curva vermelha, permite a determinação dos pontos onde a tensão e a corrente fornecem a máxima potência de saída do módulo, tensão de máxima potência (V_{MP}) e corrente de máxima potência (I_{MP}). A determinação do ponto de máxima potência é importante, pois é necessário para a determinação da eficiência dos módulos fotovoltaicos descrita pela Equação 2.

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A_p * G} * 100\% \quad 2$$

Onde:

- η → eficiência do módulo fotovoltaico em porcentagem;
- P_{MP} → potência máxima (W);

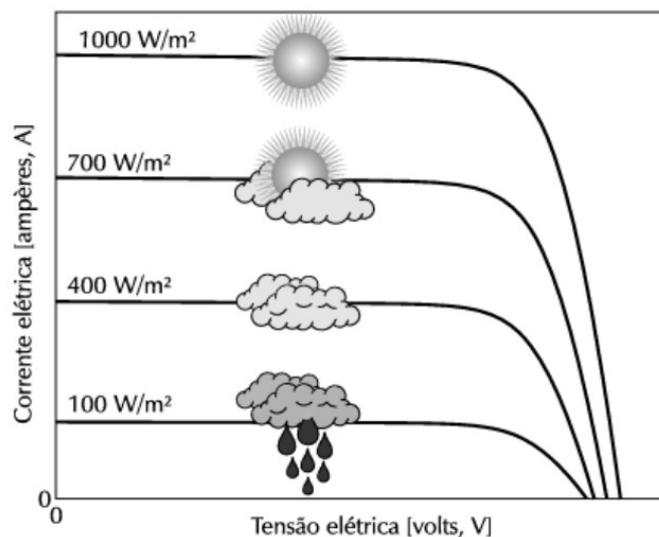
- $A_p \rightarrow$ área do módulo fotovoltaico (m^2);
- $G \rightarrow$ irradiação solar incidente, condição-padrão de teste (W/m^2).

Os painéis solares atuais contam com algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracker*). O MPPT consiste em um algoritmo que permite que o painel opere sempre no ponto de máxima potência, independentemente da irradiação incidente e a temperatura de operação do módulo sem a necessidade de movê-lo. (FAUZAN; AMIR; MIYAUCHI, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.5.4.1 Desempenho dos módulos fotovoltaicos

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é afetado por parâmetros externos tais como a irradiação solar incidente e a temperatura de operação. A produção energética é diretamente proporcional a intensidade da irradiação solar incidente, como ilustra a Figura 17, a corrente produzida aumenta linearmente com o aumento da irradiação incidente passo que a tensão de circuito aberto do módulo aumenta de forma logarítmica, considerando temperatura de operação constante, em outras palavras, a intensidade da irradiação incidente é diretamente proporcional a eficiência do módulo. (LABOURET; VILLOZ, 2010; PINHO; GALDINO, 2014).

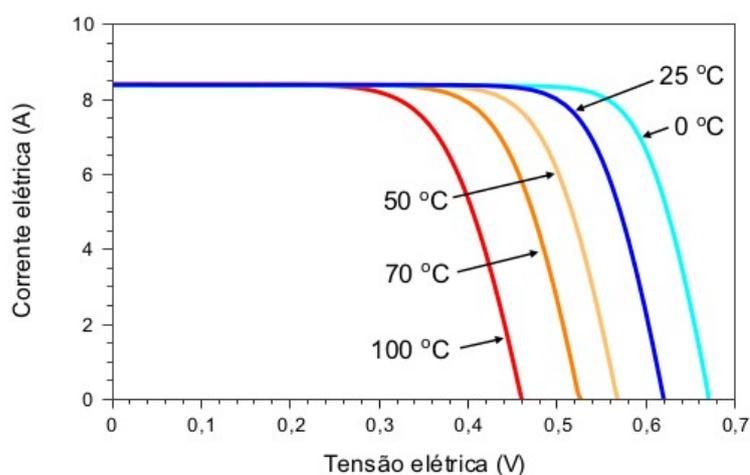
Figura 17: Influência da variação da irradiância na curva característica, $T = 25^\circ C$.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012.

A irradiação incidente em conjunto com a variação da temperatura ambiente contribuem para variação da temperatura de operação do módulo fotovoltaico. Um aumento da temperatura do módulo resulta na redução da eficiência do mesmo, pois o aumento da temperatura de operação reduz a tensão de saída do módulo, causando uma pequena elevação no valor da corrente de saída (quase que desprezível), ou seja, o aumento da temperatura de operação é inversamente proporcional a eficiência do módulo, Figura 18. (DAS, 2019; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 18: Influência da temperatura na curva característica, $G = 1.000 \text{ W/m}^2$.



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

2.5.5 Ângulo de instalação dos módulos fotovoltaicos

Devido aos movimentos da Terra, o ângulo da incidência da irradiação, altura solar, ângulo azimutal, etc., influenciam no aproveitamento da irradiação solar, recomenda-se a instalação de módulos fotovoltaicos fixos com a face voltada para o norte geográfico sempre que possível e com o ângulo de inclinação próximo da latitude geográfica do ponto da instalação com o objetivo de maximizar o aproveitamento da radiação solar incidente. (CHIN; BABU; MCBRIDE, 2011; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

[...] o aproveitamento do recurso pode ser otimizado através da orientação dos painéis. O efeito da inclinação dos coletores é mais relevante quanto maior a latitude. O ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, orientado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual [...] o posicionamento em ângulo igual à latitude do local não é regra absoluta. Se for desejado maximizar a irradiação em determinada estação ou mês, é possível orientar os coletores ao ângulo que favoreça a aplicação. (TOLMASQUIM, 2016, p. 326).

2.6 POSICIONADOR SOLAR

Posicionador solar é uma estrutura de suporte e orientação sobre a qual é montado um conjunto de módulos solares com o objetivo de maximizar a potência gerada, o posicionador solar orienta os módulos deixando a face sempre perpendicular a radiação solar. (MOUSAZADEH *et al.*, 2009; SARKER; BEG; HAQ, 2017; SINGH *et al.*, 2018).

2.6.1 Classificação dos posicionadores solares

Os posicionadores solar podem ser agrupados com base em diversos parâmetros, tais como a estratégia de rastreamento, sistema de controle e de acordo com o grau de liberdade do sistema.

2.6.1.1 Classificação quanto ao sistema de controle

Os posicionadores solares podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o sistema de controle utilizado para orientar os módulos: ativos e passivos.

Os posicionadores passivos são sistemas que não utilizam sistemas eletromecânicos para realizar a orientação dos módulos, utilizam o princípio da dilatação térmica ou transferência de massa para ajustar a posição do módulo fotovoltaico. (ARAÚJO, 2016; REIS; HAMERSCHMIDT; ROCHA, 2017).

Os posicionadores ativos são aqueles que utilizam sistemas eletrônicos (microcontroladores, microprocessadores ou controles lógicos programáveis e sensores) para determinar a posição do sol de forma contínua e assim orientar o módulo. Os posicionadores ativos contam com conjunto de sensores (resistores dependentes de luz, sensores óticos e sensores detetores de movimento) em conjunto com uma unidade lógica (sistema de controle, microcontroladores, microprocessadores e computador) que realiza o processamento dos dados fornecidos pelos sensores e servomecanismo (motores, motores de passo e servomotores) que executam a atividade de orientar os módulos de acordo com o resultado de processamento. (RIBEIRO *et al.*, 2013).

2.6.1.2 Classificação quanto à estratégia de rastreamento

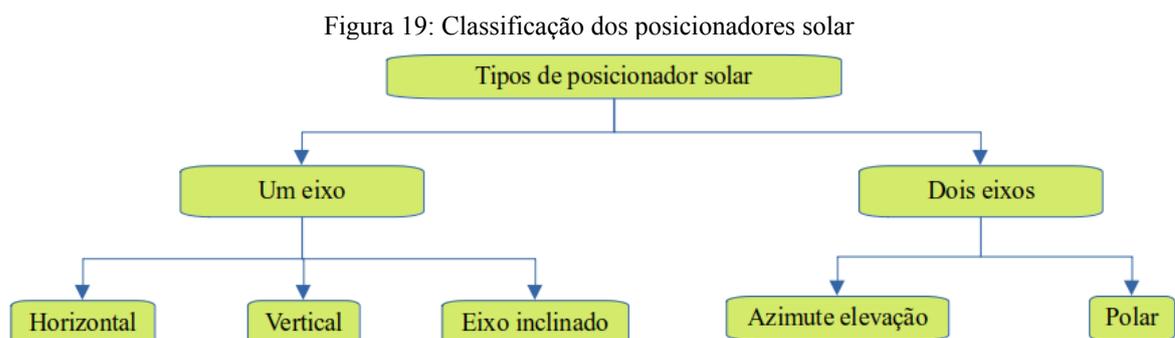
Os posicionadores podem ser agrupados em dois grupos de acordo com a estratégia de controle: circuito aberto (*open loop*) e circuito fechado (*closed loop*).

Os posicionadores em circuito fechado (*closed loop*) usam controladores lógicos programáveis ou computador de bordo, contendo os dados relacionados a localização geográfica, dados da irradiação solar e a posição do sol durante o período de um ano na programação do sistema, que com a base nesses dados, o posicionador consegue realizar a orientação dos módulos de forma mais precisa descartando o uso de sensores. (SINGH *et al.*, 2018).

Por outro lado os posicionadores circuito aberto (*open loop*), consistem basicamente da combinação de microprocessador ou microcontrolador com sensores, os posicionadores *open loop* operam em tempo real e tendem a ser menos preciso, podendo sofrer interferência de outras fontes luminosas, dependendo do sensor utilizado e são mais baratos em relação aos *closed loop*. (CHIN; BABU; MCBRIDE, 2011).

2.6.1.3 Classificação quanto ao grau de liberdade

Os posicionadores são divididos em dois grupos de acordo com o número de eixos de rastreamento: podendo ser de um eixo (vertical, horizontal e eixo inclinado) ou de dois eixos (polar e azimutal), Figura 19. (PRINSLOO; DOBSON, 2015; SINGH *et al.*, 2018). Os sistemas de posicionamento de um eixo podem ser configurados de três modos: configuração horizontal (este-oeste ou norte-sul), vertical (zênite) e eixo inclinado. De acordo Singh *et al.*, (2018), os sistemas fixos possuem vantagem em relação aos sistemas de posicionadores, pois ambos apresentam instalação complexa e os custos com a manutenção aumentam a medida que aumenta o número de eixos moveis.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

2.6.2 Plataforma Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica *open source* (código aberto) de desenvolvimento e prototipagem, baseada em *hardware* e *software easy-to-use* (fácil de usar). As placas Arduino possuem linguagem de programação semelhante a linguagem de programação C++, ela é baseada em linguagem *Wiring* porém conta com uma biblioteca de funções próprias, salvas na plataforma de desenvolvimento próprio, o Arduino IDE. (WHAT IS ARDUINO? | ARDUINO, [s. d.]).

Wiring é uma estrutura de programação código aberto destinado a microcontroladores, que permiti a comunicação entre *software* e *hardware*, controlando componentes eletrônicos tais como sensores, motores, servomotores. (WIRING, [s. d.]).

Para Oliveira e Zanetti (2015), “A placa Arduino é muito similar à de um computador de pequeno porte, sendo composto por um microcontrolador, memória RAM, armazenamento secundário (memória flash) e clock, entre outras funcionalidades.”.

A Figura 20 ilustra uma placa Arduino Uno, que conta com um microcontrolador ATmega 328-PU de 8 bits, fabricada pela AVR Microcontrollers, a placa possui 14 pinos que podem ser utilizados como entradas ou saídas digitais (pinos 1 a 14) e os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11 que podem ser utilizados para gerar sinais de pulso *Pulse Width Modulation* – PWM (modulação de largura de pulso), os pinos A0 a A5 correspondem às entradas analógicas. A placa ainda conta com pinos de alimentação com tensões de 3,3 e 5 volts (V) e o pino GND (Ground – Terra). (ARDUINO UNO REV3 | ARDUINO OFFICIAL STORE, [s. d.]; MCROBERTS, 2011; OLIVEIRA; ZANETTI, 2015; QUEIROZ, 2017).

Figura 20: Arduino Uno REV3.



Fonte: Arduino, 2021.

O microcontrolador Atmega 328P, Figura 22, possui 28 pinos, sendo 23 pinos de uso geral, entrada e saída e PWM, conta com 32 KB de memória flash programável com funções *Read-While-Write* (Ler Enquanto Escreve) e 2 KB de memória RAM. (ATMEL, 2016).

Figura 21: Microcontrolador Atmega 328P.



Fonte: Microchip, 2021.

A gravação dos códigos no microcontrolador é feita por intermédio de *bootloader*, que é um *firmware* já instalado no microcontrolador que permite a instalação de novos códigos no microcontrolador através de uma interface de programação. (ARDUINO - BOOTLOADER, [s. d.]).

2.6.2.1 Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM)

A modulação por largura de pulso – PWM consiste em uma técnica de controle (utilizado em aplicações com motores que exigem níveis de tensão preciso) que permite variar a largura do sinal de controle (pulso), através da comparação de um sinal analógico de entrada (função senoidal por exemplo) e um sinal digital de referência (função dente de serra). (MCROBERTS, 2011).

2.6.3 Resistor Dependente de Luz (*Light Dependent Resistor* – LDR)

Os resistores dependente de luz são elementos passivos de um circuito elétrico, são resistores cujo o valor da resistência varia de acordo com a intensidade da iluminação incidente sobre eles. LDR's são construídos a base de um material semiconductor, possuem princípio de funcionamento semelhante à das células fotovoltaicas. Os LDR's em um ambiente escuro apresentam um valor de resistência muito alto, ocorrendo o inverso a medida que aumenta a luminosidade sobre o dispositivo, ver Figura 23. (MCROBERTS, 2011; QUEIROZ, 2017).

Figura 22: Resistor dependente de luz - LDR.



Fonte: Grafeno componentes eletrônicos, 2021.

2.6.4 Servomotor

Servomotor é um motor com um mecanismo de controle da posição, possui rotação limitada de 0° e 180° , podendo existir alguns com rotação contínua. Os servomotores possuem três terminais, sendo dois para alimentação (5 V) e uma entrada PWM para o controle da posição do motor. (MCROBERTS, 2011).

Figura 23: Servomotor (Micro servo 9g).



Fonte: Casa da Robótica, 2021.

2.6.5 PVsyst

PVsyst é um *software* pago, com versão de teste de 30 dias. O *software* é utilizado por arquitetos, engenheiros e pesquisadores, por ser um dos *softwares* mais completo existente para a realização de análise financeira, análise técnica, dimensionamento e simulação de projetos solares fotovoltaicos, contendo no seu banco de dados um vasto dados de módulos fotovoltaicos comerciais assim como módulos genéricos (do próprio *software*). O software permite a realização de estudos voltados para sistemas fotovoltaicos isolados, conectados a rede e sistemas de bombeamento, fornecendo relatórios de perdas, diagramas de ganhos e

dados da irradiação solar referente ao local para onde se deseja realizar os estudos. (PVSYST – LOGICIEL PHOTOVOLTAÏQUE, [s. d.]).

Ele permite dimensionar o tamanho da instalação tendo em conta a radiação solar com base em sua localização, o que permite o desenho em 3D e levando em consideração a projeção de sombreamentos através de simulação com o movimento do sol durante o dia.

O programa também dispõe da análise econômica utilizando custos reais dos componentes, os custos adicionais e condições de investimento em qualquer moeda. PVSyst é uma ferramenta paga, mas é possível obter gratuitamente por um período de um mês para teste e, em seguida, se não for adquirida uma licença, o usuário terá que utilizá-lo em modo de demonstração. (MUNIZ, 2017, p. 45)

2.6.6 PSIM

PSIM é um software de simulação de circuitos elétricos, *drivers* de motores, eletrônica de potência e também pode ser usado no desenvolvimento de projetos voltado a energias renováveis (energia fotovoltaica – mini-grid). O software é pago, porém contam com uma versão de avaliação gratuita para um período de trinta (30) dias. (*WHO USES PSIM | POWERSIM, INC, [s. d.]*).

2.6.7 Estado da arte dos seguidores solares

Sefa, Demirtas e Çolak (2009), desenvolveram um posicionador solar do tipo *closed loop*, do tipo este-oeste com inclinação ótima de 32°, em Ancara Turquia. Os autores também desenvolveram um *software* computacional para monitorar e registrar os dados da corrente, tensão e a potência produzida pela unidade. O sistema de rastreamento desenvolvido conta com um circuito ponte em H de transistores como a unidade de processamento, motor de corrente contínua de 24 V e 50 W com duas caixas de redução de velocidade e LDR's acoplado a um conjunto de 14 módulos fotovoltaicos com uma potência nominal de 185 W cada (potência total de 2,5 kW).

Os autores realizaram a coleta de dados para um intervalo de 10 dias, onde nos primeiros 5 dias, o sistema foi colocado para funcionar como unidade fixa com inclinação de 32°, onde obtiveram uma produção energética diária de 14 kWh. Nos cinco dias restantes o posicionador foi colocando em funcionamento onde a produção energética diária foi de 17 kWh, os autores ainda estimaram um aumento da produção energética anual na faixa de 45%

(3,45 MWh) como resultado da adição do sistema de posicionamento quando comparado ao sistema fixo.

Bahrami, Okoye e Atikol (2017), realizaram um estudo econômico e energético para implementação de sete (7) sistemas de rastreamento solar nas regiões de baixa altitude, Nigéria em específico. O estudo foi feito com base nos dados de irradiação solar obtidos através de modelos estatísticos de estimativa da irradiação solar para nove (9) localidades na Nigéria. De acordo com os resultados obtidos, os autores chegaram a conclusão de que o sistema de posicionamento de um eixo (Este-oeste) apresenta maior custo benefício pois apresentou bons resultados em termos de aproveitamento da irradiação solar além de ser mais barato, já o sistema de rastreamento em dois eixos, apresentou maiores ganhos energéticos porém apresenta um alto custo.

Muniz (2017), realizou estudo de caso para implementação de uma usina fotovoltaica de grande porte (150 MW) para o município de Pentecoste no interior do estado de Ceará. O autor realizou simulações computacionais para a central com os módulos fixos com inclinação de 15° e para a central com as mesmas características porém com sistema de orientação dos módulos do tipo horizontal norte-sul no *software* PVsyst, onde obteve ganho energético na faixa de 25% para o sistema com posicionador solar em relação ao sistema fixo e perdas relacionadas a temperatura de operação dos módulos de 8,5% e 9,7% para sistema fixo e com posicionador respectivamente.

Alves (2008), desenvolveu um sistema de rastreamento e posicionamento de módulos fotovoltaicos do tipo *closed loop* de dois eixos, azimute – elevação, onde realizou um estudo comparativo entre um sistema fixo e outro com sistema de posicionamento com dois módulos fotovoltaicos da Shell Solar (modelo SE 50) de 50 Wp, conectados com carga resistiva com potência superior à dos módulos (lâmpadas incandescentes de 12 V/55 W), onde foi observado um ganho médio de 53% na produção de energia pelo módulo com posicionamento de dois eixos em relação ao módulo fixo. O autor também investigou a influência da temperatura nas características elétricas do módulo com posicionador, que segundo o autor o fato do modulo estar sempre perpendicular aos raios solares, isso não influenciou nas propriedades elétricas do modulo.

Em termos do consumo energético dos sistemas de posicionamento solar, levando em conta o circuito de controle e o motor, estima-se um consumo energético inferior a 3% da energia total produzida pelos módulos, pois o motor elétrico só funciona alguns minutos durante um dia, realizando o movimento de uma em uma hora que corresponde ao

deslocamento de 15° por hora, movimento aparente do Sol no céu. (ABDALLAH, 2004; CHIN; BABU; MCBRIDE, 2011).

Visando reduzir ainda o consumo energético dos posicionadores, Abdallah e Nijmeh (2004), desenvolveram um sistema de posicionamento solar *closed loop* de dois eixos em Amã, Jordânia, os autores programaram o microcontrolador para realizar a divisão das horas de insolação em quatro partes e determinar a melhor posição do módulo com base nos dados da irradiação solar pré-programadas na unidade de controle, de modo a maximizar a produção energética e reduzir o consumo do sistema de posicionamento. Os autores constataram um aumento médio de 41% da energia produzida pelo módulo com o sistema desenvolvido em relação a um módulo fixo com uma inclinação de 32° .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento do protótipo de posicionador solar de um eixo foram usados os materiais listados abaixo:

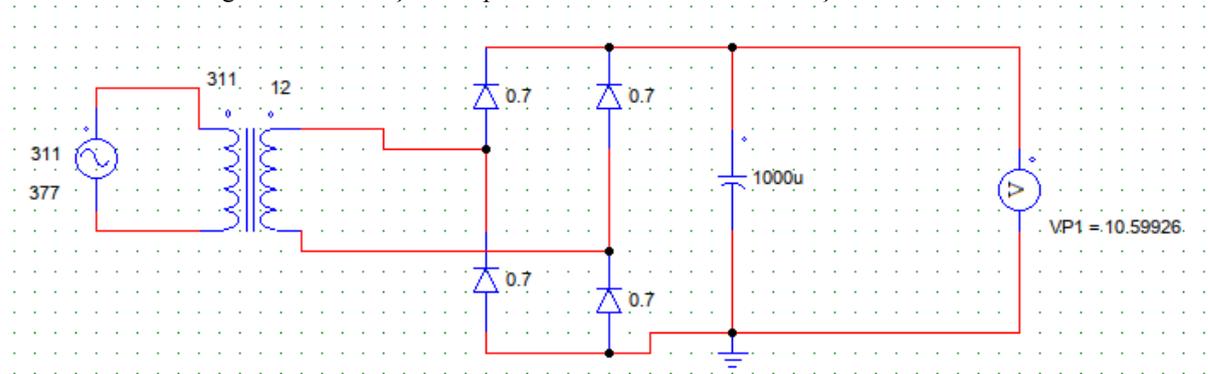
- 1 Placa *Arduíno Uno*;
- 1 Microcontrolador ATmega 328P-PU;
- 2 Capacitores cerâmicos de 22 pF;
- 3 Resistores de 10 k Ω ;
- 1 Oscilador cristal 16 MHz;
- 2 Resistores dependentes de luz (*Light Dependent Resistor – LDR*);
- 1 Servomotor (micro-servo 9G – SG90);
- Software Arduíno IDE;
- Software Pvsyst;
- Fonte de alimentação:
 - 4 diodos 1N4007;
 - 1 Capacitor eletrolítico 1000 μ F/ 25 V;
 - 1 Regulador de tensão LM7805;
 - 1 Transformador 220 V/12 V.

3.2 Metodologia

3.2.1 Fonte de alimentação

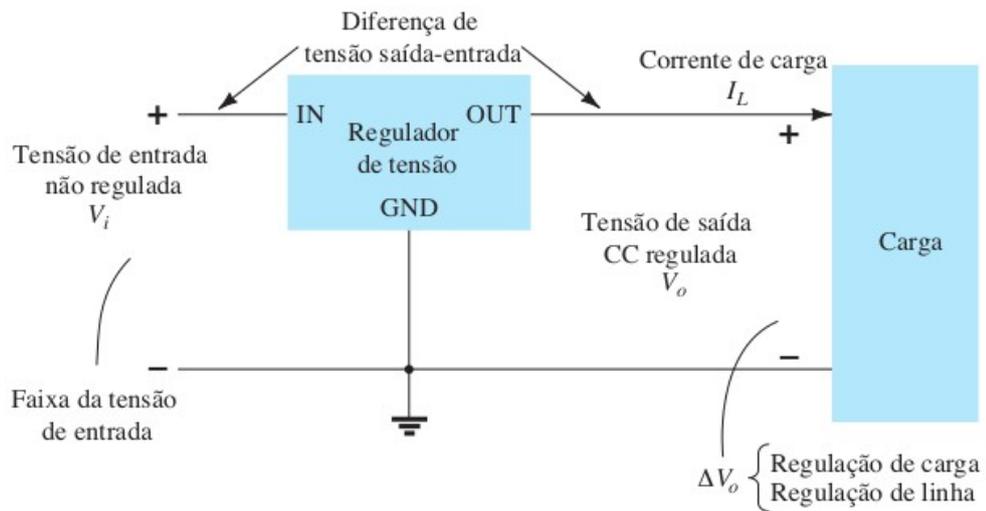
Projetou-se uma fonte de alimentação de 5 V em corrente contínua para alimentar o protótipo com o auxílio do *software PSIM*, Figura 24. Utilizou-se um transformador abaixador (220:12), que foi conectado a uma ponte de diodos retificadores de onda completa. A saída do retificador foi conectada em paralelo com um filtro capacitivo (1000 μ F/25 V). Usou-se um circuito integrado regulador de tensão de três terminais, com tensão de saída em corrente contínua de 5 V (LM7805), em paralelo com o filtro capacitivo, para fornecer um valor de tensão fixa para o protótipo, Figura 25.

Figura 24: Simulação computacional da fonte de alimentação usando *PSIM*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 25: Configuração das conexões do regulador de tensão integrado.



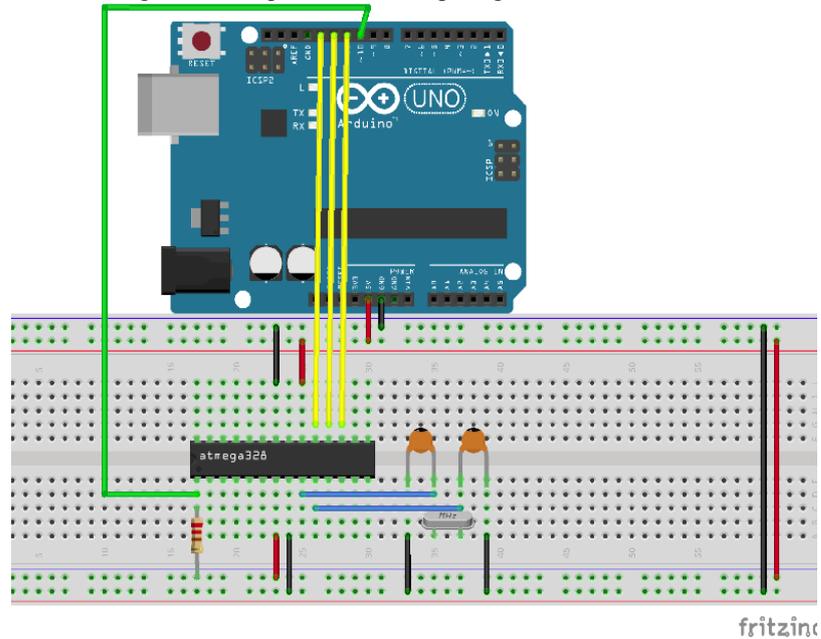
Fonte: Boylestad e Nashelsky, 2013.

3.2.2 Montagem do protótipo

Realizou-se a montagem do circuito do *Arduíno to Bread Board* (Arduíno para placa de prototipagem) a seguindo o esquema apresentado na Figura 26, a montagem do Arduíno na placa de prototipagem, consiste na montagem de um circuito com um microcontrolador Atmega 328P com um oscilador cristal de 16 MHz conectado nos pinos 9 e 10 do microcontrolador e dois capacitores cerâmicos de 22 pF em paralelo entre si e conectados ao oscilador cristal. Os pinos 7, 20 e 21 do microcontrolador foram conectados ao terminal positivo da fonte, pinos 8, 22 e os terminais dos capacitores cerâmicos foram conectados no terminal negativo da fonte. Conectou-se um resistor de 10 kΩ no pino 1 do microcontrolador com a finalidade de impedir que o microcontrolador reinicie de modo automático. Em seguida

fez-se a gravação do *bootloader* no microcontrolador usando Arduino IDE, seguindo as orientações disponibilizados no site da Arduino para montar um Arduino na placa de prototipagem. (“Arduino - ArduinoToBreadboard”, [s.d.]).

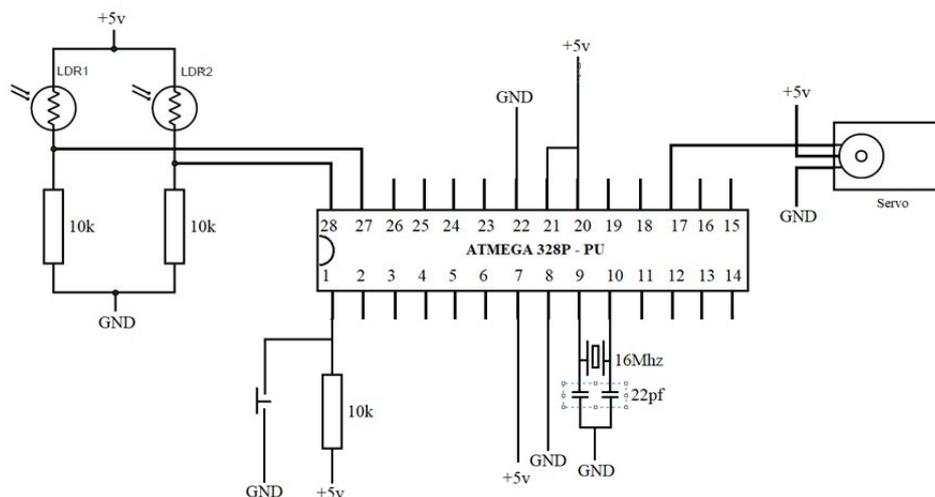
Figura 26: Esquema utilizado para gravar o *bootloader*.



Fonte: Adaptado do Arduino, 2020.

Após a gravação do *bootlaoder*, realizou-se a montagem do protótipo, como ilustra a Figura 27. No circuito dos sensores, conectou-se um resistor de 10 kΩ em série com um LDR que foram conectados em paralelo com outro resistor de 10 kΩ em série com um LDR, os terminais dos resistores foram conectados no terminal negativo da fonte e os LDR's conectados no terminal positivo da fonte. Em seguida conectou-se aos pinos 28 e 27 (entradas analógicas) do microcontrolador ao nó entre os resistores e os LDR's, permitindo assim que o microcontrolador realize a leitura da diferença de corrente entre os dois sensores. Por fim, a entrada do sinal PWM do servo motor foi conectada no pino 17 (saída PWM) do microcontrolador. Em seguida foi realizada a gravação do código fonte do projeto no microcontrolador.

Figura 27: Diagrama do circuito do posicionador solar.



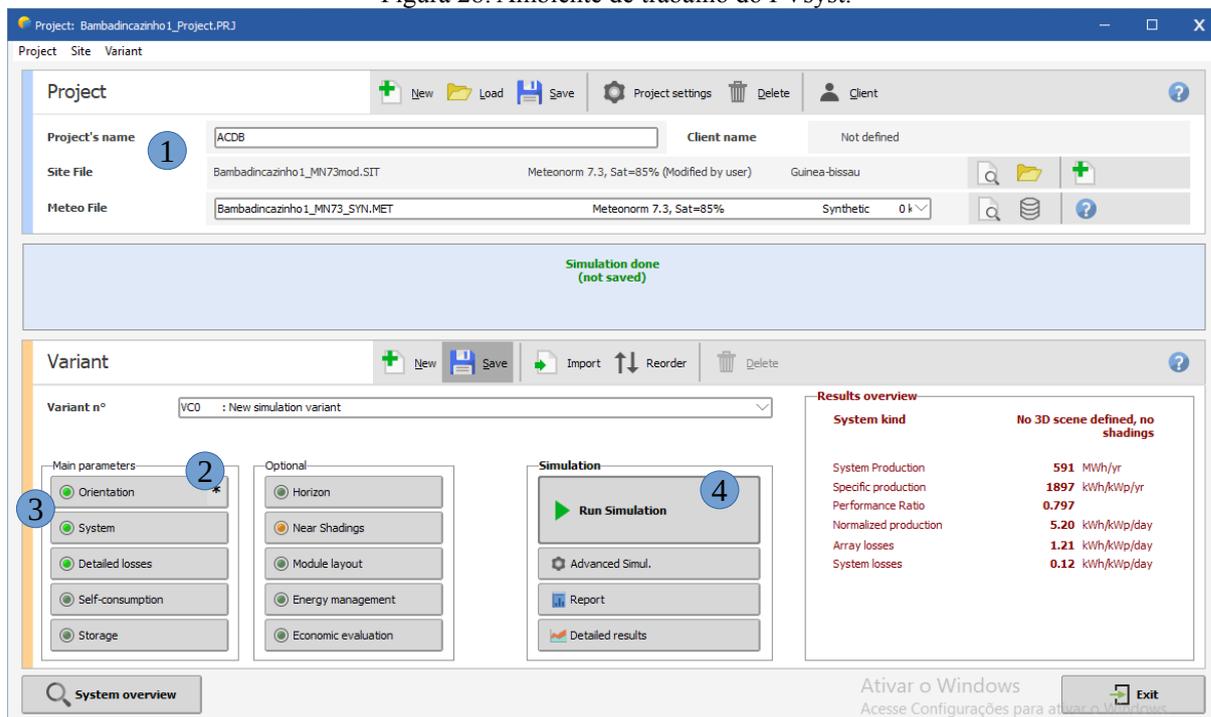
Fonte: Electronics Hub, 2020.

3.3 Simulação computacional

Adotou-se por realizar a simulação computacional devido à impossibilidade para a realização dos ensaios experimentais no terreno, como a coleta de dados de irradiação, a produção energética média anual e os possíveis ganhos energéticos impulsionados pela adição do sistema de posicionamento automático. A Figura 28 ilustra a interface do PVsyst, a simulação foi realizada em etapas de acordo com a numeração apresentada na ilustração.

- 1) Na primeira etapa da simulação realizou-se a determinação geográfica do ponto da instalação da unidade geradora e a seleção dos dados da irradiação (foram selecionados os dados da Meteonorm 7.3);
- 2) Na segunda etapa foi determinado a orientação dos módulos, sistema fixo e com posicionador solar de um eixo do tipo horizontal este-oeste.
- 3) Na terceira parte da simulação fez-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico, onde foram especificados os dados da potência nominal da unidade geradora, modelo e tipo de módulo fotovoltaico a ser usado na unidade e o modelo dos inversores.
- 4) Após o cumprimento das etapas acima mencionada, fez-se a simulação, que no final o software gerou um relatório contendo os dados referentes aos ganhos energéticos para cada configuração (orientação dos módulos).

Figura 28: Ambiente de trabalho do PVsyst.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O dimensionamento da unidade geradora no *PVsyst* pode ser feito com base na potência total da unidade geradora ou de acordo com a área disponível para o projeto. A simulação foi realizada dimensionando a central fotovoltaica selecionada com base na potência nominal instalada 312 kWp, pois como não possível obter informações relacionadas à central (marca, modelo e o número dos módulos fotovoltaicos, assim como os dados dos inversores), realizou-se a simulação para módulos fixos, com ângulo de inclinação de 12° com a face voltada para o norte geográfico de acordo com a recomendação.

Após a simulação do sistema fixo, foi feita a simulação para módulos solares com sistema de posicionamento solar de um eixo, do tipo horizontal este-oeste, para os mesmos equipamentos fotovoltaicos. Fez-se uma terceira simulação usando sistema de posicionamento de um eixo, do tipo horizontal este-oeste com uma inclinação de 12°. Após o fim de cada simulação, o software fornece relatórios com dados médios da produção de energia anual, produção energética específica, produção energética média mensal e a produção nominal na saída dos módulos (STC). Todas as simulações foram feitas considerando a operação dos módulos nas condições STC.

4 RESULTADOS

4.1 Fonte de alimentação e funcionamento do protótipo

Durante a montagem da fonte, realizou-se uma série de medições da tensão e da corrente na saída do filtro capacitivo com auxílio de um multímetro de modo a garantir que a saída do filtro seja um valor intermediário entre a tensão mínima e máxima especificada no *datasheet* do regulador de tensão (min.: 7 V; máx.: 25 V). Após os testes, realizou-se a montagem do regulador de tensão, realizou-se mais medições de tensão de saída do regulador, Tabela 2.

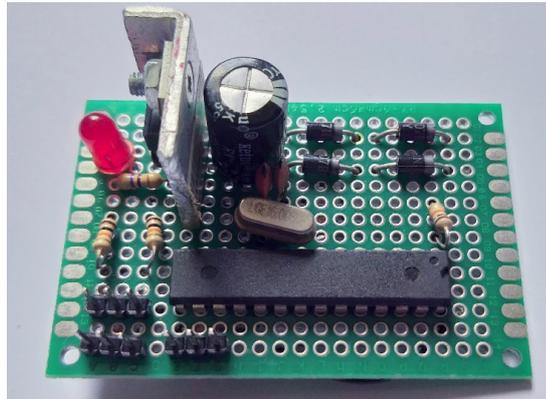
Tabela 2: Resultado dos testes da fonte de alimentação.

	Teste	Tensão (V)	Corrente (A)
Saída do filtro capacitivo	1º	10,599	2,3
	2º	11,05	2,4
	3º	11,2	2,34
Saída do regulador de tensão	1º	5,01	1
	2º	5,02	1
	3º	5	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com base nos dados dispostos na Tabela 2, a fonte projetada gera uma tensão média de 5,01 V e uma corrente de 1 A, disponibilizando uma potência média de 5 W. A Figura 29 ilustra o protótipo final, montado na placa eletrônica após os testes, onde consta a fonte de alimentação (diodos retificadores, filtro capacitivo, circuito integrado regulador de tensão e LED de sinalização) com exceção do transformador, a unidade lógica, pinos de conexão para os sensores e para a alimentação do servomotor assim como a saída PWM da unidade lógica.

Figura 29: Protótipo de posicionador solar desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O algoritmo apresentado na Figura 30, permite que o microcontrolador lê a diferença da corrente que circula no circuito dos sensores (circuito principal), causadas pela diferença da irradiação incidente sobre os sensores, LDR's, e através dos dados coletados, o microcontrolador emite sinal de pulso PWM, corrigindo a posição do módulo, fazendo o servomotor girar no sentido horário ou anti-horário, uniformizando a radiação incidente sobre os sensores. O sistema desenvolvido realiza o rastreamento do sol e a correção da posição do módulo fotovoltaico de modo contínuo.

Figura 30: Código fonte do projeto.



```

posicionador $
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int ldr1 = 4;
int ldr2 = 5;
int val1, val2;
int pos = 90;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  myservo.attach(11);
  Serial.begin(9600);
  myservo.write(pos);
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  val1 = analogRead(ldr1);
  val2 = analogRead(ldr2);
  val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 180);
  val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 180);
  if (val1 > (val2+50)){
    if (pos < 180) ;
    pos = pos+1;
    myservo.write(pos);
    Serial.println("backward");
    delay(10);
  }
  else if (val2 > (val1+50)){
    if (pos > 0)
    pos = pos-1;
    myservo.write(pos);
    Serial.println("forward");
    delay(10);
  }
}

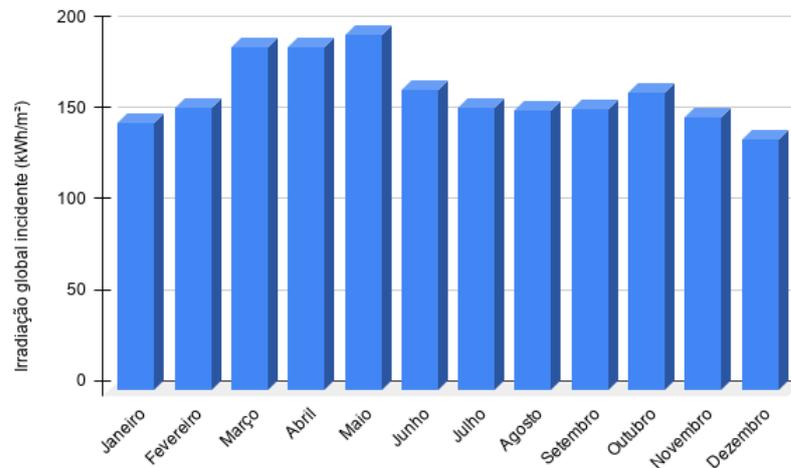
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

4.2 Simulação

A simulação foi realizada para a cidade de Bambadinca, a determinação do ponto de instalação foi realizada com auxílio do Google Maps, onde o ponto foi marcado e os dados da localização (latitude e longitude) foram coletados e inseridos posteriormente no *software PVsyst* e com base no local adotado para a simulação, o software forneceu dados da irradiação incidente média mensal (direta e difusa) para o período de um ano, ver Figura 31, assim como a irradiação incidente média anual. O valor médio da irradiação anual fornecido pelo *software* foi de 1951,7 kWh/m², valor que se encontra na média anual do país que é na faixa de 1800 a 2000 kWh/m².

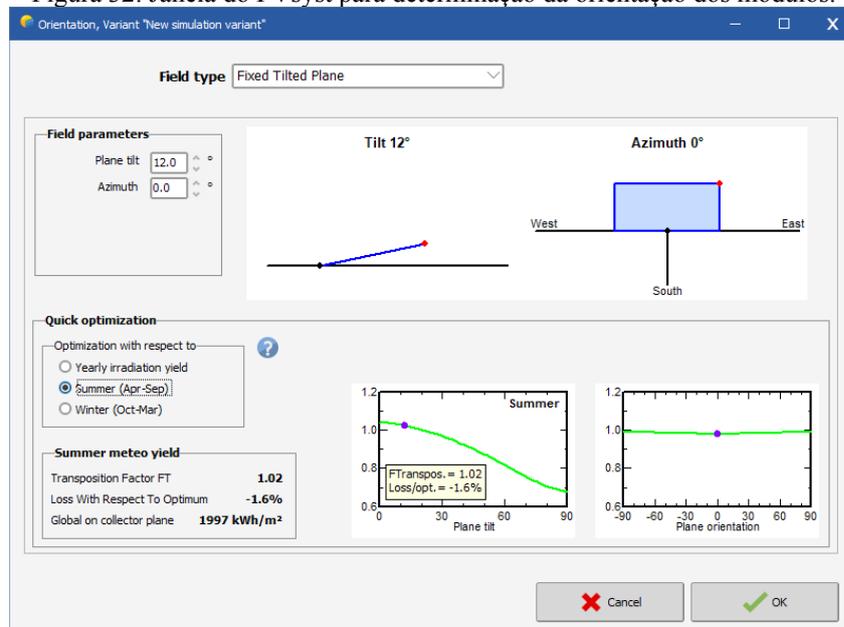
Figura 31: Irradiação solar direta média mensal na cidade de Bambadinca.



Fonte: Elaborado pelo autor no PVsyst, 2021.

Apos a determinação do ponto da instalação da unidade geradora no *PVsyst*, a determinação da orientação dos módulos foi realizada, Figura 32 apresenta a janela onde foi selecionado o sistema a ser utilizado para a orientação dos módulos (*field type*), sistema fixo com inclinação ótima (*plane tilt*), sistemas de rastreamento de um eixo e a otimização da produção através da definição das estações do ano (verão abril – setembro) do ponto.

Figura 32: Janela do PVsyst para determinação da orientação dos módulos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A produção energética dos módulos depende de fatores como a irradiação incidente e a área dos módulos. De acordo com ALER (2018), a central fotovoltaica de Bambadinca

conta com uma área de 1500 m², a escolha do módulo durante a simulação foi feita de modo a aproximar a área total da simulação com a área da central, para isso o valor da potência total da central foi mantido fixo, de modo a tornar a simulação mais realista possível. O menor valor da área obtida foi de 1692 m² com os módulos fotovoltaicos monocristalino de 300 Wp e 60 células, para um total de 1040 unidades, ver Tabela 3. Adotou-se esse módulo solar para a simulação e um modelo de inversor genérico de 30 kWac de potência nominal.

O módulo adotado na simulação, na condição STC, apresenta valores da corrente de máxima potência (I_{MP}) e tensão de máxima potência (V_{MP}) iguais a 9,52 A e 31,5 V respectivamente, o que resulta em uma potência máxima de 300,1 W.

Os modelos genéricos foram adotados pois não foi possível obter dados técnicos referentes aos módulos e inversores em uso na central. Os resultados apresentados da simulação não leva em conta as perdas do sistema como um todo, isso porque as perdas variam de acordo com os equipamentos empregados (módulos, inversores e fiação) e devido a falta de dados referente aos modelos e das fabricantes dos equipamentos do projeto, adotou-se o uso de módulos e inversores genéricos fornecidos pelo *software* e as perdas foram desconsideradas, apresentando assim apenas os dados referente a produção energética na saída dos módulos nas condições STC.

Figura 33: Janela de configuração do sistema (potência, seleção de módulos e inversores).

The screenshot shows the configuration window for a PV system. It includes the following sections and data:

- Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 14°, Azimuth: 0°.
- Pre-sizing Help:**
 - No sizing
 - Enter planned power: 0.6 kWp
 - ... or available area: 0 m²
- Select the PV module:**
 - Prod. from 2013: [dropdown]
 - Sort modules: Power, Technology
 - Generic: [dropdown]
 - 30 Wp 15V, Si-poly, Poly 30 Wp 36 cells, Until 2030, Typical
 - Sizing voltages: V_{mpp} (60°C) 13.4 V, Voc (-10°C) 23.9 V
- Select the control mode and the controller:**
 - Universal controller: Generic
 - MPPT power converter
 - Operating mode: Direct coupling, MPPT converter, DC-DC converter
 - MPPT 1000 W, 24 V, 28 A, 10 A, Universal controller with MPPT conve
 - Note: The operating parameters of the universal controller will automatically be adjusted according to the properties of the system.
- PV Array design:**
 - Number of modules and strings:
 - Mod. in series: 2 (should be: No constraint)
 - Nb. strings: 10 (between 9 and 13)
 - Nb. modules: 20, Area: 5 m²
 - Operating conditions:
 - V_{mpp} (60°C): 27 V
 - V_{mpp} (20°C): 32 V
 - Voc (-10°C): 48 V
 - Plane irradiance: 1000 W/m²
 - I_{mpp} (STC): 21.0 A
 - I_{sc} (STC): 24.4 A
 - I_{sc} (at STC): 24.0 A
 - Summary:
 - Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 0.7 kW
 - Array nom. Power (STC): 600 Wp

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 3: Características dos módulos fotovoltaicos e inversores utilizados na simulação.

Modulo fotovoltaico		Inversor	
Fabricante	Genérico	Genérico	
Modelo	Monocristalino 300 Wp 60 células	30 kWac	
Base de dados do PVsyst			
Potência nominal unitária	300 Wp	30 kWac	
Número de unidades	1040	8	
Potência nominal (STC)	312 kWp	240 kWac	
Arranjos	52 conexões x 15 arranjos em série		
Área	1692 m ²	Tensão de operação	450 – 700 V
		Razão da potência nominal (DC-AC)	1,30
		Razão da potência nominal	1,30
Condições de operação (50° C)			
P_{MPP}	281 kWp		
V_{MPP}	569 V		
I_{MPP}	494 A		
Potência total da unidade			
Nominal (STC)	312 kWp	240 kWac	
Total	1040	8	

Fonte: Elaborado pelo autor no PVsyst, 2021.

4.2.1 Resultados das simulações para módulos fixos e com posicionador

Após o preenchimento dos dados necessários para a realização da simulação, seguindo as etapas descritas no item 3.3, o software gerou um relatório para cada simulação realizada (simulações da unidade geradora com os módulos fixos com inclinação ótima de 12° em relação ao solo e com a face voltada para o norte geográfico, com sistema com rastreamento solar de um eixo e para a unidade geradora com rastreamento solar de um eixo com uma inclinação de 12° em relação), apresentado gráficos e Tabelas da produção energética da central, com base nesses dados montou-se a tabela 4.

Os sistemas com posicionadores solares produzem mais energia em relação ao sistema fixo, isso porque o sistema fixo consegue captar a máxima irradiação ao meio dia solar, momento em que o Sol se encontra sobre a zênite local, além do mais, módulos fotovoltaicos com posicionadores solar começam a gerar eletricidade relativamente cedo pela

manhã, acompanhando o movimento do Sol até o momento em que este fica se oculta no horizonte, passo que o sistema fixo começa produzindo um pouco mais tarde, faixa entre 8 h a 9 h, atingindo o pico da produção ao meio dia solar.

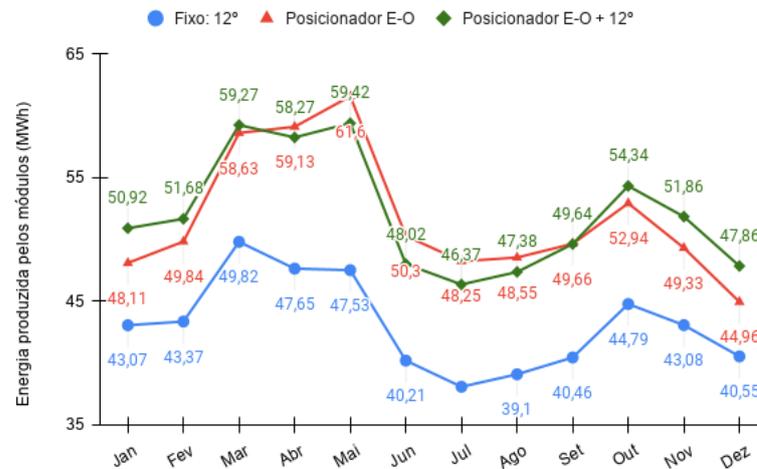
Tabela 4: Resultado das simulações para a unidade geradora.

	Produção média anual (MWh/ano)	Produção específica (kWh/kWp/ano)	Ganho percentual em relação ao sistema fixo com inclinação ótima (%)
Sistema fixo com inclinação ótima de 12° para o norte geográfica	518,05	1547	
Sistema com rastreamento solar de um eixo	648,93	1940	25,26
Sistema com rastreamento solar de um eixo com uma inclinação de 12° para o norte geográfico	652,35	1950	25,92

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

De acordo com a ALER (2018), estima-se que a produção específica da eletricidade através da tecnologia fotovoltaica para a região de Bafatá seja de 1584 kWh/kWp/ano para uma irradiação direta média anual de 2049 kWh/m²/ano, a tabela 4 apresenta dados da produção específica para cada configuração, onde é possível verificar que a produção específica da simulação para módulos fixos são relativamente maiores em relação a produção específica estimada para a região, isso devido à diferença entre a área da central e a área utilizada na simulação e pelo uso do posicionador, o que aumenta o rendimento energético da unidade geradora.

Figura 34: Gráfico da produção energética dos arranjos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com base na Figura 34, é possível verificar os ganhos energéticos dos sistemas com posicionador solar em relação ao sistema fixo. O arranjo com posicionador inclinado, produz mais energia nos meses de maior índice de irradiação média, que corresponde aos meses que fazem parte da estação seca, o aumento da produção para esse arranjo quando comparado ao arranjo com posicionador de um eixo está relacionado com a inclinação ótima de 12°.

De acordo com os resultados da simulação, a central fotovoltaica com posicionador solar produz 25,56% mais energia em relação ao sistema fixo, passo que a central com posicionador e com inclinação de 12° gera 25,92% energia a mais quando comparado ao central com módulos fixos em um ângulo ótimo. A Figura 34 também demonstra que os módulos com posicionadores solares conseguem produzir mais energia em meses com níveis de irradiação média mensal relativamente baixas, que correspondem aos meses de maio a outubro (época da chuva), quando comparadas ao sistema instalado em estrutura fixa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o desenvolvimento das diferentes etapas para o desenvolvimento do projeto pode-se concluir que todos os objetivos foram alcançados: i. construção da unidade lógica, ii. programação da unidade lógica e iii. simulação computacional para a cidade de Bambadinca. O protótipo desenvolvido funcionou de acordo com o esperado. O sistema desenvolvido caracteriza-se pela simplicidade, versatilidade, eficiência além da facilidade na programação da unidade lógica.

O protótipo desenvolvido pode ser facilmente adaptada para realizar o posicionamento de módulos solares em dois eixos através da adição de mais dois LDR's nas entradas analógicas do microcontrolador e um servomotor conectada a uma das saídas analógicas, aumentando a complexidade da programação do microcontrolador e da estrutura de suporte e instalação dos módulos. Como apontam os estudos realizados por vários autores, sistemas de posicionamento solar de dois eixos geram mais energia quando comparado aos sistemas de um eixo e sistemas fixos, porém o aumento de número de eixos resulta em aumento do consumo energético do sistema de posicionamento e custos com a manutenção do sistema.

Uma das desvantagens do protótipo desenvolvido é a sua propensão a sofrer interferências de outras fontes luminosas por usar sensor de luminosidade para detetar a posição do sol, ou ainda apresentar dificuldades para determinar a posição do sol em dias nublados ou chuvosos, essas desvantagens podem ser contornados alterando a estratégia de rastreamento do sistema desenvolvido de *open-loop* para *closed-loop*, através da substituição dos LDR's pelo módulo *Real Time Clock* (RTC – relógio em tempo real), e modificando a programação do microcontrolador, pois o rastreamento da posição do sol não será mais feita através de sensores e sim através de fórmulas baseadas na localização geográfica do ponto da instalação da unidade geradora, o que aumentaria a confiabilidade do sistema de forma significativa.

As perdas não foram levados em conta durante a simulação, devido à ausência de dados técnicos da central fotovoltaica, pois as perdas ôhmicas e as perdas relacionados a temperatura variam de acordo com as células fotovoltaicas utilizadas na construção do módulo. Com base nos dados dispostos na Tabela 4, fica evidente o ganho percentual médio anual de 25,26% e 25,92% para as duas simulações com posicionador solar de um eixo e posicionador solar de um eixo inclinado em relação ao sistema fixo respectivamente, o que representa um aumento de 130,88 MWh e 134,3 MWh na produção anual da central.

REFERENCIAS

ABDALLAH, Salah. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. **Energy Conversion and Management**, vol. 45, no. 11–12, p. 1671–1679, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.006>.

ABDALLAH, Salah; NIJMEH, Salem. Two axes sun tracking system with PLC control. **Energy Conversion and Management**, vol. 45, no. 11–12, p. 1931–1939, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.007>.

ABNT. **NBR 10899 - Energia solar fotovoltaica -Terminologia**. 2013. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ALER - ASSOCIAÇÃO LUSÓFONA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - COMUNICAÇÃO - NOTÍCIAS - PROGRAMA COMUNITÁRIO DE ACESSO A ENERGIA RENOVÁVEL DE BAMBADINCA “BAMBADINCA STA CLARO.” [s. d.]. Available at: <https://www.aler-renovaveis.org/pt/comunicacao/noticias/bambadinca/>. Accessed on: 4 Jan. 2021.

ALER – ASSOCIAÇÃO LUSÓFONA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energias Renováveis e Eficiência Energética na Guiné-Bissau –Relatório Nacional do Ponto de Situação**. Bissau: [s. n.], 2018.

ALVES, Alceu Ferreira. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. 2008. xiv,152 f.: il. color, gráfs., tabs. f. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Botucatu, 2008.

ARAÚJO, Jonas Damasceno Batista. **Protótipo de Rastreador Solar de um eixo baseado em microcontrolador**. 2016. 87 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

ARDUINO - ARDUINOTOBREADBOARD. [s. d.]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>. Accessed on: 20 Jul. 2020.

ARDUINO - BOOTLOADER. [s. d.]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Hacking/Bootloader?from=Tutorial.Bootloader>. Accessed on: 15 Feb. 2021.

ARDUINO UNO REV3 | ARDUINO OFFICIAL STORE. [s. d.]. Available at: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Accessed on: 3 Jan. 2021.

ATMEL. ATmega328 / P. **AVR Microcontrollers**, , p. 442, 2016. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130294>.

BACK, Alexander Clasen; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; CATANI, Fábio; LIMA, Guilherme Guebur; COIMBRA, Isadora Limas; ORTOLAN, João Mendes; AMARANTE, Odilon A. Camargo do; ANDRADE, Paulo Emiliano Piá de; FREITAS, Ramon Morais de. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. Fortaleza: ADECE: FIEC: SEBRAE, 2019.

BAHRAMI, Arian; OKOYE, Chiemeka Onyeka; ATIKOL, Ugur. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. **Renewable Energy**, vol. 113, p. 563–579, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.

BESSO, Rachel. **Sistema Solar Fotovoltaico conectado à rede – Estudo de caso no Centro de Tecnologia da UFRJ**. 2017. 87 f. UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11th ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

BRITO, Miguel C; SILVA, José A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O Instalador**, vol. 25, no. 676, p. 07, 2006. .

ÇENGEL, A. Yanus; BOLES, Michael A. **Transferência de Calor**. 4th ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

CHIN, C. S.; BABU, A.; MCBRIDE, W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink. **Renewable Energy**, vol. 36, no. 11, p. 3075–3090, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.026>.

DAS, Manas Ranjan. Effect of different environmental factors on performance of solar panel. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, vol. 8, no. 11, p. 15–18, 2019. <https://doi.org/10.35940/ijitee.J9889.0981119>.

FAUZAN, Ranu; AMIR, Andika S.; MIYAUCHI, Hajime. Microcontroller ATmega8535 Based Solar Tracker Design for PV System Applications in Equator Region. **International Journal of Control and Automation**, vol. 7, no. 4, p. 217–234, 2014. <https://doi.org/10.14257/ijca.2014.7.4.19>.

GUINÉ-BISSAU. MINISTÉRIO DA ENERGIA E INDÚSTRIA E RECURSOS NATURAIS. **Plano de Ação Nacional para a Eficiência Energética (PANEE) da Guiné-Bissau Período 2015-2030**. Bissau: [s. n.], 2017.

GUINÉ-BISSAU. MINISTÉRIO DA ENERGIA E INDÚSTRIA E RECURSOS NATURAIS. **Relatórios sobre Estudo do Plano Director de Energia e de um Plano de Desenvolvimento de Infra-estruturas necessárias para a produção e distribuição da energia eléctrica: Banco de dados**. Bissau: [s. n.], 2010a.

GUINÉ-BISSAU. MINISTÉRIO DA ENERGIA E INDÚSTRIA E RECURSOS NATURAIS. **Relatórios sobre o Plano Director de Energia e de um Plano para o Desenvolvimento de Infra-estruturas para a produção e distribuição de electricidade: Potencial energético**. Bissau: [s. n.], 2010b.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna**. 10th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LABOURET, Anne; VILLOZ, Michel. **Solar photovoltaic energy**. [S. l.: s. n.], 2010. vol. 4, . <https://doi.org/10.1049/pbrn009e>.

MCROBERTS, Michael. **Arduíno Básico**. São Paulo: Novatec Editora, 2011.

MOUSAZADEH, Hossein; KEYHANI, Alireza; JAVADI, Arzhang; MOBLI, Hossein; ABRINIA, Karen; SHARIFI, Ahmad. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 13, no. 8, p. 1800–1818, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>.

MUNIZ, Tomás Dahas Jorge. **Estudo de caso: uso de rastreadores solares como otimizadores de sistemas fotovoltaicos de grande porte para o Estado do Ceará**. 2017. 72 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. <https://doi.org/621.042>.

NETO, Alberto Hernandez; AMARAL, Alessandra Camilla do; LEITE, Bruno Medeiros; PACHECO, Claudio Roberto de Freitas; SOWMY, Daniel Strak; ZACHARIADIS, Demetrio Comilios; IOSHIMOTO, Eduardo; YAMADA, Eduardo Seiji; FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral; KATO, Enio; BARRETO, Gustavo de Andrade; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros; CHABU, Ivan Eduardo; ESCOBAR, Javier Farago; GRIMONI, José Aquiles Baesso. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 1st ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

NETTO, Eduardo Moreira. **Projeto de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica para Quartel do Corpo de Bombeiros**. 2019. 57 f. UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

OLIVEIRA, Cláudio Luís Vieira; ZANETTI, Humberto Augusto Piovesana. **Arduíno Descomplicado: como elaborar projetos de eletrônica**. 1st ed. São Paulo: Érica, 2015.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2nd ed. Sao José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia fotovoltaica**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014.

PRINSLOO, Gerro; DOBSON, Robert. **Solar Tracking - sun position, sun tracking, sun following**. [S. l.: s. n.], 2015.

PVSYST – LOGICIEL PHOTOVOLTAÏQUE. [s. d.]. Available at: <https://www.pvsyst.com/>. Accessed on: 14 Jan. 2021.

QUEIROZ, Marília Brilhante. **Desenvolvimento e aperfeiçoamento de rastreamento automático para coletor solar parabólico e comparação com coletor solar parabólico de rastreamento manual**. 2017. 49 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, Fortaleza, 2017.

REIS, ANA FLAVIA DOS; HAMERSCHMIDT, DENIS RODRIGO; ROCHA, GABRIEL BORMIO. **POSICIONADOR DE PAINEL FOTOVOLTAICO AUTOMÁTICO**. 2017. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2017.

REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**. Paris: [s. n.], 2020.

RIBEIRO, Sandro Carneiro; DO PRADO, P P L; GONÇALVES, João Bosco; DE SOUZA SOARES, Á M. Design and development of a low-cost solar tracker. **Australian Journal of Mechanical Engineering**, vol. 11, no. 2, p. 139–150, 16 Jan. 2013. <https://doi.org/10.7158/M12-082.2013.11.2>.

SANTOS, Marco Aurélio dos. Fontes de energia nova e renovável. , p. 197, 2013. .

SARKER, M. R. I.; BEG, R. A.; HAQ, K. M. A. Performance Evaluatio of a Micro Controller Based Two-axis Sun Tracker. **Mech. Eng. Res. Journal**, vol. 6, no. January 2006, p. 33–40, 2017. .

SEFA, Ibrahim; DEMIRTAS, Mehmet; ÇOLAK, İlhami. Application of one-axis sun tracking system. **Energy Conversion and Management**, vol. 50, no. 11, p. 2709–2718, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.018>.

SILVA, Itã Teodoro Da. **UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de**. 2010. 78 f. Universidade Federal da Bahia, 2010.

SINGH, Rajesh; KUMAR, Suresh; GEHLOT, Anita; PACHAURI, Rupendra. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 82, no. April, p. 3263–3278, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.018>.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. vol. 1, .

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e aplicações**. 2nd ed. São Paulo: Érica, 2012.

WHAT IS ARDUINO? | ARDUINO. [s. d.]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Accessed on: 21 Dec. 2020.

WHO USES PSIM | POWERSIM, INC. [s. d.]. Available at: <https://powersimtech.com/products/psim/who-uses-psim/>. Accessed on: 15 Feb. 2021.

WIRING. [s. d.]. Available at: <http://wiring.org.co/>. Accessed on: 3 Jan. 2021.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física 4 - Ótica e Física moderna**. 14th ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.