

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE JOSÉ PEREZ

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO PARA
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

FELIPE JOSÉ PEREZ

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO PARA
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de TCC 2, do Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Ubirajara Zoccoli

CURITIBA

2018

Felipe José Perez

Construção de um protótipo de seguidor solar de um eixo para placas fotovoltaicas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 29 de novembro de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Ubirajara Zoccoli, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

José da Silva Maia, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciane Brandalise, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

PEREZ, Felipe José. **Construção de um protótipo de seguidor solar de um eixo para placas fotovoltaicas**. 2018. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho contempla a elaboração de um protótipo de seguidor solar de um eixo para placas fotovoltaicas. Tendo uma construção em escala reduzida em relação a uma aplicação real e componentes de baixo custo, o sistema mostrou-se eficaz para alterar a posição de uma placa fotovoltaica ao longo de um dia, no sentido de mantê-la perpendicular em relação à radiação solar direta. Equipado com um par de sensores de luminosidade baseados em resistores dependentes da luz para rastrear a posição do Sol, com um sistema de controle microcontrolado e um motor de passo como atuador, o protótipo custou com cerca de R\$ 700,00, com a metodologia adotada para a sua realização sendo detalha nesse estudo. Foram feitos cinco testes para comprovar o funcionamento do protótipo. O primeiro deles objetivou o funcionamento do seguidor em bancada. Valendo-se de uma fonte de alimentação externa, dado que em ambiente interno a placa solar não gera uma quantidade significativa de energia, e de uma luminária de mesa para simular a radiação solar, foi possível comprovar a correta movimentação da placa fotovoltaica quando da movimentação da luminária. Embora o sistema não tenha se mostrado capaz de operar em modo autônomo, como evidenciado no segundo teste realizado, outros experimentos foram feitos em condições reais de operação, com o uso de uma fonte externa de energia, para validar a possibilidade de rastreamento do sol escolhida, de acordo com os objetivos do trabalho. Assim, em um dia ensolarado e em outro com o céu completamente encoberto, o protótipo foi colocado sobre o telhado de uma edificação e deixado em funcionamento desde o início da manhã até o final da tarde, movimentando-se conforme o planejado. Adicionalmente, outro teste foi feito em um dia que começou com um período de Sol entre nuvens e terminou completamente nublado, com a eficácia do sistema mais uma vez sendo comprovada. Com efeito, tanto nos dias com predomínio de radiação solar direta quanto em dias com predomínio de radiação difusa, a solução proposta demonstrou a validade da técnica de rastreamento do Sol escolhida, o que possibilita a construção de seguidores solares com o uso de sensores de luminosidade simples, e o conseqüente aumento de eficiência na conversão fotovoltaica de energia.

Palavras-chave: Energia Solar. Gerador Fotovoltaico. Seguidor Solar. Rastreamento do Sol.

ABSTRACT

PEREZ, Felipe José. **Construction of a single-axis solar tracker prototype for photovoltaic panels.** 2018. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This work includes the elaboration of a prototype solar tracker of an axis for photovoltaic panels. Having a reduced scale construction relative to a real application and low cost components, the system proved effective to change the position of a photovoltaic plate over the course of a day in order to keep it perpendicular to solar radiation direct. Equipped with a pair of light sensors based on light-dependent resistors to track the position of the Sun, with a microcontrolled control system and a stepper motor as actuator, the prototype cost about R\$ 700,00, with the methodology adopted for its accomplishment being detailed in this study. Five tests were done to prove the operation of the prototype. The first one aimed at the operation of the solar tracker on bench. Using an external power source, since in the internal environment the solar panel does not generate a significant amount of energy, and of a table lamp to simulate the solar radiation, it was possible to prove the correct movement of the photovoltaic plate when moving of the luminaire. Although the system was not able to operate in an autonomous mode, as evidenced in the second test, other experiments were performed under real operating conditions, using an external source of energy, to validate the possibility chosen for sun tracking, according to the objectives of the work. Thus, on a sunny day and another with a completely overcast sky, the prototype was placed on the roof of a building and left running from early morning until late afternoon, moving as planned. Additionally, another test was done on a day that began with a period of Sun between clouds and ended completely cloudy, with the effectiveness of the system once again being proven. In fact, both on days with a predominance of direct solar radiation and on days with predominance of diffuse radiation, the proposed solution demonstrated the validity of the chosen sun tracking technique, which allows the construction of solar trackers with the use of simple luminosity sensors, and the consequent increase of efficiency in the photovoltaic conversion of energy.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Generator. Solar Tracker. Sun tracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Comparação de um sistema fixo com um sistema equipado com seguidor solar em termos de energia produzida ao longo de um dia.....	19
Figura 2 — Variação do fotoperíodo para diferentes latitudes em função da época do ano.	25
Figura 3 — Movimentação da terra em relação ao Sol e as estações do ano.	26
Figura 4 — Declinação solar e ângulo horário solar.....	27
Figura 5 — Ângulo zenital e ângulo azimutal.	27
Figura 6 — Total diário da irradiação global horizontal - média anual.....	30
Figura 7 — Total diário da irradiação global horizontal - médias mensais.	31
Figura 8 — Potencial de geração fotovoltaica - rendimento energético anual.	32
Figura 9 — Potencial de geração fotovoltaica - rendimento energético mensal.....	33
Figura 10 — Estrutura em teia de diamante de um cristal de silício.....	35
Figura 11 — Cristal de silício dopado com: (a) boro, um dopante p e (b) fósforo, um dopante n.	36
Figura 12 — Efeito fotovoltaico em uma célula de silício cristalino.	37
Figura 13 — Processo de fabricação do m-Si.....	39
Figura 14 — Exemplos de placas fotovoltaicas: (a) de m-Si e (b) de p-Si.	40
Figura 15 — Esquema de uma célula de CdTe.....	42
Figura 16 — Esquema de um gerador fotovoltaico autônomo.	50
Figura 17 — Esquema de um gerador fotovoltaico conectado à rede elétrica.	51
Figura 18 — Tipos de seguidores solares: (a) de um eixo e (b) de dois eixos.....	52
Figura 19 — (a) Seguidor passivo; (b) seguidor ativo.	53
Figura 20 — Variantes construtivas para sensores de luminosidade: (a) com aleta, (b) com superfícies inclinadas e (c) com carenagem.	54
Figura 21 — (a) Microprocessador e seus periféricos independentes e (b) microcontrolador e seus periféricos integrados.	57
Figura 22 — (a) Placa de programação de PIC e cabos de conexão (b) microcontrolador da família PIC16xxx.....	58
Figura 23 — Arduino MEGA e cabo de comunicação USB.....	61
Figura 24 — Detalhes dos enrolamentos de (a) um motor unipolar e (b) bipolar.....	64

Figura 25 — (a) Motor de passo com ímãs permanentes e (b) motor de passo de relutância.	66
Figura 26 — Esquema de acionamento de um motor bipolar com um L298.....	69
Figura 27 — Esquema de acionamento de um motor unipolar com um ULN2004A.	69
Figura 28 — Esquema genérico de um servodriver associado a um motor síncrono de ímã permanente.	70
Figura 29 — Estrutura de sustentação do seguidor.	78
Figura 30 — Eixo de rotação da placa solar e acessórios.	80
Figura 31 — Placa solar com suporte modificado para acoplar-se ao eixo do seguidor.	80
Figura 32 — Atuador e acionamento.....	81
Figura 33 — Circuito divisor de tensão composto pela série de um resistor e com um LDR.....	82
Figura 34 — Sensores de luminosidade analógicos baseados em LDR's.	83
Figura 35 — (a) Detalhes das carenagens dos sensores de luminosidade e (b) as suas posições pretendidas.	83
Figura 36 — Sensor limitador de curso.	84
Figura 37 — Controlador Arduino UNO.....	85
Figura 38 — Placa reguladora de tensões.	86
Figura 39 — Caixa de ligação e elementos de fixação.	86
Figura 40 — Visão geral do protótipo (a) tomando os sensores de luminosidade e o motor e (b) tomando a caixa de ligação e o sensor limitador de curso.....	87
Figura 41 — Código para obtenção dos valores médios de saída dos sensores de luminosidade.	89
Figura 42 — Algumas declarações e atribuições de variáveis, seguidas da definição dos tipos de portas associadas a cada uma delas.....	90
Figura 43 — Código para código para o acionamento do motor no sentido de Leste para Oeste.	91
Figura 44 — Lógica usada para o sensor limitador de curso, na qual definiu-se um atraso para o início do movimento de retorno.	92
Figura 45 — Código para o acionamento do motor no sentido de Oeste para Leste.	93
Figura 46 — Condicional para detecção da noite e a conseqüente condução da placa para a posição inicial.....	93

Figura 47 — Resultado do teste em bancada, onde uma luminária de mesa simulou o Sol.	95
Figura 48 — Resultado do teste em condições reais, com dia ensolarado.....	98
Figura 49 — Resultado do teste em condições reais, com dia nublado.....	100
Figura 50 — Resultados do teste em condições reais, com dia com um período de Sol entre nuvens e com outro completamente nublado.	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Parâmetros solarimétricos calculados por diferentes pesquisadores. .	55
Quadro 2 — Sequência de acionamento para passo completo com uma fase por ciclo.	64
Quadro 3 — Sequência de acionamento para passo completo com duas fases por ciclo.....	65
Quadro 4 — Sequência de acionamento para meio passo.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Modelos de Arduino e suas configurações de microcontrolador, interface serial e memórias.....	59
Tabela 2 — Modelos de Arduino com suas quantidades de entradas e saídas por tipo.	60

LISTA DE SIGLAS

CA	–	Corrente Alternada
CAD	–	Computer-Aided Design
CC	–	Corrente Contínua
CCST	–	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CPU	–	Central Processing Unit
DSSC	–	Dye-Sensitized Solar Cell
INMETRO	–	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABREN	–	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LDR	–	Light Dependent Resistor
MPPT	–	Maximum Power Point Tracking
NREL	–	National Renewable Energy Laboratory
ONS	–	Operador Nacional do Sistema
PWM	–	Pulse Width Modulation
QDSSC	–	Quantum Dots Sensitized Solar Cells
RAM	–	Random-Access Memory
RISC	–	Reduced Instruction Set Computer
ROM	–	Read-Only Memory
USB	–	Universal Serial Bus

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	–	fluxo radiante
E	–	irradiância
A	–	área
H	–	irradiação
δ	–	declinação solar
ω	–	ângulo horário solar
θ_z	–	ângulo zenital solar
H_{gh}	–	irradiação global horizontal
T	–	conjugado eletromagnético
E_g	–	tensão gerada
K_a	–	constante construtiva de um motor CC
\emptyset	–	fluxo magnético
I_a	–	corrente de armadura
w_m	–	velocidade angular
P	–	número de pólos do estator de um motor CC
Z	–	número de condutores do rotor
a	–	número de caminhos paralelos na armadura
V_t	–	tensão terminal
r_a	–	resistência de armadura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	TEMA	16
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	17
1.3	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	18
1.4	OBJETIVOS	18
1.4.1	Objetivo Geral	18
1.4.2	Objetivos Específicos	18
1.5	JUSTIFICATIVA	19
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2	REVISÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA.....	23
2.1	CONCEITOS BÁSICOS	23
2.1.1	Radiação, Fluxo Radiante, Irradiância e Irradiação Solar	23
2.1.2	Movimentação do Planeta Terra em Relação ao Sol	24
2.1.3	Ângulos Notáveis em Solarimetria	26
2.1.4	Transferência Radiativa	28
2.2	O POTENCIAL BRASILEIRO DE GERAÇÃO SOLAR.....	29
2.2.1	Mapas de Irradiação do Brasil.....	29
2.2.2	Mapas do Potencial de Geração Fotovoltaica do Brasil.....	31
2.3	O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	34
2.4	TECNOLOGIAS DAS PLACAS SOLARES	37
2.4.1	Células de Primeira Geração	38
2.4.1.1	Silício Cristalino (c-Si)	38
2.4.2	Células de Segunda Geração	40
2.4.2.1	Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si).....	40
2.4.2.2	Telureto de Cádmio (CdTe).....	41
2.4.2.3	Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) e Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio (CIGS).....	42
2.4.3	Células de Terceira Geração	42
2.4.3.1	Células Orgânicas.....	43
2.4.3.2	Células Sensibilizadas por Corante.....	43
2.4.3.3	Células Baseadas em Pontos Quânticos	44

2.5	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO ...	45
2.5.1	Placas Fotovoltaicas	45
2.5.2	Associações entre Placas Fotovoltaicas	46
2.5.3	Caixa de Junção Geral e Componentes de Proteção	46
2.5.4	Sistema Inversor ou Conversor CC-CA.....	47
2.5.5	Cabos e Conectores CC	48
2.5.6	Cabos e Conectores CA.....	48
2.5.7	Acumuladores	49
2.5.8	Controladores de Carga	49
2.6	GERADORES FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS.....	50
2.7	GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA .	51
2.8	TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES.....	52
2.8.1	Quanto ao Número de Eixos	52
2.8.2	Quanto ao Tipo de Controle	52
2.9	TÉCNICAS PARA RASTREIO DO SOL.....	53
2.9.1	A Partir de Sensores de Luminosidade	53
2.9.2	A Partir de Dados Astronômicos	54
2.10	PRINCIPAIS COMPONENTES APLICÁVEIS A UM SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO	56
2.10.1	MICROCONTROLADORES.....	56
2.10.1.1	Microcontroladores PIC.....	57
2.10.1.2	Microcontroladores Arduino	58
2.10.2	MOTORES ELÉTRICOS	61
2.10.2.1	Motores de Corrente Contínua	61
2.10.2.2	Motores de Passo	63
2.10.2.3	Servomotores.....	66
2.10.3	ACIONAMENTOS PARA MOTORES ELÉTRICOS	66
2.10.3.1	Relés	67
2.10.3.2	Drivers para Motores de Passo	68
2.10.3.3	Drivers para Servomotores	70
2.10.4	SENSORES	71
2.10.4.1	Sensores de Proximidade Indutivos	71
2.10.4.2	Sensores de Proximidade Capacitivos	72
2.10.4.3	Sensores de Velocidade e Posição.....	73

2.10.4.4	Sensores de Luminosidade.....	74
2.10.5	ELEMENTOS DE MECÂNICA	74
2.10.5.1	Tubos e Perfis Estruturais	74
2.10.5.2	Eixos	75
2.10.5.3	Mancais.....	75
2.10.5.4	Engrenagens, Polias e Correias de Transmissão	76
3	IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO	77
3.1	DIRETRIZ PARA A CONSTRUÇÃO DO SISTEMA	77
3.2	DESCRIÇÃO DAS PARTES	77
3.2.1	A PARTE MECÂNICA	78
3.2.1.1	A Estrutura de Sustentação	78
3.2.1.2	O Eixo de Rotação da Placa Solar e Acessórios.....	79
3.2.2	A PARTE ELETROELETRÔNICA.....	80
3.2.2.1	A Placa Solar.....	80
3.2.2.2	O Atuador e o seu Acionamento	81
3.2.2.3	Os Sensores de Luminosidade	82
3.2.2.4	O Sensor Limitador de Curso	84
3.2.2.5	A Unidade de Controle	84
3.2.2.6	A Placa Reguladora de Tensões.....	85
3.2.2.7	Acessórios.....	86
3.2.3	A INTEGRAÇÃO DAS PARTES.....	87
3.2.4	O CÓDIGO DE CONTROLE	88
4	TESTES E RESULTADOS	94
4.1	TESTE 1 — FUNCIONAMENTO EM BANCADA (COM LUZ ARTIFICIAL)	94
4.2	TESTE 2 — COMPORTAMENTO EM MODO AUTÔNOMO	96
4.3	TESTE 3 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA ENSOLARADO)	97
4.4	TESTE 4 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA NUBLADO).....	99
4.5	TESTE 5 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA COM UM PERÍODO DE SOL ENTRE NUVENS E COM OUTRO COMPLETAMENTE NUBLADO).....	99

5	CONCLUSÕES	102
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DO PROTÓTIPO.....	110
	APÊNDICE B – CÓDIGO DE CONTROLE DO PROTÓTIPO	111
	APÊNDICE C – RELAÇÃO DE MATERIAIS E SERVIÇOS NECESSÁRIOS À CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SEUS RESPECTIVOS CUSTOS.....	114

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O crescimento da demanda energética em contraponto à perspectiva de redução do potencial de geração de fontes convencionais de energia tem promovido, em diversos países, discussões a respeito de como responder a essa situação. Em um planeta de recursos naturais finitos, as nações têm se convencido da importância de se ter um planejamento apurado no campo energético, dados os severos impactos sociais e econômicos correlatos.

A diminuição de suprimentos para fontes tradicionais, seja pelo seu caráter não renovável, como por exemplo o carvão mineral na geração termelétrica, ou em virtude de mudanças climáticas, como a escassez de água no caso da geração hidrelétrica, é um grave problema que se apresenta atualmente. Metas de redução de emissão de poluentes, as quais implicam redução do uso de fontes mais poluidoras, como as que se valem de combustíveis fósseis, são um complicador a mais na tomada de decisões por parte de muitos governos.

Nesse contexto, a ampliação do uso de fontes de energia renováveis e com baixo impacto socioambiental é algo bastante atual e importante, destacando-se o aproveitamento da energia solar.

Segundo informações do projeto Greenpro (2004), desenvolvido pela Holanda, Alemanha, Itália, Reino Unido e Portugal, o qual visa estimular o uso de fontes renováveis de energia na Europa, o Sol fornece à Terra, por irradiação, cerca de 10 mil vezes a demanda total da humanidade, o que demonstra o grande potencial dessa fonte.

A energia solar manifesta-se na forma térmica e luminosa, podendo ser aproveitada com o uso de painéis solares. A energia térmica pode ser usada para o aquecimento de água, principalmente no setor residencial, enquanto que a energia luminosa pode ser convertida em energia elétrica por placas fotovoltaicas.

Com relação à conversão fotovoltaica de energia, a eficiência do sistema de conversão cresce com o aumento da captação da radiação solar direta. Se as placas fotovoltaicas seguirem a posição do Sol, no sentido de se manterem perpendiculares em relação à radiação direta, a produção de energia aumenta. Vários fatores podem prejudicar o rendimento de um gerador solar, mas o principal deles é o

fator da radiação solar, que depende, basicamente, da localização geográfica do sistema e da inclinação e orientação das suas placas (RÜTHER, 2004).

A influência da inclinação e orientação depende da razão entre a radiação direta e difusa do local e, também, do coeficiente de reflexão das superfícies do entorno da instalação (RÜTHER, 2004).

De maneira geral, placas solares que acompanham o movimento do sol podem apresentar ganhos de radiação de até 50% no Verão e de 20% no Inverno, se comparadas às fixas. Todavia, esses valores podem ser diferentes levando-se em conta a localização geográfica da instalação (GREENPRO, 2018).

Com efeito, um seguidor solar é um componente importante no aproveitamento da energia solar. O desenvolvimento tecnológico de sistemas de rastreamento e seguimento do sol é útil para a obtenção de vantagem em um negócio com enorme potencial de crescimento no Brasil e no mundo.

Nesse contexto, o tema deste projeto trata do desenvolvimento de um protótipo de seguidor solar para placas fotovoltaicas.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Seguidores solares, também conhecidos como rastreadores solares, são mecanismos eletromecânicos que orientam as células fotovoltaicas na direção solar para que estas capturem mais energia solar. Existem aqueles de um eixo, os quais permitem o ajuste da posição das placas em função da movimentação do Sol na direção Leste-Oeste, obviamente tomando a Terra como referencial inercial, e os de dois eixos, que além dessa capacidade, permitem, também, inclinar as placas na direção Norte-Sul. O deslocamento do Sol na direção Leste-Oeste ocorre devido à rotação da Terra, ao passo que o movimento na direção Norte-Sul acontece em função do seu movimento de translação associado à inclinação do seu eixo de rotação em relação ao seu plano orbital.

O propósito deste trabalho é construir um protótipo de um rastreador solar de um eixo para placas fotovoltaicas com movimentação baseada em sensores de luminosidade. O sistema deverá conter um microcontrolador associado a um atuador elétrico. Mediante os sinais de saída fornecidos pelos sensores de intensidade luminosa, o microcontrolador acionará o atuador com o objetivo de manter a placa voltada para o Sol, situação onde a captação da radiação solar direta é máxima.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

No desenvolvimento deste projeto deverão ser considerados os seguintes problemas de ordem técnica:

1. Qual é a maneira mais adequada de conhecer a posição do Sol a partir do sensoriamento da intensidade luminosa?
2. Como construir a parte eletromecânica do rastreador para que a movimentação das placas seja precisa?

Com relação às premissas do projeto, elas são as seguintes:

1. Um par de sensores de luminosidade baseados em resistores dependentes de luz, mesmo quando colocados próximos em um mesmo ambiente, têm sinais de saída diferentes quando posicionados com orientações diferentes;
2. Os componentes da solução devem ser fáceis de serem obtidos no mercado e o sistema deve ser aplicado aos vários tipos de placas fotovoltaicas para geração de energia.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Construir um protótipo de seguidor solar de um eixo para uma placa fotovoltaica de 5Wp.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver um sistema de controle baseado em microcontrolador que determine a posição aparente do Sol a partir de sensores que meçam a intensidade luminosa;
2. Desenvolver um sistema de movimentação da placa solar baseado em um motor elétrico;
3. Testar o protótipo em diferentes condições reais de operação para validar a sua capacidade de rastrear a posição do Sol e alterar a posição

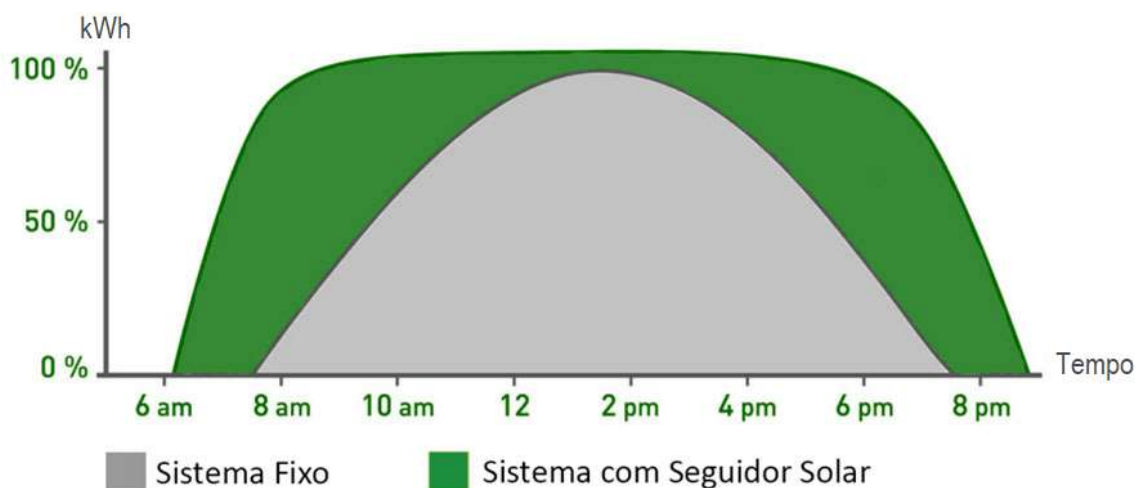
da placa fotovoltaica no sentido de mantê-la perpendicular em relação à radiação solar direta.

1.5 JUSTIFICATIVA

Em termos técnicos, segundo o Portal Solar (2018), sistemas com placas que seguem a posição do Sol geram de 25 a 45% mais energia do que os fixos, uma vez que a captação da radiação direta é facilitada. Isso significa, por consequência, que sistemas com rastreadores solares são menores em área do que sistemas sem os mesmos, para uma mesma potência instalada.

Ademais, quando comparados aos sistemas fixos, sistemas móveis melhoram a disponibilidade da geração, dado que a potência máxima disponibilizada à carga é conseguida em um intervalo de tempo maior, estendendo-se desde o início da manhã até o final da tarde, conforme mostrado na figura 1 (PORTAL ENERGIA, 2018).

Figura 1 — Comparação de um sistema fixo com um sistema equipado com seguidor solar em termos de energia produzida ao longo de um dia.



Fonte: Valldoreix Greenpower, 2018.

Com relação à realidade brasileira, segundo informações do Portal O Setor Elétrico (2018), mesmo tendo um enorme potencial de geração e baixo custo ambiental, a energia solar é, ainda, pouco aproveitada. Diante de crises hídricas recentes, o governo brasileiro se viu obrigado a aumentar o uso de termelétricas, fontes mais caras e poluentes em relação às hidrelétricas. Isso rendeu críticas ao

governo, pois aumentou o preço das tarifas e a poluição do sistema de geração, o que comprometeu a qualidade da matriz energética brasileira. Para mitigar esse tipo de problema, faz-se necessário diversificar a matriz energética do país com a inclusão de novas fontes como a solar e, nesse contexto, o aprimoramento da eficiência de geradores solares é algo muito positivo.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho serão seguidos os seguintes procedimentos metodológicos:

1. Revisão bibliográfica e técnica;

Objetivo: conhecer com mais detalhes o potencial brasileiro de geração solar, as tecnologias disponíveis para o seu aproveitamento, as técnicas de rastreamento do Sol, os tipos de seguidores solares, bem como verificar os possíveis mecanismos ou componentes aplicáveis ao projeto.

Forma de execução: inicialmente será realizada uma pesquisa aprofundada na rede mundial de computadores (sites relacionados, catálogos, periódicos técnico-científicos etc). Além disso, livros sobre o assunto deverão ser consultados, especialmente no que diz respeito aos fundamentos da teoria de energia solar.

2. Definição dos mecanismos e componentes a serem aplicados na construção do protótipo;

Objetivo: definir o que vai ser utilizado e como serão adquiridos os componentes para a implementação.

Forma de execução: realizar contato com fornecedores, consulta a catálogos técnicos, pedidos de orçamento etc.

3. Montagem e teste das partes mecânicas em bancada;

Objetivo: definir a estrutura do protótipo, as dimensões das peças mecânicas, suas posições, furações, encaixes etc. Conceber o mecanismo de movimentação da placa, bem como agrupar todas as partes do sistema mecânico.

Forma de execução: Desenhos poderão ser feitos para, por fim, unir as diversas peças estruturais do protótipo com solda, parafusos, entre outros. Nessa etapa, as partes mecânicas poderão, também, ser

testadas a partir do acionamento manual do atuador, para que se comprove que as partes móveis descrevem os movimentos pretendidos.

4. Montagem e teste das partes eletroeletrônicas em bancada;

Objetivo: definir o sistema de controle do seguidor, bem como o acionamento do atuador, sensores e demais acessórios que se façam necessários, com a consequente validação dessas partes por meio de testes de funcionalidade.

Forma de execução: os circuitos serão montados em laboratório, onde experiências serão usadas para validar ou não o projeto, observando possíveis problemas relacionados a ruídos, sobreaquecimento, entre outros.

5. Integração do sistema eletroeletrônico com o sistema mecânico.

Objetivo: montar toda a parte de *hardware* da solução proposta.

Forma de execução: os componentes eletroeletrônicos deverão ser instalados nos locais previamente planejados da estrutura mecânica (suportes, caixas de ligação etc), onde o uso de elementos de fixação (parafusos, abraçadeiras, entre outros) permitirão a junção das partes. Na sequência, todas ligações elétricas deverão ser feitas de acordo com o projeto estabelecido, deixando o sistema pronto para receber o programa de controle.

6. Criação do código de controle do microcontrolador empregado;

Objetivo: criar o programa de controle a ser carregado no microcontrolador.

Forma de execução: através da plataforma de programação específica do microcontrolador escolhido, o *software* de controle deverá ser desenvolvido, contemplando as diferentes situações de operação do sistema. Testes em laboratório também acontecerão nessa etapa, para validar ou não as diferentes partes do programa, até que os objetivos sejam atingidos.

7. Realização de testes do conjunto em situações operacionais e análise dos resultados.

Objetivo: validar a solução apresentada.

Forma de execução: o sistema será submetido a condições reais de operação, para que seja possível comprovar sua eficácia. Registros da correta movimentação do seguidor deverão acontecer para a comprovação dos resultados obtidos.

8. Documentação do projeto.

Objetivo: descrever o protótipo em referência, os materiais e métodos utilizados, os testes e os resultados do estudo.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta as ideias iniciais do projeto, através da introdução e outros itens básicos, tais como, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivo geral e objetivos específicos, justificativa e procedimentos metodológicos.

O capítulo 2 traz a revisão técnico-científica, abordando os assuntos importantes para a produção do trabalho, como o potencial brasileiro de geração solar, as tecnologias das placas fotovoltaicas, as técnicas de rastreamento do Sol, os componentes básicos de um gerador solar, bem como a descrição dos mecanismos, componentes ou soluções aplicáveis ao projeto.

No capítulo 3 descreve-se a implementação do protótipo. Ele especifica as atividades desenvolvidas na construção das partes mecânica e eletroeletrônica, a integração das mesmas em um único sistema e, também, as atividades referentes ao desenvolvimento do programa de controle do seguidor.

Os testes e resultados constam no capítulo 4, onde são descritas as situações reais de operação às quais o protótipo foi submetido, bem como o saldo de cada experimento realizado, com vistas a validar as ideias usadas na solução apresentada.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões tiradas do projeto, seguidas das sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O aproveitamento da energia solar tem se mostrado cada vez mais viável nos últimos anos. O avanço científico e tecnológico tem permitido, por exemplo, a partir desse recurso, a construção de sistemas de aquecimento de água e geração de eletricidade, os quais, por suas vezes, possibilitam o atendimento de necessidades residenciais e de plantas industriais.

Nos quatro tópicos seguintes são explicados, de modo objetivo, alguns conceitos básicos e de fundamental importância para o estudo da energia solar e do seu aproveitamento. Alguns conceitos físicos são apresentados, bem como alguns fatores que alteram a disponibilidade dessa fonte de energia.

2.1.1 Radiação, Fluxo Radiante, Irradiância e Irradiação Solar

Segundo Villas Bôas, Doca e Biscuola (2007), radiação é o processo de propagação de energia na forma de ondas eletromagnéticas.

No caso da troca de energia entre o Sol e o sistema Terra-atmosfera, este intercepta parte da radiação eletromagnética emitida por aquele, transformando-a em outras formas de energia, como, por exemplo, calor e energia cinética.

A radiação eletromagnética é um conjunto de ondas, sendo que as várias formas de radiação, definidas pelo seu comprimento de onda, compõem o que é chamado de espectro eletromagnético.

De toda radiação solar, cerca de 43% é emitida na faixa da luz visível, 49% no infravermelho, 7% no ultravioleta e menos de 1% na faixa dos raios X, gama e ondas de rádio (FÍSICA, 2018).

Fluxo radiante (Φ) é a taxa de transferência de energia, medida em W no Sistema Internacional de Unidades (SI). Para o Sol, $3,9 \cdot 10^{26}$ W (FÍSICA, 2018).

Irradiância (E) é o fluxo radiante por unidade de área, em W/m^2 (SI). O fluxo radiante que passa através do disco visível do Sol, o qual possui um raio de, aproximadamente, $7 \cdot 10^8$ m, é calculado na equação (1):

$$E_S = \frac{\Phi_S}{A_S} = \frac{3,9 \cdot 10^{26}}{4 \cdot \pi \cdot (7 \cdot 10^8)^2} = 6,34 \cdot 10^7 \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Parte dessa irradiância atinge o sistema Terra-atmosfera. A irradiância média que atinge a órbita da terra, levando-se em conta um plano perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera, por exemplo, é de $1,38 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ (FÍSICA, 2018).

A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação (H) ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo. Geralmente é medida em Wh/m^2 .

2.1.2 Movimentação do Planeta Terra em Relação ao Sol

A disponibilidade da energia solar incidente em uma dada superfície da Terra, varia, temporalmente, de acordo com os movimentos do planeta em relação ao Sol (PEREIRA, et al., 2017).

Dentre todos os movimentos da Terra, os movimentos de rotação e de translação são os mais importantes. A rotação é o movimento de giro do planeta em torno do seu eixo imaginário e a translação é o movimento de giro em relação ao Sol, em uma órbita elíptica. O periélio – posição de maior proximidade entre os dois astros – ocorre por volta do dia 3 de janeiro, enquanto que o afélio – posição de maior afastamento – acontece em, aproximadamente, 4 de julho. A variação da distância entre o Sol e a Terra produz uma pequena variação da radiação solar recebida. No entanto, as estações do ano têm consequências importantes, como a variação da duração do dia (período de luz, algumas vezes chamado de fotoperíodo), da altura solar (ângulo de elevação do Sol acima do horizonte) e da quantidade de radiação, para diferentes latitudes (FÍSICA, 2018).

As estações do ano acontecem em função do movimento de translação da Terra associado à inclinação de $23,45^\circ$ do seu eixo axial em relação ao seu plano orbital. Em outras palavras, o plano do equador é inclinado em $23,45^\circ$ em relação ao plano de órbita. Na verdade, a posição relativa entre a Terra e o Sol está em constante alteração, assim como a direção de incidência dos raios solares no sistema Terra-atmosfera. Há, então, devido a convenção astronômica, momentos que definem o início e o fim de cada estação (PEREIRA, et al., 2017).

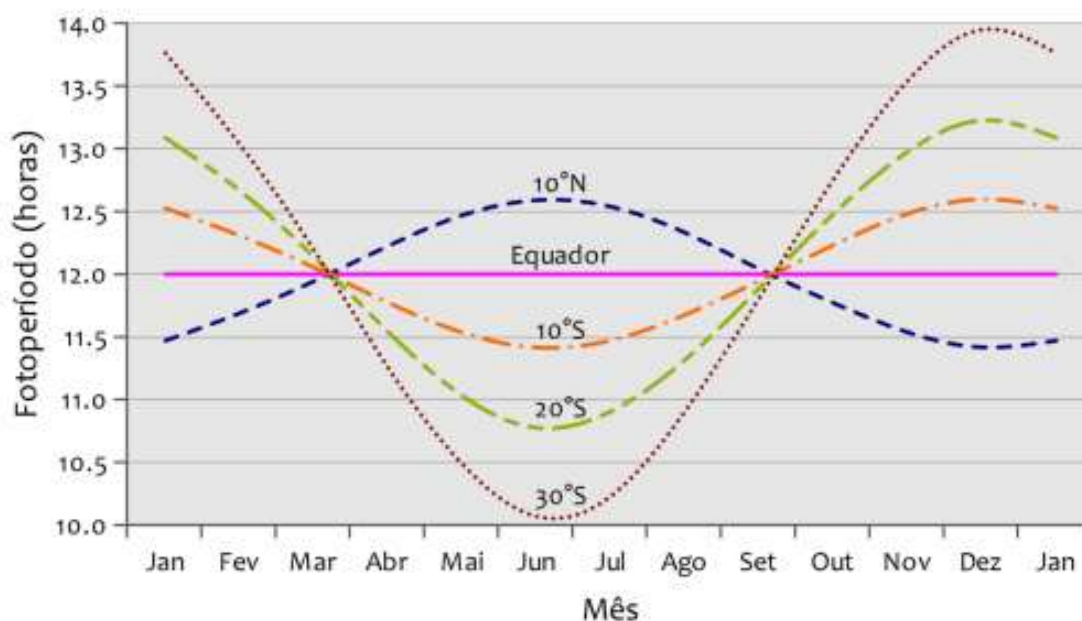
Os solstícios são os momentos em que a declinação solar em latitude – ângulo entre o plano equatorial e a direção Terra-Sol – é máxima. Ou seja, são momentos que marcam o início do verão para um dado hemisfério e do inverno para o outro, e vice-versa. No hemisfério de verão, a altura solar é maior, os dias são mais

longos e há mais radiação solar. No de inverno, ocorre o inverso: a altura solar é menor, os dias são mais curtos e há menos radiação. Os equinócios são os momentos em que a declinação solar é mínima. São momentos que marcam o início da primavera para um dado hemisfério e do outono para o outro, e vice-versa (FÍSICA, 2018).

No dia 21 ou 22 de dezembro, os raios solares incidem verticalmente sobre o Trópico de Capricórnio (latitude $23^{\circ} 27'S$), marcando o início do verão no Hemisfério Sul e o início do inverno no Hemisfério Norte. No dia 21 ou 22 de junho, os raios solares incidem verticalmente sobre o Trópico de Câncer (latitude $23^{\circ} 27'N$), marcando o início do verão no Hemisfério Norte e o início do inverno no Hemisfério Sul. No dia 22 ou 23 de setembro, os raios solares incidem verticalmente sobre o Equador, marcando o início da primavera no Hemisfério Sul e o início do outono no Hemisfério Norte. No dia 21 ou 22 de março, os raios solares voltam a incidir verticalmente sobre o equador, quando se inicia a primavera no Hemisfério Norte e o outono no Hemisfério Sul (FÍSICA, 2018).

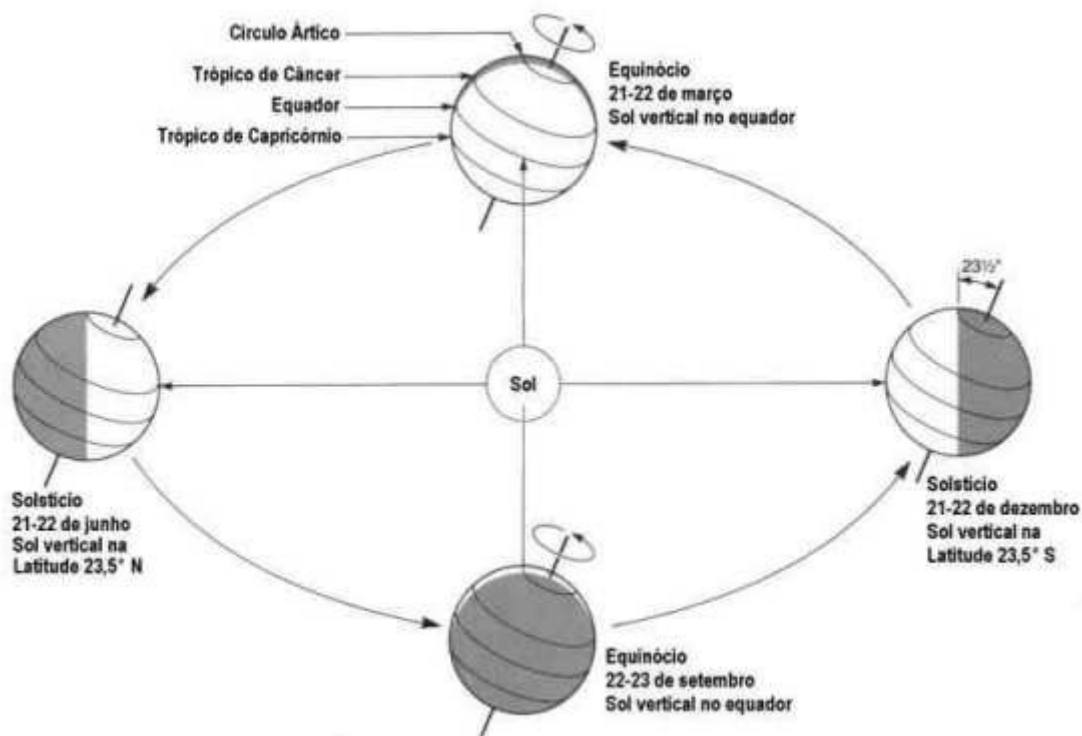
A figura 2 mostra a variação da duração do dia para diferentes latitudes, enquanto que a figura 3 ilustra o conjunto de posições da Terra em relação ao Sol destacando obliquidade da radiação solar para diferentes latitudes de acordo com a época do ano.

Figura 2 — Variação do fotoperíodo para diferentes latitudes em função da época do ano.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

Figura 3 — Movimentação da terra em relação ao Sol e as estações do ano.



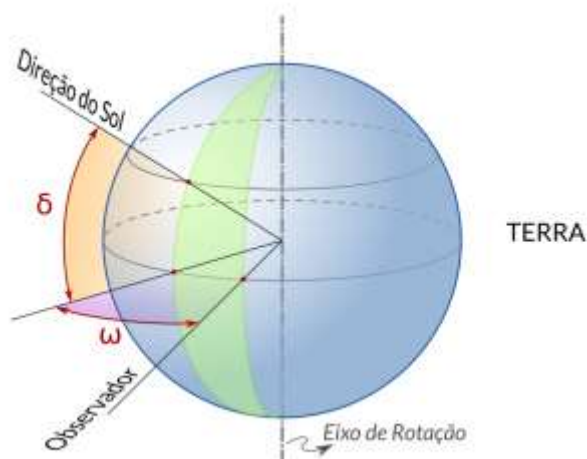
Fonte: Física, 2018.

2.1.3 Ângulos Notáveis em Solarimetria

Segundo Pereira, et al., (2017), alguns conceitos geométricos são importantes para a descrição da variabilidade da radiação solar que chega ao sistema Terra-atmosfera.

A figura 4 mostra um par de ângulos que definem a direção do Sol em relação a um ponto da superfície terrestre: a declinação solar (δ) e o ângulo horário solar (ω). O primeiro é o ângulo formado entre o plano do equador e a direção Terra-Sol. Varia entre $+23^{\circ} 27'$ e $-23^{\circ} 27'$ ao longo do ano, sendo os valores negativos para o período em que a direção Terra-Sol cruza o Hemisfério Sul. O segundo é o deslocamento angular da posição aparente do Sol. Varia entre $+180^{\circ}$ e -180° ao longo do dia, sendo os valores positivos para o período da 0 até as 12 horas e os negativos para o das 12 até a 0 hora.

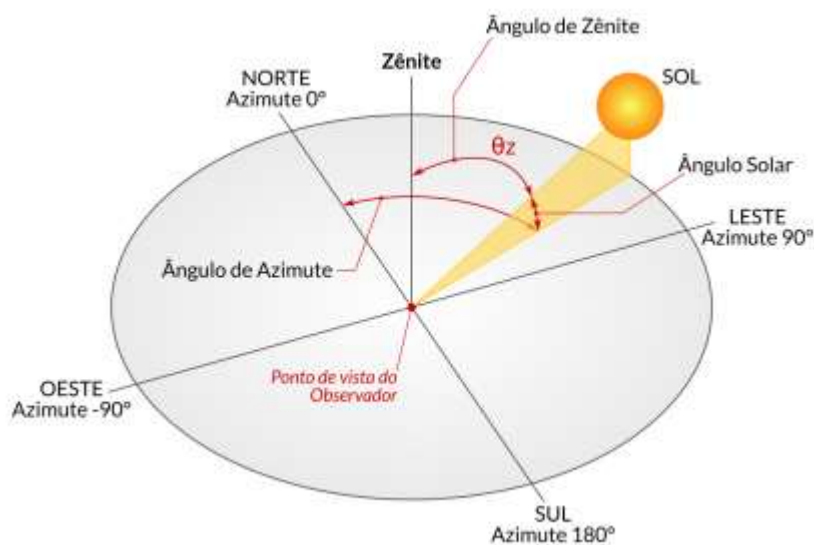
Figura 4 — Declinação solar e ângulo horário solar.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

É possível ainda, definir a direção do Sol a partir de outros dois ângulos notáveis, mostrados da figura 5: o ângulo zenital solar (θ_z) e o ângulo azimutal. O ângulo zenital é o ângulo entre a vertical que passa pelo ponto de observação e a direção do Sol, sendo esta última a linha que liga o Sol ao mesmo ponto de observação, enquanto que o ângulo azimutal é o ângulo formado entre a projeção da direção do Sol sobre a superfície terrestre e o meridiano do observador.

Figura 5 — Ângulo zenital e ângulo azimutal.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

2.1.4 Transferência Radiativa

A altura solar interfere na quantidade de radiação recebida por uma dada superfície da terra. Em primeiro lugar, quando os raios solares atingem a Terra verticalmente, são mais concentrados e o fotoperíodo do dia é mais longo. Quando a altura solar é menor, a radiação é mais espalhada e o fotoperíodo é mais curto.

Contudo, os fatores astronômicos não são os únicos a interferirem na irradiância disponível para um dado local. A atmosfera terrestre é um fator de atenuação da radiação solar incidente na superfície do planeta, uma vez que nela ocorrem os processos físicos de espalhamento, reflexão e absorção. Transferência radiativa é, então, o nome dado ao conjunto de fenômenos físicos que ocorrem no percurso da radiação solar dentro sistema Terra-atmosfera e que reduzem a sua intensidade (PEREIRA, et al., 2017).

O que determina se ocorrerá espalhamento, reflexão ou absorção depende, em grande parte, do comprimento de onda da radiação, bem como do tamanho e natureza do material com o qual ela colide (FÍSICA, 2018).

Embora a radiação solar incida na atmosfera em linha reta, os gases e aerossóis (particulados) podem causar o seu espalhamento, dependendo do tamanho das suas moléculas. Com isso, a radiação é dispersada em todas as direções, gerando a radiação difusa. Segundo Pereira, et al., (2017), as nuvens são o principal fator de modulação da radiação solar, uma vez que a espalham com muita eficiência. A espessura ótica, a distribuição de tamanhos das gotículas e o estado físico da água são fatores relevantes na influência das nuvens no processo de absorção da radiação solar na atmosfera.

A reflexão ocorre quando a onda eletromagnética incide na interface de meios diferentes com um ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão. Aproximadamente 30% da radiação solar é refletida de volta para o espaço (FÍSICA, 2018).

Outro fenômeno importante é o da absorção. A radiação pode ser convertida em calor pelo processo da absorção. Quando uma molécula de gás absorve energia na forma de radiação, ela aumenta o seu movimento molecular interno, significando aumento de temperatura. A absorção ocorre com moléculas de oxigênio (O_2), ozônio (O_3), gás carbônico (CO_2) e vapor de água.

2.2 O POTENCIAL BRASILEIRO DE GERAÇÃO SOLAR

Segundo informações do Portal O Setor Elétrico (2018), o Brasil possui altos índices de incidência de radiação solar. Embora apresente características climáticas diferentes para cada região do seu território, em função do seu grande tamanho, o Brasil tem excelentes condições para a conversão da energia solar em energia elétrica.

O potencial brasileiro de geração fotovoltaica é um dos objetos de estudo do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN). Em um trabalho de cooperação do INPE com outros pesquisadores brasileiros, um Atlas Brasileiro de Energia Solar foi criado com base em mais de 17 anos de imagens de satélites e, também, com base em dados obtidos por 17 estações de observação espalhadas estrategicamente pelo território brasileiro. Os pesquisadores envolvidos nesse trabalho usam o modelo BRASIL-SR para obter estimativas da radiação solar incidente na superfície, o qual contempla, tratamento dos dados meteorológicos e imagens de satélite, bem como um modelo de transferência radiativa aperfeiçoado pelos pesquisadores ao longo dos anos. Assim, é possível calcular componentes da irradiação solar incidente na superfície em Wh/m^2 (PEREIRA, et al., 2017)

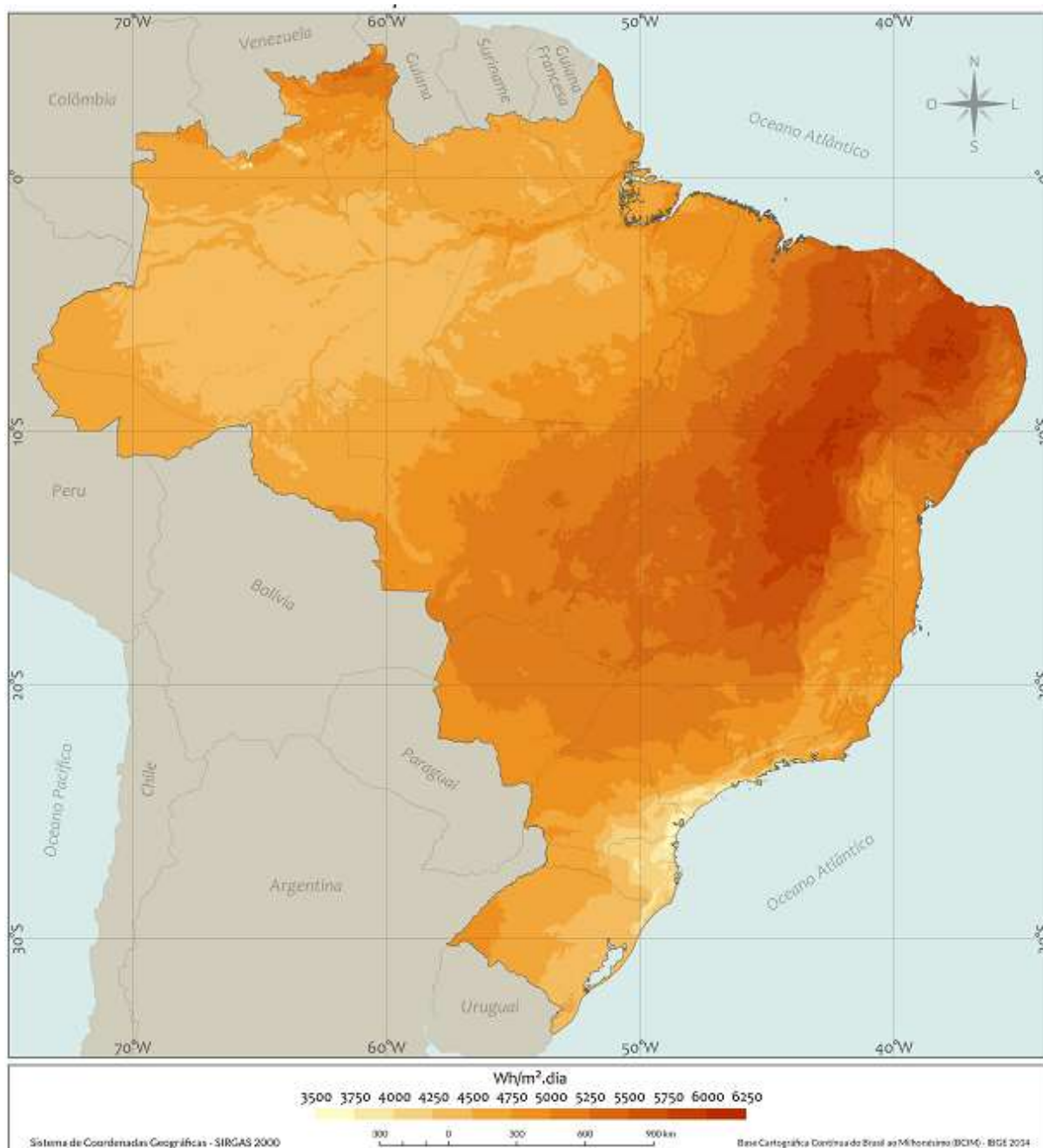
Nos dois tópicos seguintes, alguns mapas do Atlas Brasileiro de Energia Solar são mostrados.

2.2.1 Mapas de Irradiação do Brasil

Nos mapas de irradiação, aparece o conceito do total diário de irradiação global horizontal (H_{gh}): é a energia total por unidade de área incidente em uma superfície horizontal ao longo de um dia.

A figura 6 traz a média anual de H_{gh} , com resolução espacial horizontal de, aproximadamente, 10 x 10 km. Na parte inferior da figura 6 tem-se a faixa de valores encontrados no mapa. Por exemplo, nos pontos mais escuros observados na região oeste do Estado de Pernambuco e na região norte do Estado da Bahia têm-se os maiores valores para a média anual de H_{gh} do Brasil, ficando entre 6000 e 6250 Wh/m^2 .dia.

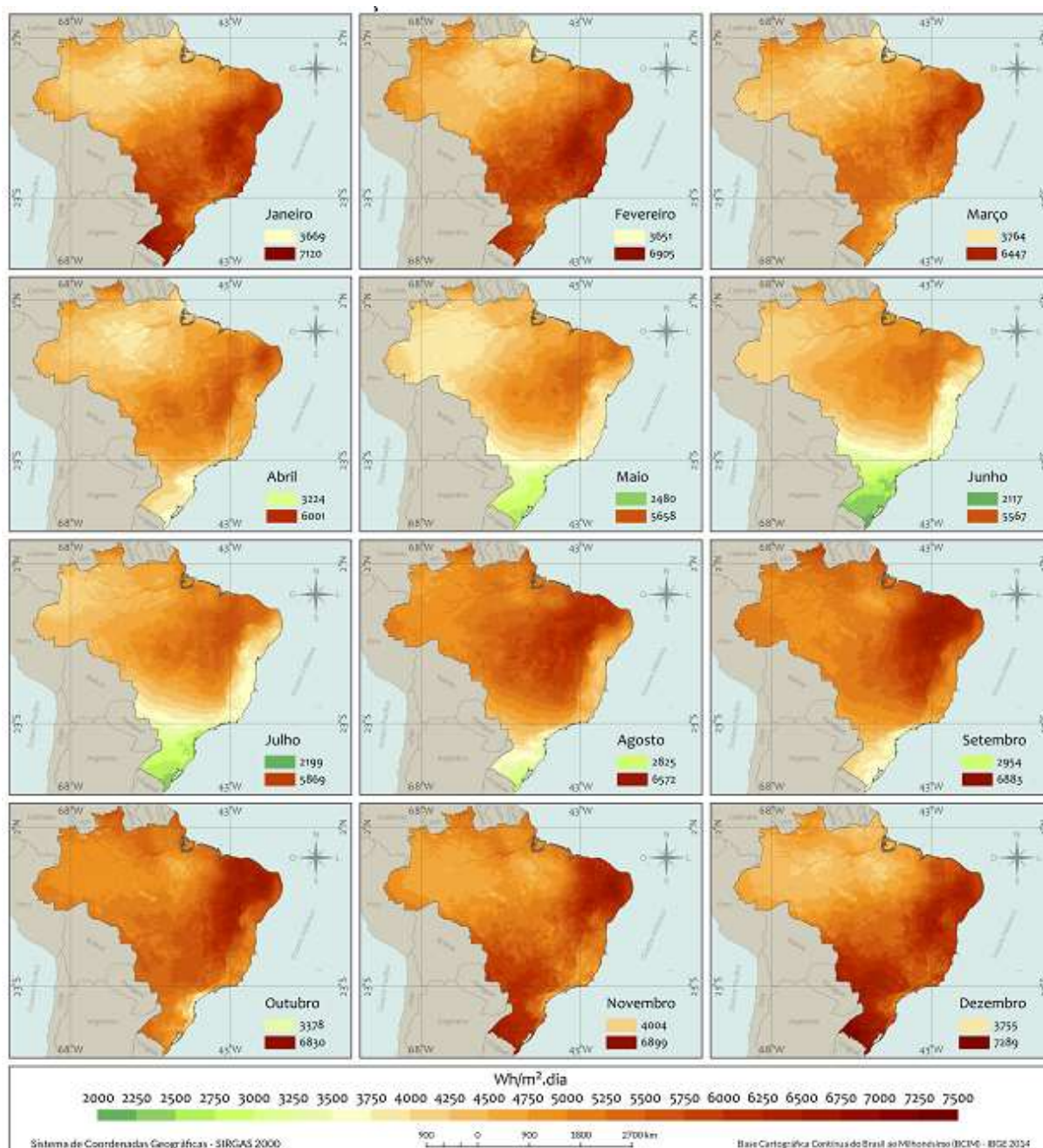
Figura 6 — Total diário da irradiação global horizontal - média anual.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

A figura 7 traz a média mensal de H_{gh} , com a mesma resolução espacial horizontal de, aproximadamente, 10 x 10 km. Além de apresentar a faixa de valores encontrados no mapa na sua parte inferior, a figura 7 traz, também, os valores máximos e mínimos registrados para um dado mês. Por exemplo, considerando a média de H_{gh} para o mês de janeiro, o menor valor é de 3669 Wh/m².dia, registrado nos pontos mais claros situados na Região Norte, ao passo que o maior valor é de 7120 Wh/m².dia, referente aos pontos mais escuros das Regiões Nordeste e Sul.

Figura 7 — Total diário da irradiação global horizontal - médias mensais.



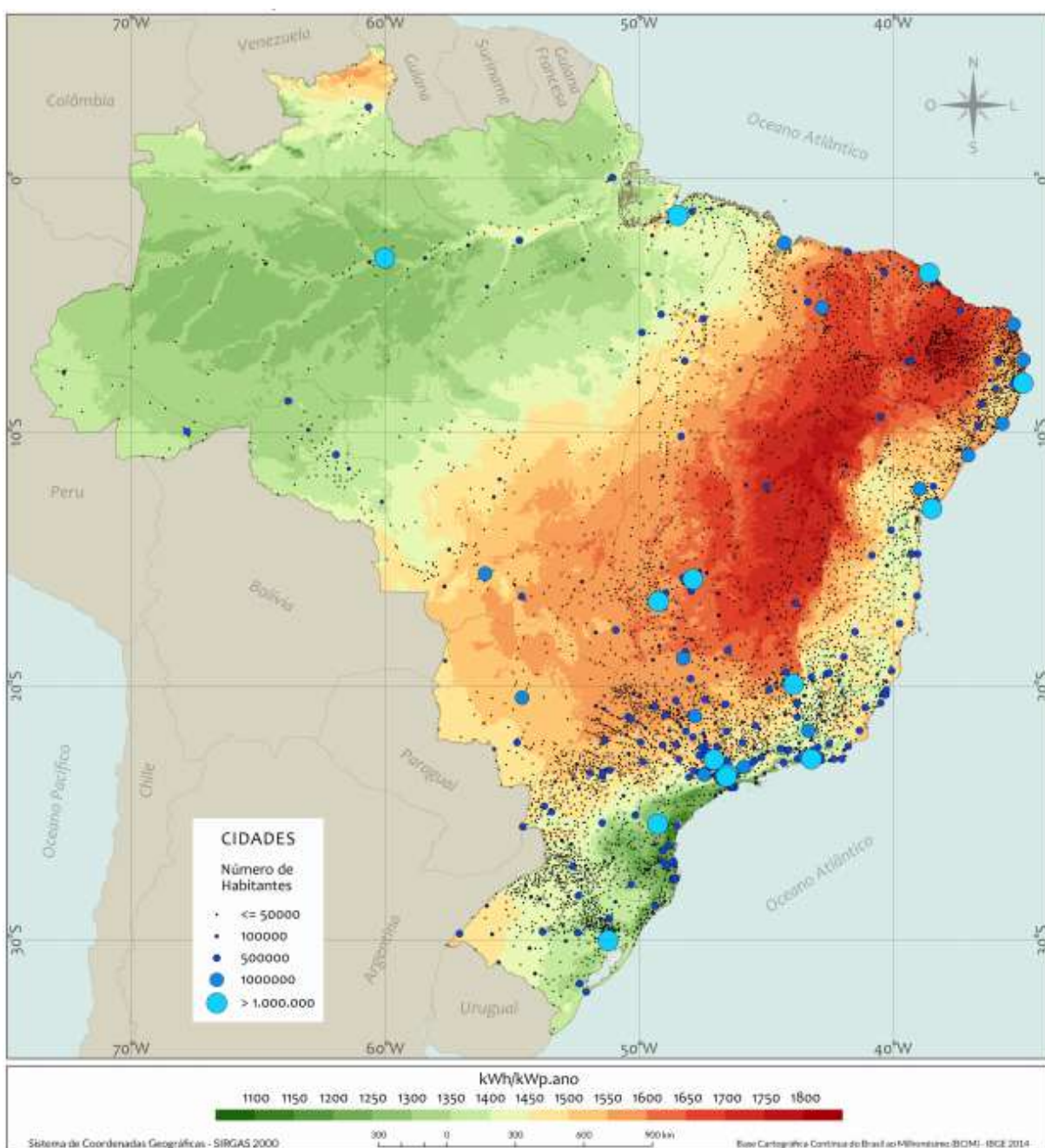
Fonte: Pereira, et al., 2017.

2.2.2 Mapas do Potencial de Geração Fotovoltaica do Brasil

Os mapas do potencial de geração fotovoltaica de uma região ilustram uma relação entre quantidade de energia elétrica gerada a partir da operação de um gerador solar por determinado período de tempo. No mapa do potencial de geração fotovoltaica da figura 8 é mostrado o rendimento energético anual máximo para todo o Brasil, sendo válido tanto para geradores de grande potência (usinas) como para os

de pequena, a exemplo dos geradores residenciais. O rendimento energético é medido em kWh por ano para cada kWp de potência instalada. Para a simplificação dos resultados, o mapa adota uma taxa de desempenho médio anual de 80%, a qual representa a performance de um gerador solar corretamente projetado e instalado, construído com componentes de boa qualidade e certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). A unidade Wp (watt-pico) é usada para indicar que a potência nominal do gerador só é atingida em condições ideais.

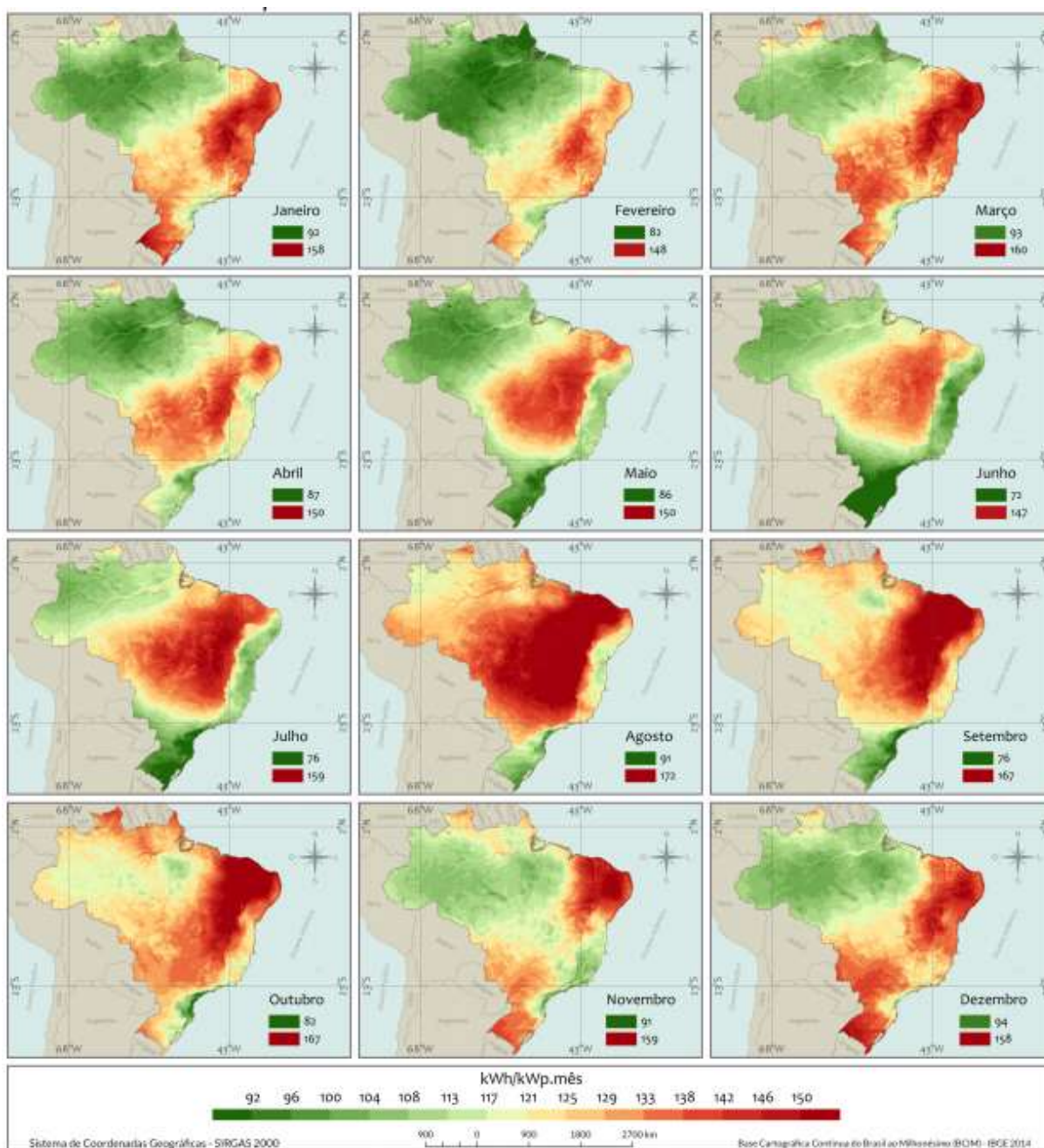
Figura 8 — Potencial de geração fotovoltaica - rendimento energético anual.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

O mapa do potencial de geração fotovoltaica da figura 9 mostra o rendimento energético mensal máximo para todo o Brasil, também válido para geradores de diferentes potências e com taxa de desempenho médio de 80%. Esse mapa mostra a variação do potencial de geração mês a mês, apresentando, também, os valores máximos e mínimos registrados para um dado mês. Observa-se que as regiões mais ao Sul do Brasil têm grandes variações ao longo do ano, mas ainda assim têm bom potencial para o aproveitamento da energia solar.

Figura 9 — Potencial de geração fotovoltaica - rendimento energético mensal.



Fonte: Pereira, et al., 2017.

Considerando o potencial de geração fotovoltaica das regiões Sul e Sudeste, de acordo com o mapa da figura 9, um ponto importante a ser considerado é que a produção de energia para essas regiões é máxima no verão, justamente o período no qual o Operador Nacional do Sistema (ONS) registra máximos de demanda. Com efeito, o uso de geradores solares integrados às edificações e conectados à rede elétrica, uma configuração na qual os geradores alimentam as cargas locais quando podem e injetam o excesso da energia produzida na rede elétrica pública, com vistas a gerar créditos para uso futuro, pode reduzir a importância desses picos, facilitando a operação do Sistema Interligado Nacional (PEREIRA, et al., 2017).

Ademais, cabe destacar que, no caso da geração centralizada, por ora observa-se que as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste são as mais atrativas, uma vez que são regiões com maiores rendimentos médios anuais. No entanto, até mesmo no Sul esse tipo de geração pode ser implementado, uma vez que no verão a irradiação para essa região é bastante alta

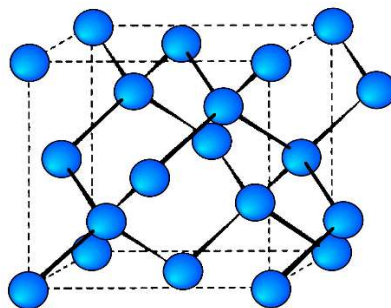
2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico consiste na transformação da luz em energia elétrica por células solares. É um processo no qual se utilizam materiais semicondutores, tais como o silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio. A tecnologia que emprega o silício cristalino como material de base (substrato) é a mais comum e, por isso, é descrita a seguir, a nível microscópico.

O silício possui 14 prótons e, no seu estado fundamental, 14 elétrons. Com efeito, há 4 elétrons na sua camada de valência (KOTS, TREICHEL, WEAVER, 2009).

Quando um cristal de silício é constituído, cada átomo forma 4 ligações covalentes simples com 4 átomos vizinhos, formando uma estrutura conhecida como teia de diamante, ilustrada na figura 10. Assim acontece, porque, em cada ligação, há o compartilhamento de um par de elétrons entre átomos adjacentes, o que significa que, com 4 ligações, cada átomo do cristal tem sua camada de valência completamente preenchida com 8 elétrons, de acordo com a regra do octeto. Nesse arranjo, os átomos atingem um estado estável (CASTRO, 2002).

Figura 10 — Estrutura em teia de diamante de um cristal de silício.



Fonte: Butane, 2018.

Para que os elétrons possam se deslocar no cristal, estes têm que adquirir energia para saírem da banda de valência e passarem para a banda de condução. Ao fazerem isso, deixam uma lacuna nos átomos aos quais pertenciam, lacunas que passam a se comportar como uma carga positiva até que outro elétron a preencha. No entanto, ainda que uma fonte de energia excite os elétrons de um cristal de silício puro, não seria possível o estabelecimento de uma corrente no mesmo, dado o movimento aleatório dos elétrons no material. Tão logo as lacunas fossem criadas, já acabariam por serem preenchidas por outros elétrons, ficando impossível o aproveitamento do cristal para a geração de energia elétrica (CASTRO, 2002).

Para que uma corrente se estabeleça, deve haver um campo elétrico entre duas zonas do material, o qual faça com que os elétrons livres se movimentem na mesma direção e sentido, o que é possível com a dopagem do silício.

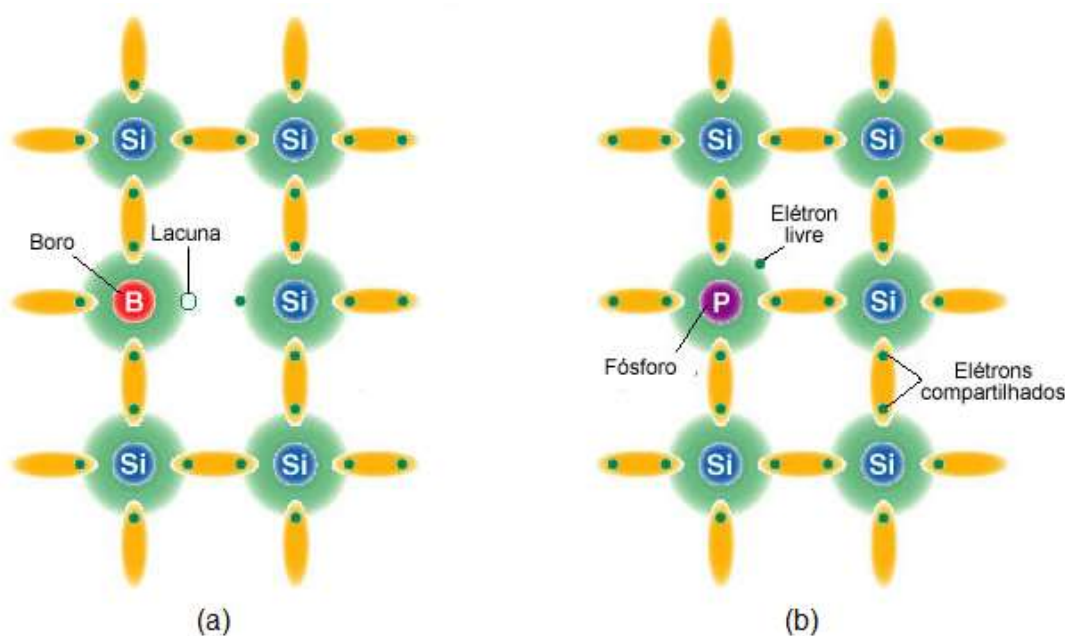
O processo de dopagem consiste em adicionar pequenas quantidades de outros elementos químicos ao cristal, como por exemplo o boro e o fósforo, com a finalidade de alterar suas propriedades elétricas (NASCIMENTO, 2004)

Segundo Kots, Treichel e Weaver (2009), o boro tem 3 elétrons na valência e, por isso, tende a formar 3 ligações covalentes simples com outros elementos. Assim, apresenta uma camada de valência com 6 elétrons em seus compostos, sendo uma exceção à regra do octeto. Ele até pode acomodar um quarto par de elétrons, desde que este seja fornecido por um outro átomo, em uma ligação covalente coordenada. Já o fósforo possui 5 elétrons na valência, podendo aumentar esse número para até 12, dependendo do composto, através da hibridização de orbitais. Ou seja, embora apresente a tendência de realizar 3 ligações covalentes, pode aumentar esse número para até 6, dependendo do composto.

No caso da introdução do boro no substrato, cada átomo de boro liga-se a apenas 3 átomos de silício, ficando, então, um quarto átomo de silício vizinho com a sua camada de valência incompleta (7 elétrons). Essa situação é ilustrada na figura 11a. Em outras palavras, cria-se uma lacuna no material, a qual tenderá a atrair um elétron. A rigor, o material continua eletricamente neutro, uma vez, em termos ideais, o número de prótons continua igual ao número de elétrons (BOYLESTAD, NASHELSKY, 2013). No entanto, como essa região comporta-se como uma carga positiva, é chamada de região ou camada p, e o boro de dopante p.

Quando, por outro lado, introduz-se fósforo no substrato, cada átomo de fósforo liga-se a 4 átomos de silício, ficando excedente um elétron da sua camada de valência, conforme mostrado na figura 11b. Esse elétron fica fracamente ligado ao seu átomo, passando, facilmente, para a banda de condução do material. Nesse sentido, o fósforo tende a expelir um elétron. O material permanece eletricamente neutro, pelas mesmas razões descritas para a estrutura do tipo p. Pelo fato de essa região se comportar como uma carga negativa, é dita região ou camada n, e o fósforo de dopante n.

Figura 11 — Cristal de silício dopado com: (a) boro, um dopante p e (b) fósforo, um dopante n.



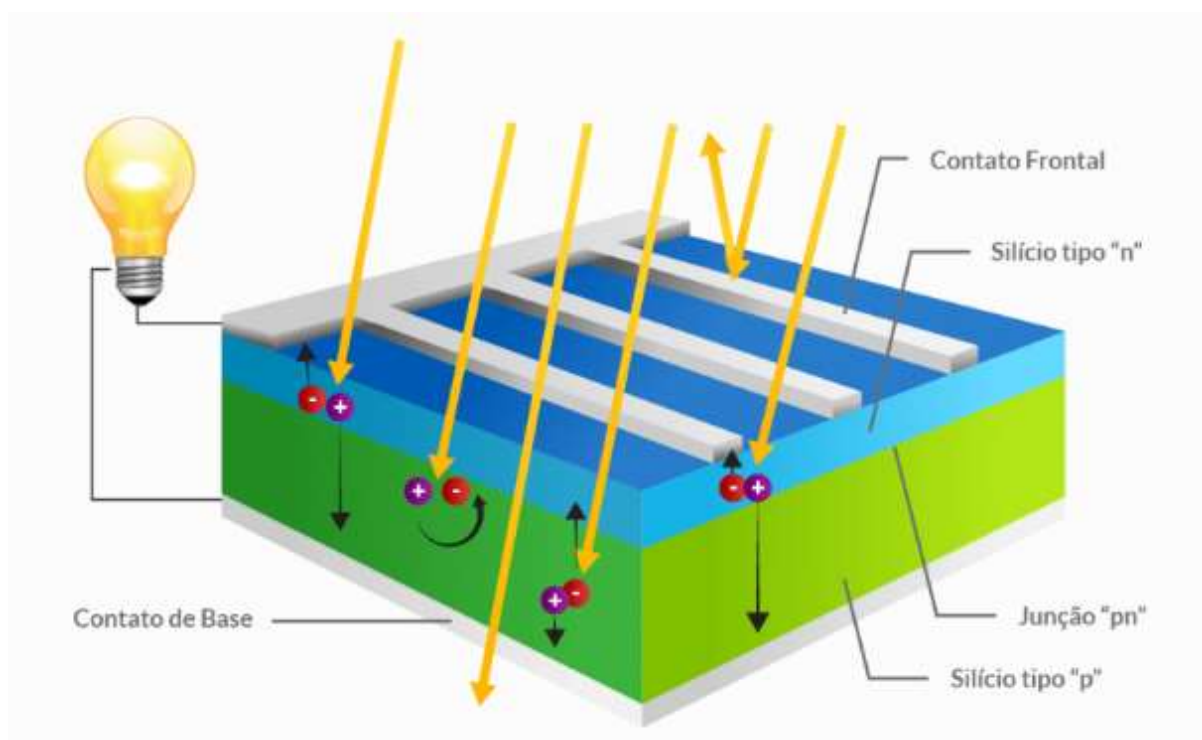
Fonte: Infoescola, 2018.

Quando as camadas p e n são justapostas, formando a chamada junção p-n, os elétrons livres da camada n migram para as lacunas da camada p. Assim, a

camada p passa a ter carga elétrica negativa, enquanto que a camada n, carga positiva, estabelecendo-se um campo elétrico entre elas (MACHADO, MIRANDA, 2014).

Quando a célula é exposta à luz, com a camada n voltada para o Sol (PORTAL ENERGIA, 2018), os fótons incidentes excitam parte dos elétrons do material, dissociando-os dos núcleos dos seus átomos. Assim, tanto as lacunas como os elétrons experimentam uma força eletrostática por estarem imersos em um campo elétrico, migrando, respectivamente, para a região de menor e de maior potencial elétrico. Ou seja, as lacunas são aceleradas para a camada p, enquanto que os elétrons livres, para a camada n. Esse fluxo produz uma tensão entre as partes, o chamado efeito fotovoltaico. Acoplando contatos metálicos na parte superior e inferior da placa, é possível conectá-la a um circuito, produzindo energia elétrica. Um esquema de uma célula fotovoltaica de silício cristalino é mostrado na figura 12.

Figura 12 — Efeito fotovoltaico em uma célula de silício cristalino.



Fonte: Bluesol, 2018.

2.4 TECNOLOGIAS DAS PLACAS SOLARES

Dentre as várias tecnologias disponíveis para a construção de células solares, sobressaem-se, em ordem decrescente de maturidade, a de silício cristalino

(c-Si), de silício amorfo hidrogenado (a-Si), de Telureto de Cádmiio (CdTe) e as que utilizam os compostos disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS) e disseleneto de cobre, gálio e índio (Cu(InGa)Se₂ ou CIGS) (RÜTHER, 2004).

A seguir são comentadas as principais características de cada tecnologia.

2.4.1 Células de Primeira Geração

A tecnologia do silício cristalino foi a primeira a aparecer no mercado, ficando as células que a empregavam conhecidas como células de primeira geração. Embora com processo de produção caro, o c-Si continua sendo o líder de uso para aplicações fotovoltaicas terrestres em qualquer escala dentre a tecnologias disponíveis, dada a sua confiabilidade, robustez e eficiência na conversão de energia (RÜTHER, 2004).

2.4.1.1 Silício Cristalino (c-Si)

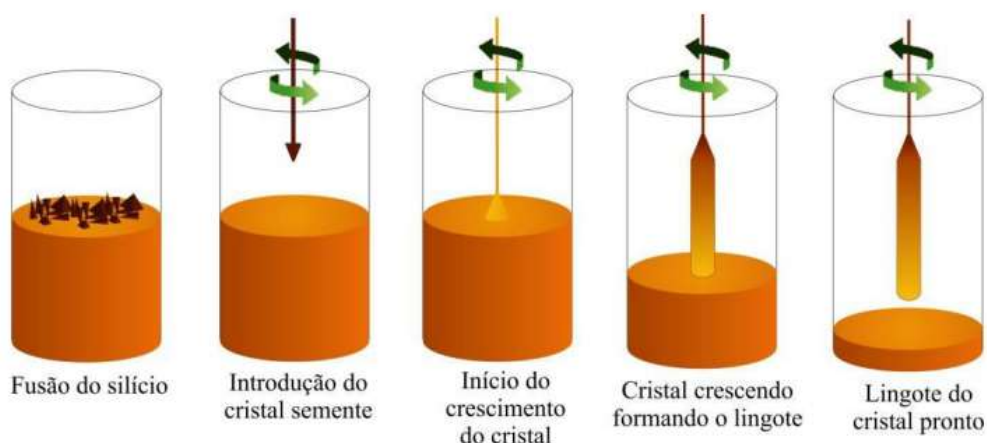
Há dois tipos de silício cristalino: o monocristalino (m-Si) e o policristalino (p-Si).

O m-Si é obtido pelo processo de Czochralski, um método industrial para a produção de monocristais usados em vários materiais eletrônicos e ópticos (Science Direct, 2018). Ele consiste em imergir um cristal semente preso a uma haste em um cadinho contendo silício fundido (temperatura de 1420 °C). Em seguida, a haste é puxada para cima e, ao mesmo tempo, rotacionada. Como o cristal semente tem uma orientação definida, controlando-se com precisão a temperatura da massa fundida e as velocidades de subida e de rotação da haste, extrai-se um grande lingote monocristalino de silício, como é mostrado na figura 13 (TOP ALTERNATIVE ENERGY SOURCES, 2018).

Assim, podem ser feitos tarugos de até 30cm de diâmetro com vários metros de comprimento, sendo estes, em seguida, usinados em barras semiquadradas e cortados transversalmente em lâminas de, aproximadamente, 0,3mm de espessura (PORTAL ENERGIA, 2004).

Também é feita a lapidação e o polimento dessas lâminas, bem como processos de difusão/dopagem e deposição das trilhas condutoras para a interconexão das células (RÜTHER, 2004).

Figura 13 — Processo de fabricação do m-Si.



Fonte: Machado; Miranda, 2014.

Vale lembrar, então, que boa parte do cristal é perdida na forma de pó de serragem durante esse processo. Assim, com todas essas operações, que envolvem a fusão do material e as etapas complementares citadas, o custo produtivo do material é bastante alto e, até então, tem se justificado pela eficiência que o produto apresenta na conversão fotovoltaica de energia, entre 15 e 18%, a mais alta entre todas as tecnologias conhecidas (PORTAL ENERGIA, 2004).

Existe uma previsão de que o m-Si entrará em desuso, visto que as possibilidades de redução do seu custo produtivo praticamente se esgotaram, em contrapartida aos avanços conquistados em outras tecnologias mais modernas (RÜTHER, 2004).

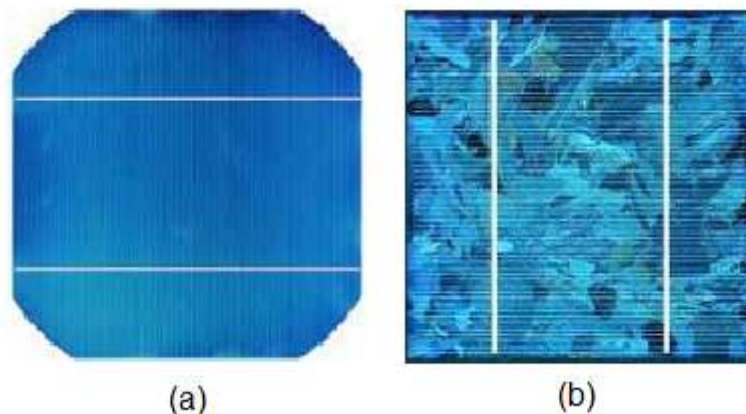
Com relação ao p-Si, este apresenta um custo produtivo menor, pois não resulta do método de Czochralski, mas da fusão do silício em moldes especiais, algo muito mais simples. Uma vez derretido, o silício é esfriado lentamente, solidificando-se. Assim, forma-se um bloco com estrutura microscópica composta por vários cristais, por isso silício policristalino. A partir daí, o processamento do lingote é muito semelhante ao do m-Si. (SOLAR BRASIL, 2018).

Vale destacar a possibilidade de se obter o p-Si no formato de lâminas, a partir da deposição deste sobre substratos rígidos, o que dispensa o caro trabalho de fatiamento do bloco, dado que o material já é obtido na espessura desejada (RÜTHER, 2004).

As superfícies de separação dos muitos cristais presentes nas lâminas de p-Si reduzem a eficiência dele quanto à conversão fotovoltaica de energia, deixando-

a entre 13 e 15%, uma eficiência um pouco menor do que a observada nas peças de m-Si. A figura 14 mostra a diferença no aspecto macroscópico entre o m-Si e o p-Si (PORTAL ENERGIA, 2004).

Figura 14 — Exemplos de placas fotovoltaicas: (a) de m-Si e (b) de p-Si.



Fonte: Portal Energia, 2004.

2.4.2 Células de Segunda Geração

As células de segunda geração são aquelas de filmes finos inorgânicos, com a proposta de diminuir o custo produtivo observado nas células de primeira geração (CARVALHO; CALVETE, 2010).

Filmes finos, da ordem de 0,001 mm de espessura, significam reduzidos custos de produção em função da pequena quantidade de material e de energia envolvidos e da possibilidade de produção em larga escala com a automação do processo produtivo (RÜTHER, 2004).

2.4.2.1 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

O silício amorfo não forma uma rede cristalina uniforme. Seus átomos se unem de maneira desordenada, ficando muitos deles sem completar 4 ligações. Isso significa a presença de muitas lacunas que tendem a se combinar com elétrons livres, prejudicando o estabelecimento de corrente elétrica na célula. Com vistas a contornar esse problema, o material é hidrogenado, ou seja, grande parte dos átomos de boro com ligações pendentes se liga a átomos de hidrogênio, após o que a densidade das

lacunas do substrato diminui, aumentando a sua condutividade elétrica (MACHADO, MIRANDA, 2014).

No processo de produção desse tipo de célula fotovoltaica, a obtenção do substrato é feita a partir da deposição do silano (SiH_4) por descargas induzidas por radiofrequência ou através de processos a plasma. Para a confecção de um filme tipo p, utiliza-se uma atmosfera de silano com 1% de B_2H_6 , enquanto que se o objetivo for obter um tipo n, o silano deve conter 1% de PH_3 (MACHADO, MIRANDA, 2014).

Com esses métodos produtivos, os quais acontecem sob temperaturas razoavelmente baixas ($<300^\circ\text{C}$), um filme fino de material pode ser depositado sobre materiais de baixo custo, como plástico, vidro, entre outros, possibilitando a criação de células leves, flexíveis, semitransparentes e com uma grande variedade de tamanhos (RÜTHER, 2004).

Um ponto negativo do material amorfo é a sua baixa eficiência, pois embora em laboratório já tenham apresentado um valor de 12,5% (MACHADO; MIRANDA, 2014), esta diminui após um período de 6 a 12 meses de operação, devido à degradação que o material sofre induzida pela luz (Efeito Staebler-Wronski). Após esse período, a eficiência da célula se estabiliza entre 5 e 8% (PORTAL ENERGIA, 2004).

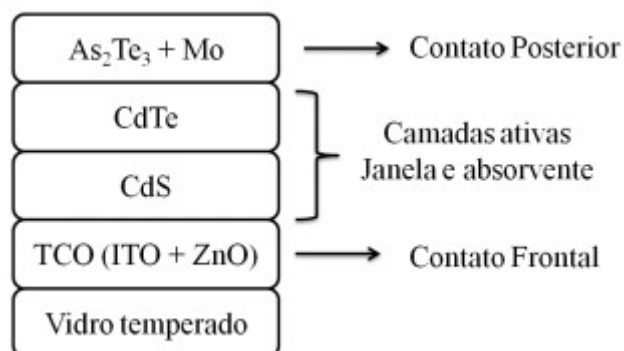
2.4.2.2 Telureto de Cádmiio (CdTe)

Segundo Rütther (2004), um recente competidor do c-Si e do a-Si é o CdTe , pois também permite a produção de filmes finos em larga escala e com baixos custos produtivos.

Essa tecnologia vale-se da sobreposição de filmes que formam uma heterojunção, conhecida como janela/absorvedor. Um esquema desse tipo de célula é mostrado na figura 16 (MACHADO; MIRANDA, 2014).

A primeira camada depositada é a do contato frontal, sendo composta de óxido condutor transparente (TCO). A segunda, é composta de sulfeto de cádmio (CdS), sendo do tipo n e transparente, daí o porquê é chamada de janela. Estando justaposta a esta, está a camada de CdTe , um semicondutor do tipo p, criando a junção p-n. A última camada é composta de um metal, formando o contato posterior da célula (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Figura 15 — Esquema de uma célula de CdTe.



Fonte: Bosio, et al., 2010.

Módulos fotovoltaicos com esses componentes podem ser feitos massivamente com deposição por vaporização, com reduzidos custos produtivos em relação às células de primeira geração, apresentando eficiência entre 6 a 9%, ligeiramente maior do que a observada no a-Si (PORTAL ENERGIA, 2004).

2.4.2.3 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) e Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio (CIGS)

O CIS pode formar liga com o gálio, originando o CIGS. Ambos os materiais podem ser semicondutores ativos para células fotovoltaicas, com filmes de 0,003mm depositados sobre um substrato de vidro não solidificado de, aproximadamente, 3mm de espessura (PORTAL ENERGIA, 2004).

Essa tecnologia, diferentemente do a-Si, não apresenta perda de eficiência em função da exposição à luz, mas deve ser bem selada contra umidade para não apresentar problemas de estabilidade em ambientes bastante quentes e húmidos. Os módulos CIS e CIGS têm eficiência entre 7,5 e 9,5%, a mais alta entre as tecnologias de película fina e os correlatos custos de produção tendem a ser menores do que os referentes ao silício cristalino (PORTAL ENERGIA, 2004).

2.4.3 Células de Terceira Geração

As células de terceira geração são emergentes e ainda não estão disponíveis no mercado. Elas têm tecnologias que visam aumentar a eficiência das

células de segunda geração mantendo baixos os custos produtivos (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Nesse grupo encontram-se, entre outras, placas de filmes orgânicos, as sensibilizadas por corante e as baseadas em pontos quânticos, apresentadas com mais detalhes a seguir (RÜTHER, 2004).

2.4.3.1 Células Orgânicas

Assim como as células de segunda geração, as células orgânicas possuem duas camadas principais: uma que doa elétrons, geralmente feita com polímeros conjugados a exemplo do poli(3-hexiltiofeno), também chamado de P3HT, e outra que os recebe, composta de fulerenos, como o éster metílico do ácido [6,6]-fenil-c61-butírico, conhecido também por PCBM (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Segundo Greenham (2013), quando a luz incide sobre o polímero, ocorre a geração de um elétron conjugado a uma lacuna, ou seja, um par elétron-lacuna, conhecido formalmente como éxciton. Assim, passos adicionais são usados para separar a carga positiva da negativa, diferentemente do que ocorre no silício

A eficiência dessas células está entre 3 e 7%, com alguns pesquisadores conseguindo valores em torno de 9% (MACHADO; MIRANDA, 2014).

2.4.3.2 Células Sensibilizadas por Corante

Também chamadas de DSSC (sigla inglesa para Dye-Sensitized Solar Cell), essas células usam um corante para transferir um elétron excitado para uma camada de óxido condutor (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Diferentemente das células convencionais de junção pn, as DSSC não têm portadores livres gerados no semicondutor, mas no corante. Para semicondutores de elevado hiato energético, ou seja, com grande diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução ($> 3\text{eV}$), a radiação só é absorvida na faixa do ultravioleta. No entanto, com a adsorção de um corante na sua superfície, a absorção passa a contemplar a faixa do visível do espectro solar, viabilizando a conversão fotovoltaica de energia (SEQUEIRA, 2012).

Segundo Machado e Miranda (2014), a eficiência dessas células atualmente está em torno de 9%.

2.4.3.3 Células Baseadas em Pontos Quânticos

Conhecidas como QDSSC (sigla inglesa para *Quantum Dots Sensitized Solar Cells*), essas células usam a tecnologia dos pontos quânticos para converter luz em energia elétrica (PENA, 2009).

Diversos materiais podem ter o seu tamanho reduzido da escala macroscópica para a nanométrica. No caso de muitos semicondutores, essa ação implica alterações nas suas propriedades físico-químicas. A manipulação do tamanho e da estrutura de partículas semicondutoras nanométricas pode alterar suas propriedades ópticas, o que é muito interessante para várias aplicações modernas. (SANTOS; FARIAS; FONTES, 2008).

De acordo com Klimov (2010), a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução (*band gap*) de um semicondutor é um parâmetro importante na sua caracterização. Para semicondutores em tamanho macroscópico, essa diferença energética é fixa, uma particularidade do material. No entanto, o mesmo não se observa quando o semicondutor é reduzido para dimensões menores do que 10nm, faixa de tamanho em que se verifica o regime de confinamento quântico, no qual as excitações eletrônicas são influenciadas pelas limitações físicas do corpo. Dito de outra maneira, os espectros de energia dos portadores de carga elétrica são modificados quando de alterações no tamanho da partícula. Esse fenômeno é chamado de Efeito de Tamanho Quântico, ao passo que as nanopartículas que o exibem são denominadas de pontos quânticos.

Quanto menor for o tamanho do ponto, maior será o seu *band gap*, o que significa que é preciso mais energia para que um dos seus elétrons deixe a banda de valência para a banda de condução. Em sentido contrário, se o seu tamanho aumenta, o seu *band gap* diminui (BRASIL JÚNIOR, 2010).

Com efeito, o uso desses pontos, os quais têm um espectro energético discretizado, possibilita a absorção ou emissão de energia em comprimentos de onda específicos, o que representa uma vantagem para muitos sistemas, incluindo os das células solares. Antes dessa descoberta, qualquer mudança nas propriedades ópticas de um semicondutor só era possível com a troca do material, algo mais difícil do que manipulação do seu tamanho (ALMEIDA, 2013).

Com relação à construção de células fotovoltaicas com essa tecnologia, Gonçalves (2014) afirma que é possível aumentar a eficiência de uma placa solar

usando o conceito de multijunções, no qual várias camadas de semicondutor recoberto de pontos quânticos de tamanho específico são justapostas, sendo que cada camada fica responsável por absorver luz de um dado comprimento de onda, aproveitando melhor o espectro de radiação solar.

Esse tipo de célula surgiu em laboratório em 2010, usando pontos de sulfeto de chumbo e apresentando uma eficiência de 2,9%. Com a evolução da tecnologia, em 2016, pesquisadores da Universidade de Toronto conseguiram elevar esse número a 12%. No ano seguinte, pesquisadores do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) do Departamento de Energia do Estados Unidos registraram uma eficiência de 13,4%, um novo recorde mundial, com o emprego de pontos quânticos de triiodeto de chumbo de cério (CsPbI_3) em uma célula de multijunções (NREL, 2018).

2.5 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO

2.5.1 Placas Fotovoltaicas

Também chamadas de painéis solares, correspondem a um conjunto de células solares interconectadas e são responsáveis pela conversão da energia solar em eletricidade (ECYCLE, 2018).

Segundo dados do Portal Solar (2018), os dois tipos mais comuns de placas são as de silício monocristalino e as de silício policristalino, geralmente construídas com 60 células, o que rende um tamanho típico de 1 x 1,65 m e uma massa de 18 a 20 kg. A potência dessas placas fica entre 240 e 270 Wp. Com relação aos preços, estes variam, basicamente, de acordo com o fabricante e eficiência do produto, sendo calculados por unidade de potência. No Brasil, são comuns valores de R\$ 2,50 a R\$ 2,80 por watt, o que resulta um preço entre R\$ 625,00 e R\$ 700,00 para uma placa de 250 Wp.

Para proteger as células de agentes atmosféricos, umidade e tensões mecânicas, diferentes tipos de encapsulamentos estão disponíveis. Geralmente, as células são recobertas de um material maleável, isolante e transparente, para depois serem assentadas sobre um substrato de vidro, plástico acrílico ou metal. Isso permite garantias tradicionais de 25 anos, com uma perda tolerável de eficiência de até 20% ao longo da vida útil do produto (PORTAL SOLAR, 2018).

2.5.2 Associações entre Placas Fotovoltaicas

Várias placas solares podem ser associadas para aumentar a potência útil do sistema. Assim, existem duas possibilidades: as interligações em série ou em paralelo.

De acordo com Rütther (2004), os módulos solares apresentam tensões típicas entre $12 V_{CC}$ e $100 V_{CC}$. Assim, as combinações série e paralelo entre as placas da aplicação devem ocorrer de maneira a compatibilizar o nível de tensão do arranjo com o da entrada do inversor solar.

Se a tensão dos módulos tomados isoladamente for diretamente compatível com a entrada do inversor, todas as placas podem ser ligadas em paralelo. Nesse tipo de associação, a tensão do arranjo não se altera com a adição de um ou mais módulos, mas a capacidade de entrega de corrente é aumentada. Isso significa tensões baixas no circuito CC, maior segurança para os usuários e vantagem na questão do sombreamento, pois uma sombra sobre um dos módulos não afetará o desempenho dos demais. Contudo, tensões baixas associam-se a altas correntes, demandando cabos elétricos de maior bitola e maiores perdas no cobre (RÜTHER, 2004).

Para o caso em que a tensão dos módulos isolados é menor do que a de operação do inversor, a ligação em série pode ser feita. Assim, a corrente do arranjo não se altera, mas a tensão do mesmo cresce com a adição de um ou mais módulos. Isso permite o emprego de cabos de menor diâmetro, uma vez que a corrente é diminuída quando do aumento de tensão. Nessa configuração, a questão do sombreamento deve ser vista com atenção, pois a placa com menor iluminação é que determinará a corrente circulante nos vários módulos da associação, o que pode representar um significativo impacto no desempenho do sistema (RÜTHER, 2004).

2.5.3 Caixa de Junção Geral e Componentes de Proteção

As caixas de junção ou *string boxes* são usadas para a interconexão dos cabos de corrente contínua vindos das placas solares. Acomodam, também, componentes de proteção tais como seccionadoras, disjuntores, fusíveis e dispositivos de supressão de surtos, a fim de disponibilizar um *link* CC devidamente protegido para o inversor solar. É comum, ainda, que a saída do inversor também seja

dirigida à caixa de junção, para que o circuito CA também passe por dispositivos de proteção antes de se conectar às cargas locais. As caixas de junção, na maioria dos casos, são instaladas próximas do inversor, mas há casos em que são fixadas no telhado, próximas das placas solares, sendo construídas, então, com grau de proteção contudente, para suportar condições ambientais adversas (SOL CENTRAL, 2018).

2.5.4 Sistema Inversor ou Conversor CC-CA

As placas solares geram energia em corrente contínua, ao passo que as edificações a demandam em corrente alternada. Assim, faz-se necessário o uso de inversores de frequência, conhecidos também como conversores CC-CA.

Há dois tipos básicos de inversores: os de rede, usados para sistemas interligados à rede pública de energia, e os autônomos, os quais são empregados em sistemas isolados (PORTAL ENERGIA, 2004).

Rüther (2004), afirma que, considerando a tendência de se conectar geradores solares ao barramento da concessionária local, os inversores de rede são os mais usados atualmente e são subdivididos em dois tipos: os comutados pela própria concessionária de energia, no qual o sinal da rede é usado para sincronizar o sinal de saída do inversor com a rede, e os auto-comutados, os quais possuem circuitos eletrônicos próprios para fazê-lo. A escolha desses componentes deve levar em conta a eficiência energética, inclusive quando o mesmo se encontra em standby; a segurança, dado que sob hipótese alguma tais componentes podem injetar energia oriunda dos módulos quando a rede elétrica estiver desligada; a qualidade da energia gerada, em que pesa o nível de poluição harmônica gerada; e a compatibilidade com o arranjo fotovoltaico, em termos de tensão e de potência. Segundo informações do Sharenergy (2018), uma função importante desempenhada pelos inversores é a de rastrear o ponto de máxima potência (MPPT, sigla inglesa para *Maximum Power Point Tracking*). Essa função garante que as placas solares sempre operem produzindo o máximo de energia possível, uma vez que o inversor está constantemente ajustando sua tensão e corrente de entrada a fim de operar no ponto ótimo para aquele dado momento.

No passado, era comum utilizar-se um único inversor para todo o sistema, independentemente do seu porte. No entanto, essa prática está em desuso, existindo,

atualmente, uma tendência de se empregar vários equipamentos idênticos de menor potência em paralelo (RÜTHER, 2004).

2.5.5 Cabos e Conectores CC

No lado CC, existem os cabos dos módulos e o cabo principal CC. Este estabelece a ligação entre a caixa de junção geral e o inversor, enquanto aqueles são os usados para conectar os módulos à caixa de junção.

Os cabos dos módulos, por alguns autores também chamados de cabos de fileiras, são geralmente usados em ambiente externo e por isso têm de ter características contundentes. Com o objetivo de se evitarem curto-circuitos, os condutores positivos e negativos são cabos singelos e que, além disso, não são acomodados lado a lado. Apresentam isolamento duplo e nas versões comuns suportam temperaturas de até 60 °C. Considerando que já se constataram temperaturas de até 70 °C em telhados com telhas fotovoltaicas, há também versões ainda mais robustas desse tipo de condutor, os chamados cabos solares, os quais são resistentes aos raios ultra-violetas e suportam temperaturas entre -55 °C e 125 °C (PORTAL ENERGIA, 2004).

As conexões desses cabos também devem ser de alta qualidade. Caso contrário, arcos podem surgir com potencial risco de incêndio. São comuns, então, o uso de terminais tubulares ou olhais nos cabos, bem como conectores com aperto por parafusos ou molas. Têm-se à disposição, ainda, conectores de engate rápido dedicados, os quais asseguram uma boa conexão e agilizam a instalação do sistema.

Com relação ao cabo principal CC, este também pode ser do mesmo tipo dos cabos dos módulos. Caso a caixa de junção esteja fixada externamente e os cabos escolhidos não sejam resistentes aos raios ultra-violetas, indica-se o uso de eletrodutos.

2.5.6 Cabos e Conectores CA

Estes cabos estabelecem as ligações entre o inversor e as cargas elétricas da edificação. Não são cabos especiais. Para inversores monofásicos são comumente usados cabos tripolares ao passo que para instalações trifásicas, cabos de cinco pólos. Com relação aos conectores, podem ser usados terminais comuns, seguindo

as boas práticas de qualquer instalação de baixa tensão em CA. Ademais, todas as normas de instalações elétricas pertinentes devem ser respeitadas (RÜTHER, 2004).

2.5.7 Acumuladores

Para os sistemas autônomos, o armazenamento de energia é um assunto fundamental, dado que a produção de energia não ocorre ao mesmo tempo que o consumo, o que implica a necessidade de baterias no sistema (PORTAL ENERGIA, 2004).

Nas instalações fotovoltaicas, as baterias de chumbo ácido são as mais comuns para armazenamentos de curta duração. Elas têm ótima relação preço/eficiência e suportam ampla faixa de correntes de descarga. São comuns banco de baterias de 0,1 kWh a 100 kWh, embora alguns sistemas tenham sido feitos com capacidades na ordem dos MWh (PORTAL ENERGIA, 2004).

2.5.8 Controladores de Carga

Nos sistemas com baterias, é necessário o uso de controladores de carga para o carregamento das mesmas. Com efeito, é preciso que o arranjo dos painéis fotovoltaicos forneça ao controlador uma tensão maior do que a tensão da bateria, para que a recarga das mesmas seja possível. Em uma bateria de 12 V_{CC}, por exemplo, a tensão de carga poderá atingir até 14,4 V_{CC}. Assim, o arranjo dos painéis solares deve fornecer uma tensão entre 15 V_{CC} e 18 V_{CC} (PORTAL ENERGIA, 2004).

Para os períodos de baixa irradiância, é possível que a tensão dos módulos solares seja inferior à tensão dos acumuladores, criando uma corrente reversa no circuito, a qual significa desperdício de energia. Para evitar que isso aconteça, em geradores autônomos é comum o uso de diodos de bloqueio, os quais impedem que a corrente circule em sentido contrário no circuito.

As principais tarefas de um bom controlador de carga são: garantir a carga otimizada dos acumuladores, protegê-los de sobretensões, descargas profundas e indesejadas, e informar o estado de carga dos mesmos. Verifica-se, então, que tais componentes devem operar de maneira flexível, levando em conta parâmetros tais como tensão máxima de carga e mínima de descarga das baterias, o tipo das baterias empregas, além da temperatura e idade das mesmas.

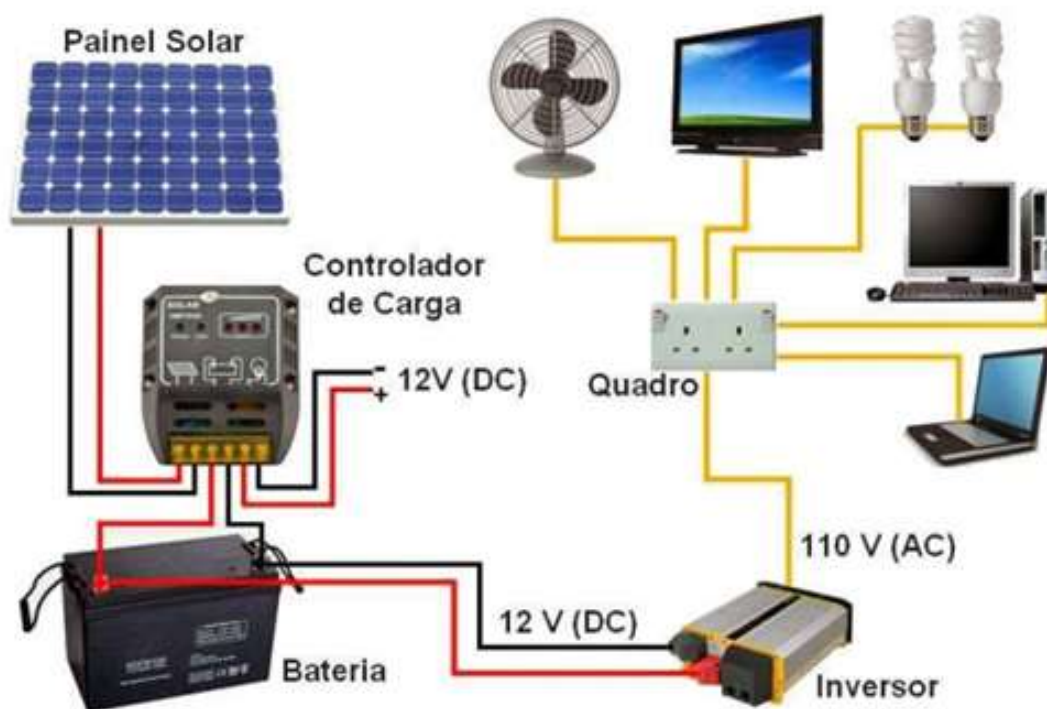
2.6 GERADORES FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS

Sistemas de geração autônomos são aqueles isolados eletricamente de outros sistemas. O seu emprego é indicado para regiões onde a rede pública de energia não se faz presente (GREENPRO, 2004).

Uma vez que a produção de energia não é constante nos sistemas fotovoltaicos usados em aplicações convencionais, faz-se necessário o uso de acumuladores de energia nesses geradores autônomos, para que o abastecimento de eletricidade seja assegurado aos usuários. Com isso, é preciso também a presença de um controlador de carga para a recarga adequada das baterias. Um esquema de um gerador autônomo típico é mostrado na figura 21, sendo composto de:

- 1) Placas fotovoltaicas;
- 2) Controlador de carga;
- 3) Acumuladores;
- 4) Inversor de frequência.

Figura 16 — Esquema de um gerador fotovoltaico autônomo.



Fonte: Energia Solar Alfa, 2018.

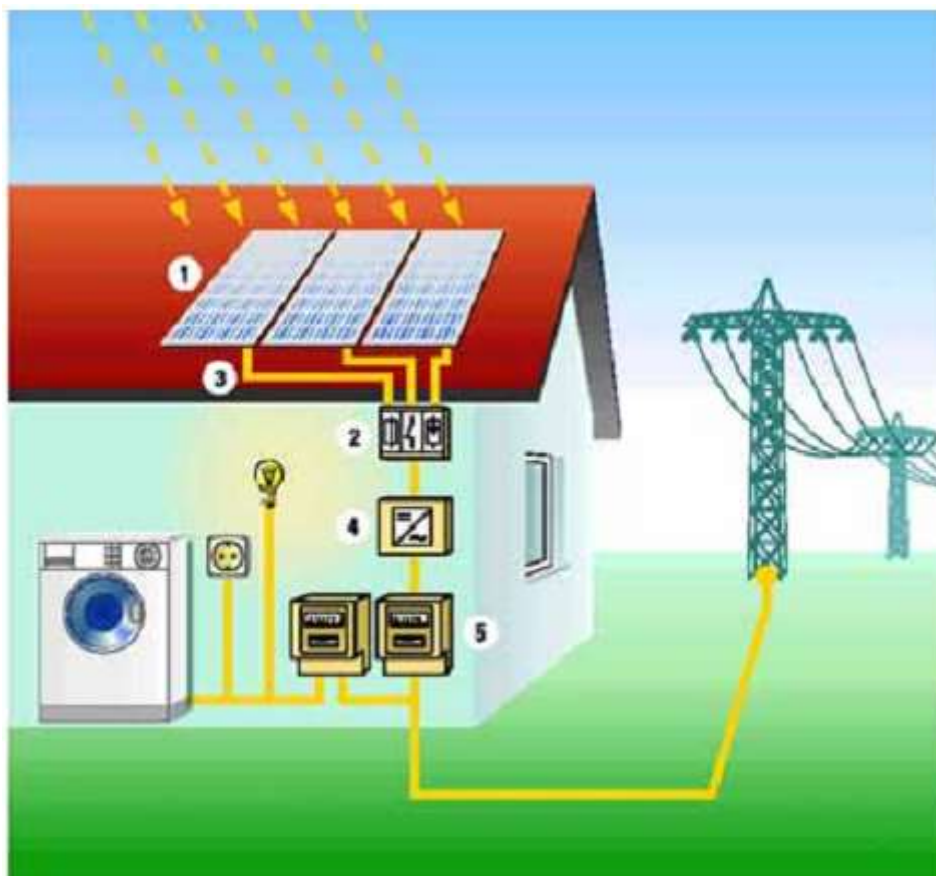
2.7 GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Sistema de geração conectado à rede elétrica funciona como uma usina em paralelo com a grandes centrais geradoras convencionais (RÜTHER, 2004).

Nesse tipo de sistema, o abastecimento de eletricidade fica assegurado aos usuários. Isso, porque no impedimento da operação do gerador, as cargas podem ser alimentadas pela rede elétrica pública. Quando a produção local de energia é viável, os possíveis excedentes de geração são injetados na rede pública, produzindo créditos energéticos para uso futuro. Assim, um gerador conectado à rede elétrica, cujo esquema é mostrado na figura 22, tem os seguintes componentes básicos:

- 1) Placas fotovoltaicas;
- 2) Caixa de junção com dispositivos de proteção e interruptor DC;
- 3) Cabos CC-CA;
- 4) Inversor de frequência;
- 5) Mecanismos de proteção e aparelho medidor.

Figura 17 — Esquema de um gerador fotovoltaico conectado à rede elétrica.



Fonte: GREENPRO, 2004.

2.8 TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES

2.8.1 Quanto ao Número de Eixos

Os seguidores solares são construídos com um ou dois eixos. Os de um eixo conseguem variar a posição das placas seguindo a posição do Sol em apenas uma direção. São, portanto, menos eficientes que os de dois eixos, os quais podem seguir o Sol em duas direções, sem desvalorizar nenhuma componente da sua movimentação (POMBAS, 2016).

Em contrapartida, segundo informações do Portal Energia (2018), sistemas de eixo único demandam menos manutenção, são menos sujeitos a avarias e mais baratos do que os de dois eixos, os quais têm um projeto mais complexo. Além disso, a diferença de rendimento entre eles é de geralmente 3%, não sendo este um valor muito expressivo. A figura 18 exemplifica cada um dos tipos citados.

Figura 18 — Tipos de seguidores solares: (a) de um eixo e (b) de dois eixos.



Fonte: Adaptado de Silva; Gouveia; Urbanetz Júnior, 2018.

2.8.2 Quanto ao Tipo de Controle

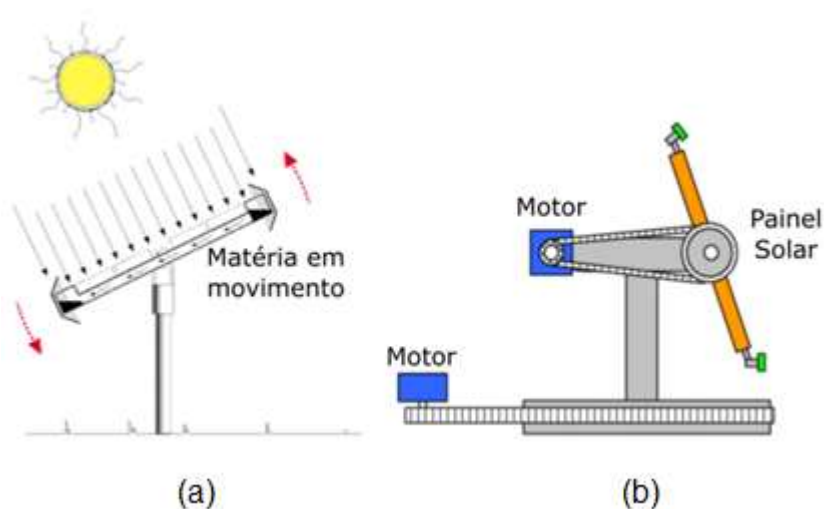
Quanto ao tipo de controle, os seguidores podem ser passivos ou ativos.

No caso de controle passivo, o posicionamento é feito de forma mecânica, através da transferência de massa entre compartimentos da parte móvel da estrutura, em função da diferença de temperatura. Uma construção desse tipo é mostrada na figura 19. No início da manhã, o compartimento da direita recebe mais radiação solar, o que aumenta a sua temperatura. Com efeito, o fluido desse compartimento, geralmente um gás, tende a ir para o compartimento do lado oposto. Isso provoca um

desequilíbrio na parte móvel do sistema, mudando a direção das placas. Esse tipo de seguidor é mais barato do que os seguidores ativos, porém menos eficientes, além de não funcionarem a baixas temperaturas por limitações físicas (expansão térmica) do fluido utilizado (CARVALHO, 2011).

No caso de controle ativo, a orientação das placas é feita por atuadores elétricos, acionados por um dado sistema de controle baseado em sensoriamento, modelos matemáticos ou imagens (POMBAS, 2016).

Figura 19 — (a) Seguidor passivo; (b) seguidor ativo.



Fonte: Pombas, 2016.

2.9 TÉCNICAS PARA RASTREIO DO SOL

2.9.1 A Partir de Sensores de Luminosidade

Uma das maneiras de posicionar placas fotovoltaicas perpendicularmente aos raios solares é empregando sensores fotossensíveis. Os sinais de saída dos sensores é que servirão de base para que o sistema de controle movimente os atuadores.

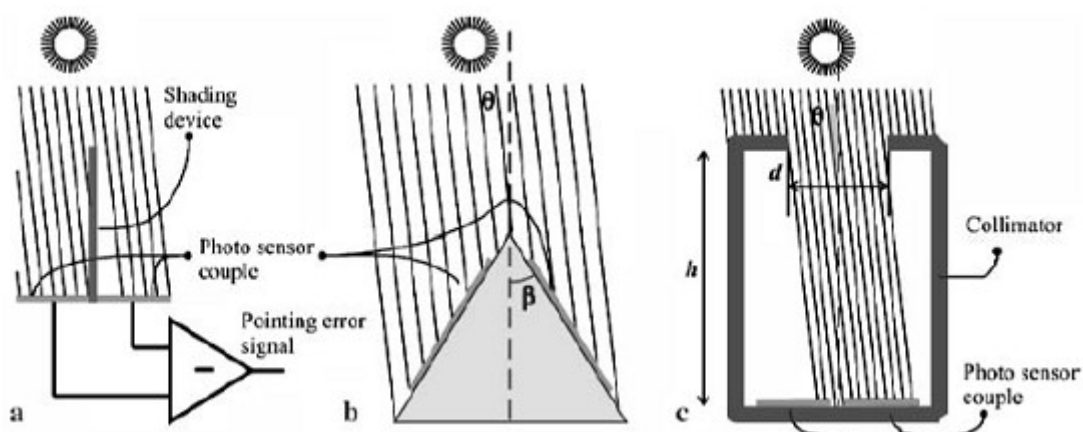
Nessa técnica, é usado pelo menos um sensor para cada eixo de movimentação do seguidor, sensor que, por sua vez, possui um par de componentes fotossensíveis. Assim, sempre que a face sensora não estiver alinhada com a direção dos raios solares, os sinais de saída do par fotossensível serão diferentes. Criando, então, um sistema de controle em malha fechada tendo como realimentação esses

sinais, o controlador pode modificar a orientação das placas fotovoltaicas buscando sempre anular o sinal de erro (CORTEZ, 2013).

Com relação à construção dos sensores de luminosidade, em alguns casos, uma aleta opaca é colocada entre o par fotossensível, para que uma sombra seja criada sobre uma delas quando do desalinhamento do sensor em relação à radiação solar direta. É o caso mostrado na figura 20a. Em outras construções, o par fotossensível é montado sobre duas superfícies inclinadas, com vistas a permitir a detecção de fluxos radiantes diferentes entre elas quando a incidência dos raios for inclinada. Essa configuração é mostrada na figura 20b. A figura 20c é outra variante construtiva: possui o par fotossensível instalado dentro de uma carenagem com uma abertura na sua parte superior. Com a inclinação dos raios solares, uma das partes medidas passa a receber menos luz do que a outra, alterando o seu sinal de saída (CORTEZ, 2013).

Uma desvantagem desse método é o efeito semiconductor de envelhecimento e, também, o acúmulo de sujeira sobre o par fotossensível, fatos que podem comprometer a fidedignidade da medição de luz.

Figura 20 — Variantes construtivas para sensores de luminosidade: (a) com aleta, (b) com superfícies inclinadas e (c) com carenagem.



Fonte: Pombas, 2016.

2.9.2 A Partir de Dados Astronômicos

Essa técnica vale-se de algoritmos que permitem calcular as coordenadas solares. Normalmente, são algoritmos que demandam grande capacidade de processamento dada a sua complexidade. Levando-se em conta dados de localização

e de tempo, alguns algoritmos são capazes de calcular a posição precisa do Sol para grandes períodos de tempo, com alguns deles oferecendo precisão de $0,0003^\circ$ (CORTEZ, 2013).

Em 1969 P.I. Cooper publicou o primeiro algoritmo capaz de fornecer a declinação solar a partir do dia do ano. Em 1971, Spencer, desenvolveu um novo algoritmo para o cálculo da declinação solar e da equação do tempo (fornece a diferença entre os tempos solares médio e verdadeiro em função do dia do ano), com $0,5^\circ$ de erro no valor da declinação nos equinócios (POMBAS, 2016).

Nos anos seguintes, vários outros pesquisadores se destacaram, conforme informações do quadro 1.

Quadro 1 — Parâmetros solarimétricos calculados por diferentes pesquisadores.

Autor	Declinação	Ascensão reta	Equação de Tempo	Ângulo de Azimute	Ângulo de Zênite
Cooper, 1969	X				
Spencer, 1971	X		X		
Swift, 1976	X				
Pitman e Vant-Hull, 1978	X		X		
Walraven, 1978	X	X		X	X
Lamm, 1981			X		
Michalsky, 1988	X	X	X	X	X

Fonte: Pombas, 2016.

O algoritmo de Michalsky é o mais usado atualmente, sendo considerado o mais completo e robusto dentre os algoritmos criados até o século XXI (POMBAS, 2016). No entanto existem outros modelos altamente precisos e possíveis de serem implementados em microprocessadores de baixo custo.

Reda e Andreas (2008), por exemplo, publicaram um algoritmo para calcular o ângulo azimutal e o ângulo de zênite com precisão de $0,0003^\circ$ para mais ou para menos, sendo válido até o ano 6000.

A necessidade de determinar a posição do Sol com grande precisão, no entanto, depende da aplicação. Sistemas de concentração necessitam de posicionamento com precisão de $0,01^\circ$. Para calibração de piranômetros (instrumentos que medem irradiância solar) a precisão deve ser ainda maior. Já para sistemas planos, erros de poucos graus são tolerados sem perdas relevantes, o que possibilita a escolha de um modelo mais simples e menos preciso entre os vários disponíveis (JP JUSTINIANO, 2018).

2.10 PRINCIPAIS COMPONENTES APLICÁVEIS A UM SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO

2.10.1 MICROCONTROLADORES

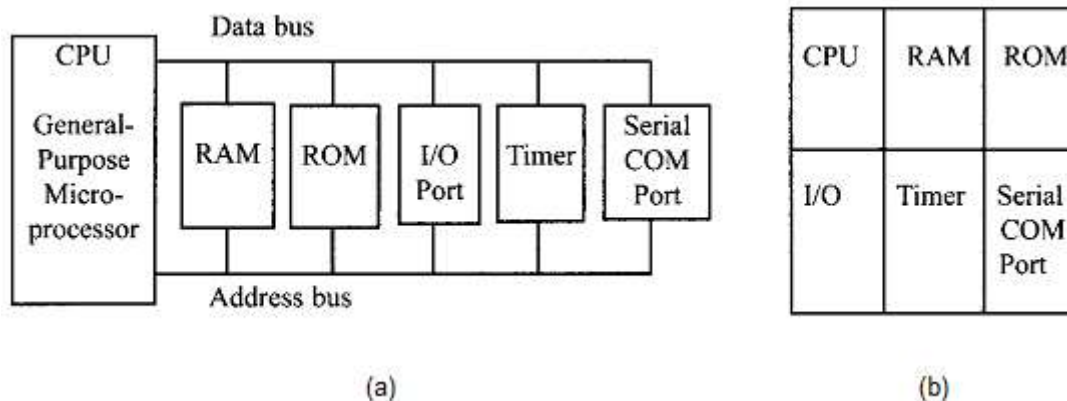
O microcontrolador é um componente eletrônico, programável, que pode ser utilizado no controle de processos lógicos. É muito comum realizar uma comparação entre um microprocessador de propósito geral e um microcontrolador, para o entendimento do porquê os microcontroladores são largamente usados em sistemas de pequeno porte.

Os microprocessadores de propósito geral são circuitos integrados com funções de cálculos e tomada de decisões, sendo também chamados de unidades centrais de processamento. Não possuem periféricos integrados, tais como memória RAM (*Random-Access Memory*) e ROM (*Read-Only Memory*), entradas e saídas de controle, entre outros. Assim, necessitam ter essas funcionalidades adicionadas para se tornarem operacionais. Isso por um lado é bom, pois um sistema microprocessado pode ser customizado, atendendo a uma demanda específica, mas por outro é ruim, porque representa custos e sistemas mais volumosos (MAZIDI; MCKINLAY; CAUSAY, 2008).

Já no caso dos microcontroladores, integrados a um processador estão todos os componentes necessários ao controle de um processo, o que inclui memórias RAM e ROM, temporizadores, portas de entradas e saídas, entre outros. Com efeito, em uma única pastilha de silício várias tarefas podem ser executadas, o que torna esses componentes ideais para aplicações mais simples, de baixo custo e com restrições de tamanho (NOVA ELETRÔNICA, 2018).

A figura 21 ilustra a diferença entre as peças em referência.

Figura 21 — (a) Microprocessador e seus periféricos independentes e (b) microcontrolador e seus periféricos integrados.



Fonte: Mazidi; McKinlay; Causay, 2008.

No que diz respeito à escolha de microcontroladores, alguns critérios são de fundamental importância: a velocidade de processamento, o tipo de encapsulamento, o consumo de potência, a quantidade de memória RAM e ROM, respectivamente destinadas ao armazenamento de dados (informações a serem processadas) e do código (instruções para a CPU - *Central Processing Unit*), o número de entradas e saídas, a facilidade de atualização para uma versão de melhor performance e o custo por unidade (MAZIDI; MCKINLAY; CAUSAY, 2008).

A seguir, são citadas duas famílias de microcontroladores bastante populares e compatíveis com a proposta deste trabalho.

2.10.1.1 Microcontroladores PIC

Os microcontroladores PIC foram introduzidos no mercado pela Microchip Technology Corporation no final da década de 1980. São microcontroladores que usam arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) e Harvard (MAZIDI; MCKINLAY; CAUSAY, 2008).

A primeira indica que o componente opera com poucas instruções básicas, as quais podem ser executadas em um único ciclo de *clock*, enquanto que a segunda diz respeito à quantidade de barramentos entre as memórias RAM e ROM e a CPU do componente. Na arquitetura Harvard, esses dois tipos de memória se conectam à unidade central de controle por barramentos independentes, não havendo o

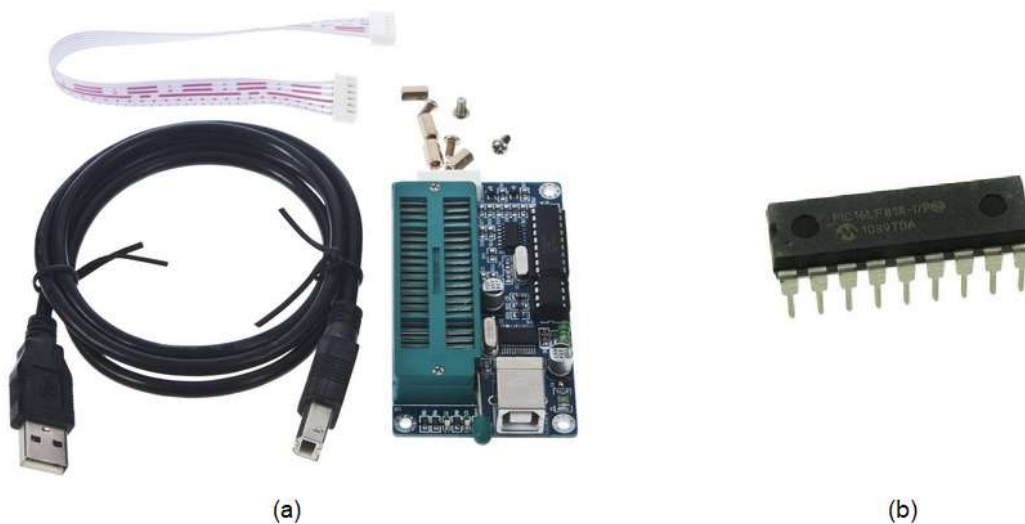
congestionamento de dados de tipos diferentes em um mesmo caminho, o que representa maiores velocidades de processamento efetivo (INSTITUTO NCB, 2018).

São várias as famílias dessa linha de microcontroladores, com diferentes características a fim de cobrirem uma ampla gama de necessidades, as quais diferem em bits de configuração, tensão e frequência de funcionamento, periféricos e instruções (MAZIDI; MCKINLAY; CAUSAY, 2008).

Para o emprego de um PIC, é necessário ter um computador e uma placa de programação dedicada, além de conhecimento na linguagem de programação escolhida, geralmente o C++. Assim, após a realização do programa, o PIC é conectado em um soquete específico da placa de programação e esta é conectada ao computador, para que o descarregamento do programa aconteça. Uma vez programado, o componente já pode ser integrado aos demais componentes da aplicação (INSTITUTO NCB, 2018).

A figura 22a mostra uma placa de programação e a 22b um PIC da família 16xxx.

Figura 22 — (a) Placa de programação de PIC e cabos de conexão (b) microcontrolador da família PIC16xxx.



Fonte: Adaptado de Filipe Flop, 2018.

2.10.1.2 Microcontroladores Arduino

Os microcontroladores Arduino são, na verdade, placas prontas baseadas em microcontroladores. A primeira placa foi introduzida em 2005 por David Cuartielles

e Massimo Banzi, que se basearam na ideia de oferecer uma placa microcontrolada de fácil uso e baixo custo. Assim como os microcontroladores PIC, usam arquitetura RISC e Harvard (EDGEFX, 2018).

Existem vários modelos à disposição dos projetistas, como o Arduino NANO, o Pro Mini, o Lilypad, o Pro micro, o UNO, o MEGA, entre outros, com diferentes configurações para atenderem a aplicações diversas. A tabela 1 traz um comparativo desses produtos em termos de modelo de microcontrolador, chip de interface USB (*Universal Serial Bus*) e quantidade de memória por tipo presentes em cada placa, enquanto que a tabela 2 compara-os de acordo com as suas quantidades de entradas e saídas, sejam elas digitais ou analógicas (SGN ROBÓTICA EDUCACIONAL, 2018).

Tabela 1 — Modelos de Arduino e suas configurações de microcontrolador, interface serial e memórias.

Placa	Microcontrolador	Chip de Interface USB	Memória Flash	Memória RAM	Memória EEPROM
Arduino UNO DIP	ATMEGA328P-PU	ATMEGA16U2	32kb	2kb	1kb
Arduino UNO SMD	ATMEGA328P-AU	CH340	32kb	2kb	1kb
Arduino NANO	ATMEGA328P-AU	CH340	32kb	2kb	1kb
NANO RobotDyn - ATMEGA328	ATMEGA328P-AU	CH340	32kb	2kb	1kb
NANO RobotDyn - ATMEGA168	ATMEGA168P-AU	CH340	32kb	1kb	0.5kb
Arduino Pro Mini	ATMEGA328P-AU	Não tem	32kb	2kb	1kb
Arduino Lilypad	ATMEGA328P-AU	Não tem	32kb	2kb	1kb
Arduino Pro Micro	ATMEGA32U4	O próprio microcontrolador	32kb	2.5kb	1kb
Arduino MEGA	ATMEGA2560	ATMEGA16U2 ou CH340	256k	8kb	4kb

Fonte: SGN Robótica Educacional, 2018.

Tabela 2 — Modelos de Arduino com suas quantidades de entradas e saídas por tipo.

Placa	Entradas e saídas digitais	Saídas PWM	Portas Analógicas
Arduino UNO DIP	14	6	6
Arduino UNO SMD	14	6	6
Arduino NANO	14	6	8
NANO RobotDyn - ATMEGA328	14	6	8
NANO RobotDyn - ATMEGA168	14	6	8
Arduino Pro Mini	14	6	6
Arduino Lilypad	14	6	6
Arduino Pro Micro	12	5	9
Arduino MEGA	54	15	16

Fonte: SGN Robótica Educacional, 2018.

Como características positivas dos Arduinos destacam-se a presença de uma porta de programação integrada à placa, sem a necessidade de um terminal dedicado para a transferência de *software* e a facilidade da sua integração com outros sistemas, dado que são comercializados como placas prontas, diferentemente, por exemplo, dos PIC's (EDGEFX, 2018).

Para a programação, o fabricante do produto disponibiliza, gratuitamente, um *software* compatível com os principais sistemas operacionais do mercado (Windows, Linux, Macintosh). Com interface bastante amigável, nesse programa há uma barra de ferramentas com botões para a criação e arquivamento de projetos, verificação e descarregamento do programa, telas para monitoramento da porta serial e exibição de mensagens de erro, editor de texto para a escrita do código, entre outras coisas (ARDUINO, 2018).

A figura 23 ilustra um Arduino MEGA justamente com um cabo de comunicação USB para a sua comunicação com um computador.

Figura 23 — Arduino MEGA e cabo de comunicação USB.



Fonte: Loja da Elétrica, 2018.

2.10.2 MOTORES ELÉTRICOS

Máquina elétricas são dispositivos capazes de realizar a conversão eletromecânica de energia. Através de um campo magnético de acoplamento, um sistema elétrico pode trocar energia com um sistema mecânico, e vice-versa, em um processo reversível, exceto no que tange à energia transformada em calor. Quando a máquina transforma energia mecânica em energia elétrica, ela é chamada de gerador. Quando transforma energia elétrica em mecânica, recebe o nome de motor (DEL TORO, 1999).

Motores elétricos são, portanto, máquinas que, a partir da energia elétrica, conseguem fornecer movimento a uma determinada parte de um sistema através da rotação de um eixo com uma dada velocidade e torque (PAZOS, 2002).

Segundo Gonzaga e Juliani (2008), os motores elétricos são divididos em dois grupos: os de corrente alternada e os de corrente contínua, sendo estes subdivididos em síncronos e assíncronos. Outros autores, como Del Toro (1999), Fitzgerald, Kingsley e Umans (1975) e Kosow (1982) não se propõem em classificá-los nesses dois grupos, optando, simplesmente, por explicar os tipos mais importantes de motores existentes.

A seguir, são descritos os tipos de motores aplicáveis ao projeto proposto.

2.10.2.1 Motores de Corrente Contínua

As máquinas de corrente contínua são muito adaptáveis a situações de velocidade variável. O ajuste de velocidade em amplas faixas e a partir de diferentes

métodos, permite que essas máquinas sejam empregadas em muitas aplicações modernas (FITZGERALD; KINGLEY; KUSKO, 1975).

Os motores de corrente contínua têm duas partes fundamentais: o estator e o rotor. O estator é uma parte fixa, com a função de produzir um campo magnético constante, a partir de um ou mais enrolamentos ou a partir de ímãs permanentes. O rotor, ou armadura, é uma parte móvel, fixada no eixo do motor, podendo, portanto, rotacionar. Ele tem um bobinado pelo qual circula corrente contínua (PAZOS, 2002).

O conjugado eletromagnético T e a tensão gerada E_g em uma máquina CC são calculados, respectivamente, a partir das equações (2) e (3) mostradas abaixo.

$$T = K_a \cdot \Phi \cdot I_a \quad [\text{N. m}] \quad (2)$$

$$E_g = K_a \cdot \Phi \cdot \omega_m \quad [\text{V}] \quad (3)$$

Os símbolos Φ , I_a e ω_m representam, respectivamente, o fluxo magnético por pólo, a corrente de armadura e a velocidade angular do motor. K_a é uma constante construtiva da máquina, a qual depende de P , Z e a , nessa ordem, o número de pólos do estator, o número de condutores do rotor (duas vezes o número de espiras do rotor) e o número de caminhos paralelos na armadura, conforme mostrado na equação (4) (FITZGERALD; KINGLEY; KUSKO, 1975).

$$K_a = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (4)$$

Além dessas equações, é importante conhecer a equação (5), a qual fornece a tensão terminal, obtida através da simples aplicação da Lei de Kirchhoff no circuito da armadura de uma máquina CC:

$$V_t = E_g \pm r_a \cdot I_a \quad [\text{V}] \quad (5)$$

Os símbolos V_t e r_a representam, respectivamente, a tensão terminal e a resistência de armadura da máquina, onde o sinal mais é usado para motor e o menos para gerador (FITZGERALD; KINGLEY; KUSKO, 1975).

Substituindo a equação (5) na equação (3), e isolando w_m , tem-se que a velocidade angular desenvolvida por um motor é:

$$w_m = \frac{V_t - r_a \cdot I_a}{K_a \cdot \Phi} \quad [\text{rad/s}] \quad (6)$$

A equação (6) pode ser chamada de equação fundamental da velocidade de um motor CC. Analisando-a, observa-se que um enfraquecimento do fluxo aumenta a velocidade da máquina. Além disso, se a tensão terminal é aumentada, com a corrente de armadura e o fluxo mantidos constantes, a velocidade também aumenta. Por fim, se a tensão terminal e o fluxo são mantidos constantes, um acréscimo de carga produz um acréscimo na corrente de armadura, provocando uma diminuição da velocidade na mesma proporção em que a tensão gerada diminui (KOSOW, 1982).

O estator de uma máquina CC pode ser construído a partir de ímãs permanentes ou de uma bobina. Para o segundo caso, a fonte de alimentação dessa bobina pode ser a mesma da armadura e a conexão dessas bobinas de maneiras diferentes resulta em diferentes características operacionais (PAZOS, 2002).

2.10.2.2 Motores de Passo

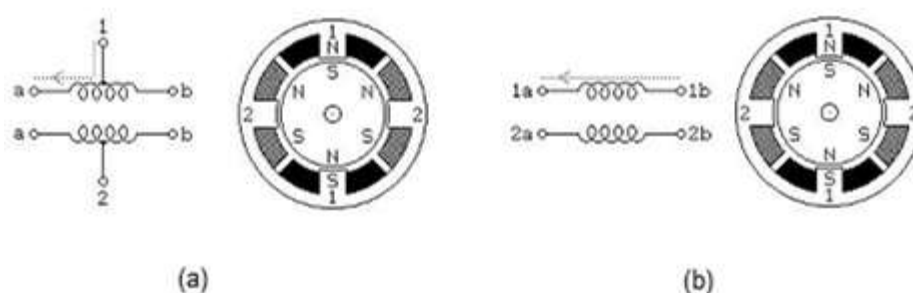
Motores de passo compõem um tipo específico de motor. A rotação do seu eixo se dá com incrementos angulares discretos a partir de um sinal pulsado de alimentação (PAZOS, 2002).

Segundo Del Toro (1994), motores de passo possuem estator com ranhuras, composto por bobinas independentes, e rotor sem enrolamentos. Há duas classificações principais para esse tipo de máquina, dependendo de como o seu rotor é construído. Se construído com ímãs permanentes, o motor é dito motor de passo de ímã permanente. Se construído sem eles, é chamado de motor de passo de relutância. No entanto, classificações adicionais são comuns, como chamar de unipolares aqueles que possuem um ponto de conexão elétrica no centro de cada uma das suas bobinas estatóricas (TAP central) e bipolares os que não possuem essa conexão.

As configurações mais comuns desse tipo de motor apresentam duas bobinas estatóricas, as quais compõem as fases, responsáveis pela criação dos campos magnéticos que interagem com o rotor da máquina. Em outras palavras, as

fases correspondem às próprias bobinas, no caso de motores bipolares, ou às metades de cada uma delas, considerando-se os motores unipolares. Com efeito, os motores unipolares geralmente têm quatro fases e seis fios de ligação, enquanto que os bipolares apenas duas e quatro fios, conforme ilustrado na figura 31a e 31b, respectivamente (LABORATÓRIO DE GARAGEM, 2018).

Figura 24 — Detalhes dos enrolamentos de (a) um motor unipolar e (b) bipolar.



Fonte: Brites; Santos, 2008.

De acordo com o modo com que as fases são energizadas, em que pesa a ordem de acionamento e o sentido da corrente, o eixo do motor gira. Há três modos principais para consegui-lo: passo completo com uma fase, passo completo com duas fases e meio passo.

No primeiro caso, apenas uma fase é acionada em cada ciclo. No segundo, são duas simultaneamente, o que rende mais torque em relação ao primeiro modo. No terceiro, faz-se uma mistura dos dois primeiros, o que rende menos torque em relação ao segundo, mas melhora a resolução angular do movimento do eixo da máquina (ROBOCORE, 2018).

Assumindo a ideia de que o número 1 representa um potencial positivo e o número 0 a referência, os quadros 2, 3 e 4 apresentam os modos de acionamento dos motores em análise, na mesma ordem em que foram anunciados anteriormente.

Quadro 2 — Sequência de acionamento para passo completo com uma fase por ciclo.

passo	1a	2a	1b	2b
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Fonte: autoria própria, 2018.

Quadro 3 — Sequência de acionamento para passo completo com duas fases por ciclo.

passo	1a	2a	1b	2b
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1

Fonte: autoria própria, 2018.

Quadro 4 — Sequência de acionamento para meio passo.

Passo	1a	2a	1b	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Fonte: autoria própria, 2018.

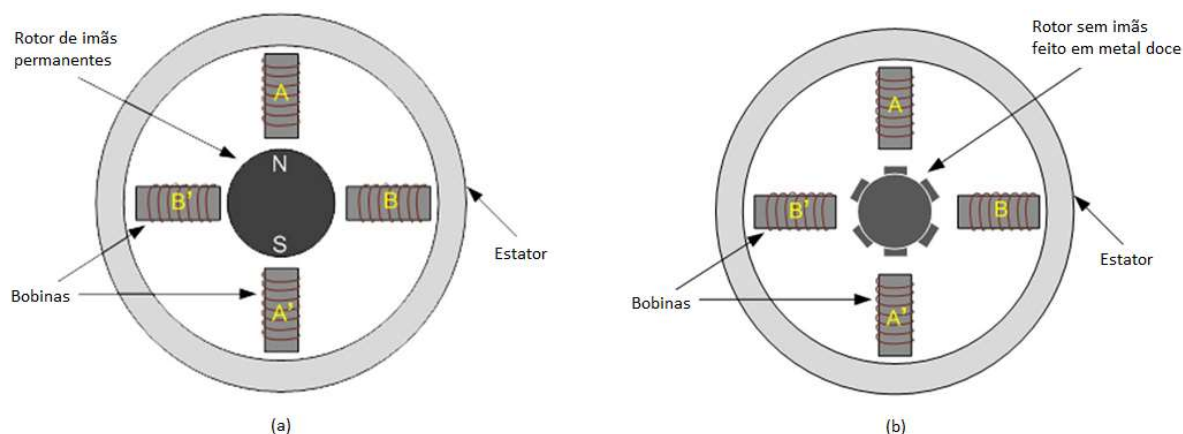
No caso de motores com ímãs permanentes, a rotação do motor é conseguida a partir do alinhamento dos pólos norte do rotor com os pólos sul do estator, e vice-versa. Ou seja, a máquina comporta-se como uma máquina síncrona, respeitando a sequência de polarização das bobinas do estator (DEL TORO, 1994).

Quando o motor é de relutância, a rotação do motor é conseguida a partir da resposta do rotor em função da diferença de relutância magnética existente entre o caminho de eixo direto e de eixo em quadratura quando da polarização em sequência das fases. Os campos produzidos pelo estator exercem forças no rotor, as quais atuam para minimizar a relutância do caminho. Assim, o rotor gira de maneira semelhante ao motor de ímãs permanentes (DEL TORO, 1994).

Quando o rotor de um motor de passo gira de uma posição estável para outra mais próxima, diz-se que girou um passo. O ângulo de passo fica determinado pelo número de pólos do estator e do rotor. Em máquinas convencionais, esse ângulo fica entre $1,8^\circ$ e 30° (PAZOS, 2002).

A figura 32a mostra o arranjo construtivo de um motor de passo de ímãs permanentes e a figura 32b de um motor de passo de relutância.

Figura 25 — (a) Motor de passo com ímãs permanentes e (b) motor de passo de relutância.



Fonte: Del Toro, 1994.

2.10.2.3 Servomotores

Servomotores são motores projetados para aplicações em que há necessidade de controle de posição e de velocidade. Não são considerados um tipo diferente de motor, dado que são variantes de motores de corrente contínua ou de corrente alternada, mas são tratados de maneira especial por terem um acionamento capaz de exercer controle de posição e velocidade baseado em sensoriamento do eixo do motor (PAZOS, 2002).

Em grande parte desse tipo de sistema, o controlador consiste em um comparador e um amplificador com integrador. Assim, a partir de um sinal de referência de posição ou velocidade, dependendo do tipo de servo, o comparador subtrai deste o sinal do sensor, que é a resposta do motor, produzindo o sinal de erro. O sinal de erro, por sua vez, é amplificado e o motor é alimentado com este. Por exemplo, se o servo for de posição, o motor irá parar quando o sinal de erro for zero, ou seja, quando o sinal do sensor de posição for igual ao da referência. Para erro maior ou menor que zero, o motor será alimentado com uma tensão positiva ou negativa, respectivamente, para que o eixo se movimente no sentido correto até que o sinal do sensor se iguale ao da referência (PAZOS, 2002).

2.10.3 ACIONAMENTOS PARA MOTORES ELÉTRICOS

Em eletrônica de controle, a potência dos sinais fica entre nanowatts e alguns poucos watts. Com efeito, o controle de atuadores diretamente não é possível,

sendo necessário o emprego de componentes amplificadores para fazê-lo (BOSE, 2006).

A seguir são descritos os principais acionamentos aplicáveis a motores de corrente contínua, motores de passo e servomotores.

2.10.3.1 Relés

São componentes elétricos de comutação. A partir de um sinal digital de comando, o componente chaveia um ou mais canais de saída (INSTITUTO NCB, 2018).

Há vários tipos de relés, classificados de acordo com o fim a que se destinam. Existem, por exemplo, os relés temporizados, cuja comutação é retardada a partir da sua energização ou do seu desligamento, os relés térmicos, os quais atuam em função da temperatura, os relés eletromecânicos convencionais, os relés de estado sólido, os quais não têm partes mecânicas, entre outros. Esses dois últimos tipos são os mais adequados para o acionamento de motores de corrente contínua (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018)

Em mais detalhes, os relés eletromecânicos convencionais possuem um eletroímã próximo a uma lâmina metálica móvel, a qual tem a função de abrir ou fechar um ou mais contatos, dependendo do modelo do componente em questão. Quando uma corrente circula pela bobina, um campo magnético atua sobre a lâmina metálica, chamada também de armadura, atraindo-a, o que promove a comutação dos contatos. Assim, a partir de um sinal de pequena potência aplicado à bobina, pode-se obter um outro de muito maior potência para a alimentação de um dado atuador, por exemplo. No entanto, esse tipo de relé tem uma vida útil dada em número de manobras, além de ter uma resposta lenta para muitas aplicações, o que limita o seu emprego em casos em que elevadas frequências de chaveamento são necessárias (INSTITUTO NCB, 2018).

Com relação aos relés de estado sólido, estes são mais elaborados por não terem partes mecânicas, sendo indicados para operações com frequência altas. Nesses componentes, há um acoplador ótico que quando acionado faz com que um transistor de potência conduza, alterando, então, o estado da saída do relé. São mais confiáveis e mais silenciosos do que os relés eletromecânicos (INSTITUTO NCB, 2018).

2.10.3.2 *Drivers* para Motores de Passo

Drivers ou acionamentos para motores de passo convertem sinais de comando em sinais de potência. Existem muitas opções disponíveis no mercado, os quais podem ser classificados de várias maneiras. Uma delas, é pela apresentação ou não da função de controle, dividindo-os em *drivers* simples e *drivers* inteligentes. Estes são componentes programáveis e, por isso, dispensam uma unidade de controle em separado, enquanto que aqueles somente apresentam a função de amplificação. Podem ser classificados, ainda, em unipolares ou bipolares, usados, respectivamente em motores unipolares e bipolares, embora seja possível o acionamento de motores unipolares a partir de acionamentos bipolares, tomando-se alguns cuidados (KALATEC, 2018).

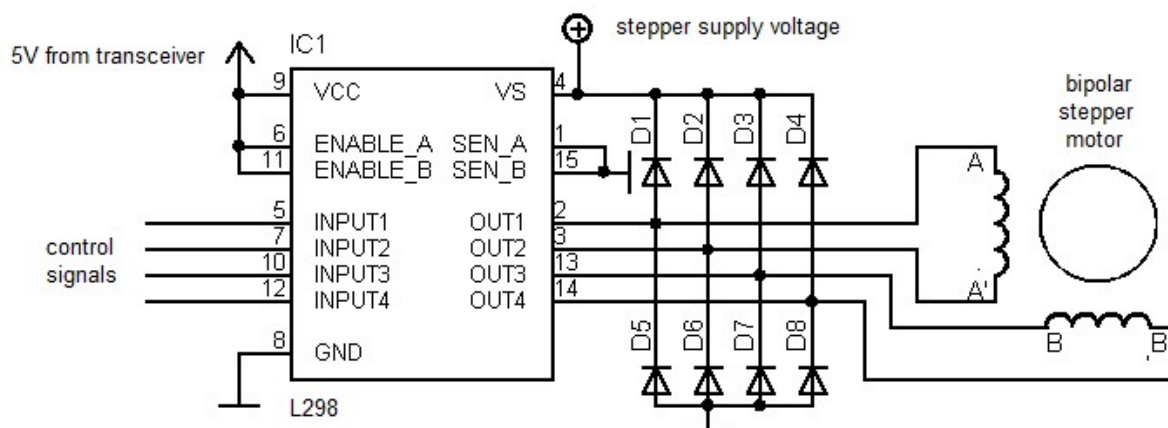
Dentre os muitos modelos desses componentes e considerando os objetivos deste trabalho, são citados a seguir dois tipos bastante conhecidos de *drivers* compatíveis com microcontroladores e de baixo custo: o baseado no L298 e o baseado no ULN2004A.

O L298 é um circuito integrado que contém duas pontes H, ou seja, dois pares de saídas capazes de inverterem suas polaridades. Assim, quando se conectam bobinas de motores a cada par delas, a corrente na bobina pode ter o seu sentido invertido, dado que quando uma saída está em nível lógico alto, a outra está na referência. Isso é muito interessante para o acionamento de motores CC e de passo, sejam estes últimos unipolares ou bipolares. No caso de serem unipolares, o TAP central não é conectado ao *driver*, o que implica que a tensão entre um par de saídas do semicondutor fica dividida entre duas fases do motor. Assim, para que a corrente nas bobinas seja igual à nominal, e com isso o torque do motor também o seja, faz-se necessário que a tensão de operação das saídas do *driver* seja o dobro da tensão de fase do motor escolhido. Com esse cuidado, motores unipolares podem ser acionados, normalmente, por esse semicondutor (FILIPE FLOP, 2018).

Com sinais de controle na ordem de μA , esse circuito integrado gera sinais de saídas com até 2 A, com tensões que podem variar de $6V_{CC}$ a $35 V_{CC}$. Apresenta, ainda, uma excelente dissipação térmica, podendo operar entre temperaturas de -20°C a 135°C (FILIPE FLOP, 2018).

A figura 33 ilustra um esquema de ligação de um motor bipolar com um L298.

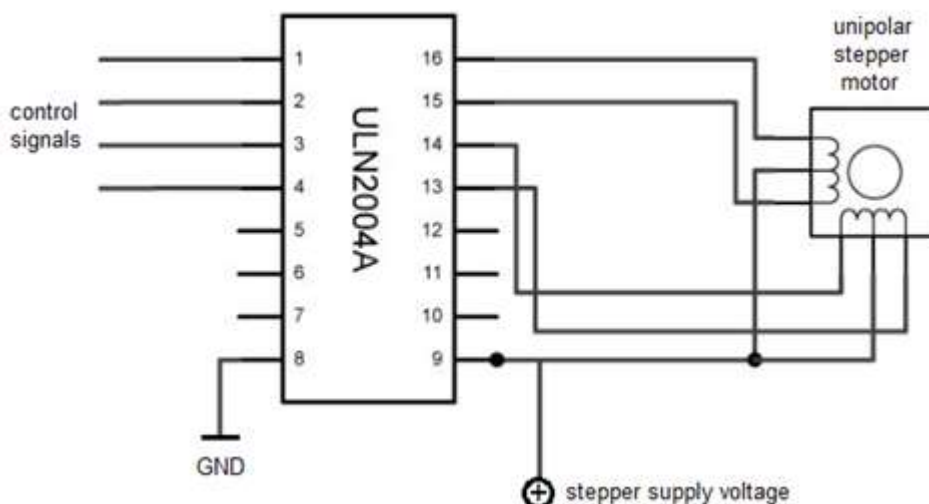
Figura 26 — Esquema de acionamento de um motor bipolar com um L298.



Fonte: Adaptado de Forum Arduino, 2018.

Com relação ao ULN2004A, é um circuito integrado que contém sete canais amplificadores compostos de transistores darlington NPN, os quais, individualmente, suportam uma corrente de até 500 mA. Sempre que um sinal positivo, tipicamente de 5 V_{CC}, é aplicado em uma de suas entradas, a saída correspondente é chaveada. Não é um componente tão versátil quanto o L298, uma vez que não pode inverter a polaridade de suas saídas, mas serve para o acionamento de motores CC que não necessitam de reversão e de motores de passo unipolares. No caso de ligação desses últimos, o TAP central é conectado ao pólo positivo da fonte de alimentação, enquanto que as extremidades das bobinas são ligadas aos canais do semicondutor, como mostrado na figura 34 (MASTER WALKER, 2018).

Figura 27 — Esquema de acionamento de um motor unipolar com um ULN2004A.



Fonte: Adaptado de Instructables, 2018.

2.10.3.3 Drivers para Servomotores

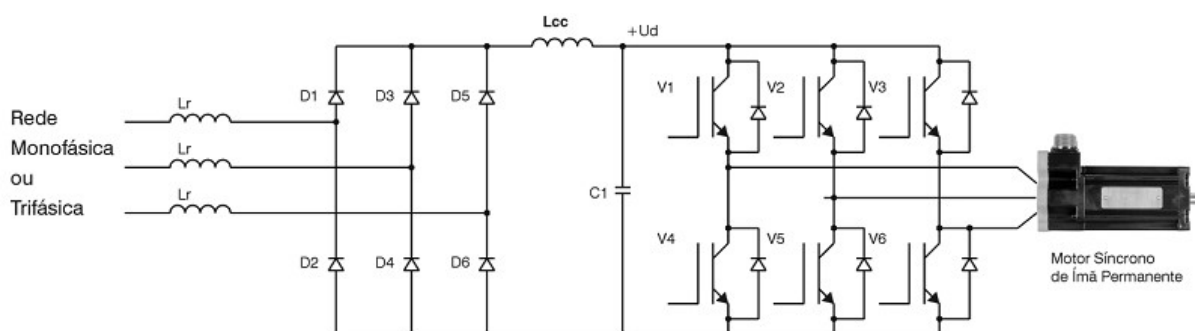
Drivers para servomotores, às vezes chamados de *servodrivers* ou servoconversores, são unidades de controle com uma parte eletrônica bastante avançada tecnologicamente capaz de receber a energia elétrica da rede fornecê-la de maneira controlada ao servomotor (OTTOBONI, 2002).

São sistemas que operam em malha fechada. Os motores são equipados com encoders ou resolvers, sensores úteis no monitoramento de posição e de velocidade. De acordo com a diferença entre um sinal de referência e o sinal proveniente desses sensores, seja em termos de posição ou de velocidade, o servodriver controla, com muita precisão a movimentação do motor (PAZOS, 2018).

Os tipos hoje disponíveis no mercado são diversos, em função do tipo do servomotor, da tecnologia eletrônica empregada e das funções adicionais desejadas. Há modelos que oferecem entradas e saídas digitais e analógicas, portas de comunicação para conexão com redes industriais, interfaces homem-máquina avançadas, entre outras coisas, além da sua função principal de controle de potência.

A figura 35 mostra um esquema genérico de um *servodriver* associado a um motor síncrono de ímã permanente. Tem-se uma ponte retificadora que converte a tensão alternada de entrada em tensão contínua, a qual é filtrada por capacitores. Adiante, a tensão contínua alimenta uma ponte inversora formada por transistores IGBT's e diodos em anti-paralelo. Baseado em um microcontrolador, o sistema de controle chaveia esses transistores de potência de modo a obter tensões de saída com amplitudes e frequência controladas, obedecendo ao princípio de Modulação por Largura de Pulsos (*PWM – Pulse Width Modulation*) (STEPHAN, 200-?).

Figura 28 — Esquema genérico de um servodriver associado a um motor síncrono de ímã permanente.



Fonte: Stephan, 200-?.

2.10.4 SENSORES

Segundo Sturm (2004) sensores são componentes que, dentro do seu limite de atuação, detectam variações de alguma grandeza e as transformam em alguma grandeza elétrica mensurável. O sinal de saída de um sensor pode ser conseguido a partir da alteração de uma dada característica elétrica, como por exemplo, resistência, capacitância ou indutância, sendo sempre um sinal de pequena potência, apenas para indicar um estado ou medição.

A seguir, são descritos os tipos de sensores potencialmente aplicáveis ao projeto proposto.

2.10.4.1 Sensores de Proximidade Indutivos

Um sensor de proximidade do tipo indutivo é composto de 4 partes básicas: a bobina sensora com núcleo de ferrite, o circuito oscilador, o circuito detector e o circuito de saída de estado sólido. O circuito oscilador gera um campo eletromagnético na frequência de rádio, o qual se irradia a partir da bobina e do núcleo de ferrite. Quando um objeto metálico se aproxima do sensor e entra no campo variante no tempo, correntes parasitas são induzidas no mesmo, as quais produzem um efeito de carregamento ou de amortecimento no circuito oscilador. Com efeito, o sinal presente no oscilador passa a ter uma amplitude menor, mudança que é percebida pelo circuito detector. Para uma determinada amplitude o detector aciona uma saída de estado sólido. Quando o objeto se afasta, a amplitude do sinal do oscilador aumenta para o seu valor original. Acima de uma dada referência, o detector desliga o sinal de saída. (SOLOMAN, 2012).

O alcance de um sensor indutivo é a distância entre a face do sensor e o objeto e depende da forma do campo magnético gerado pela bobina. Vários fatores afetam o alcance, tais como tamanho e blindagem do núcleo, material, tamanho e forma do objeto a ser detectado, temperatura ambiente, entre outros (SOLOMAN, 2012).

A geometria do campo de detecção é função das características construtivas do núcleo e da bobina. Uma bobina que não esteja acoplada a um núcleo produz um campo omnidirecional, o qual permite uma detecção a partir de um objeto vindo de qualquer direção. Com a inclusão de um núcleo de ferrite, a intensidade do

campo aumenta e sua geometria fica dirigida para além da face sensora (SOLOMAN, 2012).

O material e o tamanho do objeto a ser detectado também são importantes na análise do amortecimento do sensor. Objetos metálicos ferrosos têm correntes parasitas mais intensas do que objetos metálicos não ferrosos. Com relação ao tamanho do objeto a ser medido, um aumento do mesmo não significa aumento no alcance de detecção. Porém, quando o objeto é diminuído no tamanho, diminui-se o alcance de detecção ao mesmo tempo em que se retarda o tempo de resposta (SOLOMAN, 2012).

2.10.4.2 Sensores de Proximidade Capacitivos

Um sensor capacitivo tem o funcionamento parecido com o sensor indutivo. É composto de 4 partes básicas: a placa dielétrica, o circuito oscilador, o circuito detector e o circuito de saída de estado sólido. A detecção se baseia na variação da capacitância dielétrica (SOLOMAN, 2012).

A capacitância mede a capacidade de corpos armazenarem carga elétrica. Um capacitor é composto por um dielétrico, ou seja, de duas placas isoladas por um material não condutivo. A distância entre essas placas determina a capacidade desse componente armazenar carga.

No sensor capacitivo, a frequência do seu oscilador interno é determinada por um capacitor, construído com suas placas dispostas na sua face sensora. Quando um objeto é aproximado, a constante dielétrica na região adjacente às placas muda, alterando a frequência do oscilador. Com isso, o circuito detector provoca a comutação de uma saída de estado sólido (STURM, 2004).

Segundo Soloman (2012), os sensores capacitivos podem detectar alvos não metálicos, de pequeno porte e ainda apresentar respostas rápidas. Por outro lado, são afetados pela umidade e devem ter um amplo alcance para sensoriamento eficaz. Assim como o tamanho da bobina altera a detecção para sensores indutivos, o tamanho das placas tem a mesma implicação para o sensor capacitivo. Com isso, a maioria dos sensores capacitivos tem um ajuste de sensibilidade para se adequarem às condições do objeto a ser medido, bem como às do ambiente.

2.10.4.3 Sensores de Velocidade e Posição

Segundo Sturm (2004), há dois tipos bastante conhecidos de sensores de posição e velocidade: o encoder e o resolver. Esses sensores transformam velocidade angular ou posição linear em um sinal elétrico proporcional, sendo construídos de várias maneiras. Aqui, comenta-se as especificações mais comuns.

Um encoder é basicamente formado por um disco com várias fendas ou marcas e um sistema ótico capaz de transformar essas marcas em sinais elétricos de formato apropriado para um dado sistema de controle. Geralmente, esses pulsos são do tipo “zero” ou “um”, significando sinais digitais de nível lógico zero ou um (STURM, 2004).

Os encoders podem ser do tipo incremental ou absoluto. O encoder incremental transforma o giro do seu eixo em uma sequência de pulsos elétricos em sua saída. O número de pulsos por rotação depende da sua resolução. Por exemplo, um encoder com resolução de 500 pulsos por rotação fornece essa quantidade de pulsos em sua saída para uma volta completa. Assim sendo, ele é útil para a determinação de velocidade e de posição a partir de um dado referencial, pois a frequência de pulsos correlaciona-se com a velocidade angular do eixo, ao passo que o número deles se correlaciona com um dado deslocamento angular a partir de uma posição conhecida.

Para determinadas aplicações, faz-se necessário conhecer o sentido de rotação do eixo do encoder. Assim, há encoders com dois canais de saída, os quais fornecem sinais defasados de 90° um do outro, permitindo ao sistema de controle conhecer para que lado o encoder está girando. Por exemplo, se o canal 1 muda de nível lógico antes do 2, o sentido de giro é horário. Se ocorre o contrário, é anti-horário (STURM, 2004).

Com relação aos encoders absolutos, estes são capazes de não apenas fornecer uma sequência de pulsos, mas uma sequência de códigos, os quais indicam a posição do eixo sem a necessidade da contagem dos pulsos (STURM, 2004).

Esse tipo de encoder tem uma construção mais complexa: possui um disco com uma série de marcas para cada posição. Geralmente isso é feito com várias fileiras de fendas no disco, com um sensor ótico sobre cada uma delas, em uma construção tal que para cada posição, há somente um código correspondente. Com efeito, a sua resolução é definida pelo menor deslocamento angular que modifica o

código de saída. Quanto maior for a resolução almejada, maior será o número de bits do código, sendo as versões comerciais mais comuns as de 10 bits (PAZOS, 2002).

2.10.4.4 Sensores de Luminosidade

Como o próprio nome sugere, são sensores capazes de detectar variações na intensidade luminosa presente no seu entorno. Podem ser digitais ou analógicos. Os digitais têm o nível lógico do seu sinal de saída alterado para um valor específico de luminosidade, o qual geralmente pode ser ajustado manualmente no próprio sensor. Já os analógicos, transformam a intensidade luminosa em um sinal elétrico proporcional (PORTAL VIDA DE SILÍCIO, 2018).

Um componente que pode ser utilizado na construção desse tipo de sensor é o LDR (*Light Dependent Resistor*), que varia a sua resistência a partir de variações na incidência de luz sobre a sua parte exposta. É uma peça feita de sulfeto de cádmio (CdS), um material semicondutor. Quando a incidência de luz é alta, muitos elétrons da camada de valência do material são deslocados para a sua camada de condução, diminuindo a resistência do componente. Assim, embora a sua velocidade de resposta seja baixa e a sua variação não seja linear, ele pode ser empregado em aplicações com baixas frequência de operação tais como iluminação pública, alarmes etc (STURM, 2004).

2.10.5 ELEMENTOS DE MECÂNICA

A seguir, são descritos alguns dos principais elementos mecânicos empregados em máquinas e equipamentos, aplicáveis ao projeto proposto.

2.10.5.1 Tubos e Perfis Estruturais

Os tubos são elementos estruturais presentes em construções diversas tais como máquinas, equipamentos industriais, edificações entre outras. Geralmente são feitos em aço, com seção reta quadrada, retangular ou redonda, a ser escolhida de acordo com a aplicação, garantindo alta capacidade de suportar esforços mecânicos como os de compressão, tração e torção. Podem ser usinados com o uso de máquinas específicas, as quais podem realizar processos de serramento, aplainamento,

fresamento, furação entre outros. Além disso, peças feitas de tubos podem ser unidas por processo de soldagem (DECAFER, 2018).

Com relação aos perfis estruturais, estes também são elementos estruturais, comumente divididos em perfis de aço e de alumínio.

Os de aço são empregados em construções mais robustas, destacando-se os de seções transversais parecidas às letras I, H, L, T, U e Z, que, justamente por isso, são nomeados de maneira análoga a essas letras (METALICA, 2018).

Já os perfis de alumínio são indicados para aplicações mais leves, onde a corrosão é um problema importante e a montagem da estrutura deva simplificada. Existem vários tipos de conectores padronizados para a linha em alumínio, o que evita a necessidade de soldagem. Além disso, o material dispensa pintura e a usinagem das peças é facilitada quando comparada à realizada em peças de aço. Há vários tipos de perfis de alumínio disponíveis, sendo os de seção reta no formato quadrado e retangular os mais usados em funções de sustentação, os quais permitem a construção de diferentes tipos de estrutura com grande versatilidade (FORSETI, 2018).

2.10.5.2 Eixos

Segundo Norton (2013), eixos de transmissão são peças que transmitem rotação e torque de uma parte para outra. Comumente, são suportados por mancais, em configuração com dois apoios, e associam-se a engrenagens, polias e catracas para se acoplarem a uma outra peça.

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), os eixos podem ser fixos também, úteis apenas como apoios para outras peças rotativas. Com relação ao material, são, na maioria dos casos, usinados em aço, devido à resistência mecânica desse material. A geometria é, geralmente, cilíndrica, com rebaixos, chanfros e rasgos de chavetas nos pontos de contato com outras partes.

2.10.5.3 Mancais

Segundo Norton (2013), mancais são elementos que possuem partes que têm movimento relativo, sem importar formato ou configuração. Por isso, são peças

que demandam lubrificação. Podem ser de dois tipos: mancais planos e mancais rolantes.

Os mancais planos são constituídos de materiais que se esfregam entre si, sendo comuns configurações em que uma parte é feita de aço e a outra de bronze ou de um polímero não metálico. Esse tipo de mancal pode ser bipartido, para acoplar-se a um eixo, ou uma casca cilíndrica, chamada de bucha, e é empregado em aplicações mais específicas. Já os mancais de rolamento são aqueles que possuem esferas ou rolos acomodados entre pistas. Todas essas peças são feitas de aço endurecido, oferecendo baixo atrito e resistência a cargas radiais, axiais ou combinadas, dependendo da especificação da peça. É um tipo de componente padronizado, muito usado em diversas aplicações industriais, sendo escolhido por meio de catálogos técnicos (NORTON, 2013).

2.10.5.4 Engrenagens, Polias e Correias de Transmissão

Engrenagens são rodas dentadas que transmitem movimento e torque entre dois eixos. São componentes padronizados e que oferecem alto rendimento no processo de transmissão de potência. Quando as peças acopladas têm tamanhos diferentes, varia-se a velocidade e o torque de um eixo para outro. Os materiais em que são fabricadas são: aço-liga-fundido, ferro fundido, cromo níquel, alumínio, bronze fósforo e náilon (FRANCESCHI; ANTONELLO, 2014).

Já as polias são peças usadas para transmitir movimento estando acopladas a correias. Esse conjunto, geralmente, substitui as engrenagens, simplificando e barateando o projeto, sendo recomendado quando a distância entre os eixos motor e movido são grandes. Além disso, como as correias são elementos flexíveis, elas absorvem impactos, diminuindo a vibração da máquina. Existem quatro tipos principais de correias, os quais se combinam com polias correspondentes: as planas, as redondas, as com perfil em V e as dentadas. Os três primeiros tipos podem apresentar um pequeno escorregamento em relação às superfícies de contato das polias. Já o último, não, o que o torna ideal para casos em que o sincronismo é fundamental (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

3.1 DIRETRIZ PARA A CONSTRUÇÃO DO SISTEMA

O objetivo deste projeto foi construir um protótipo de seguidor solar, o que confere algumas particularidades ao mesmo. Isso significa validar a possibilidade de uma placa solar seguir a movimentação do Sol de acordo com os objetivos traçados, a partir de um sistema simplificado.

Segundo a Endeavor Brasil (2018), a construção de um protótipo destina-se à criação de um modelo que pode ser mais facilmente manipulado e testado, com a pretensão de avaliar um dado projeto de maneira mais rápida, barata e eficiente.

Ademais, no que concerne à realidade acadêmica, a prototipagem é útil para o desenvolvimento de conhecimento de cunho prático, tão caro às profissões da área técnica.

Nesse contexto, embora um esforço tenha sido feito para modelar um sistema real em escala reduzida, alguns componentes usados na solução não seriam empregados em um produto a ser comercializado. Por questões de custo, algumas peças empregadas neste trabalho não apresentam o desempenho esperado para uma aplicação comercial. No entanto, conforme será detalhado adiante, os resultados obtidos não contundentes com uma aplicação real foram correlacionados aos componentes alternativos empregados, garantindo a validade das ideias desenvolvidas no trabalho.

Nos tópicos seguintes deste Capítulo explica-se, de modo objetivo, como cada parte integrante da solução foi obtida, comentando-se sobre os requisitos impostos a cada uma e, também, como todas elas foram integradas em um único sistema.

3.2 DESCRIÇÃO DAS PARTES

A proposta solução pode ser melhor explicada quando dividida em três partes: a mecânica, a eletroeletrônica e a parte referente ao código de controle. Seguindo o previsto na metodologia adotada, em primeiro lugar objetivou-se a estruturação mecânica do seguidor, para que a partir dela, fosse possível definir características necessárias às demais partes.

3.2.1 A PARTE MECÂNICA

3.2.1.1 A Estrutura de Sustentação

A construção da estrutura mecânica do seguidor começou com a etapa de definir o material de que seria feita. Os seguidores comerciais estudados durante a fase de pesquisa, mostraram que, geralmente, as estruturas mecânicas são feitas, predominantemente, de metais, tais como peças de aço e de alumínio. As peças que sofrem maior esforço, como eixos e engrenagens, são feitas de materiais mais resistentes e densos, como os aços de liga. As peças com pouca carga, são feitas tanto de perfis finos de aço quanto de peças de alumínio. No caso de serem de aço, as peças quase sempre têm algum tipo de proteção contra corrosão, a qual é dispensada nas peças de alumínio.

Levando-se esse comparativo em conta, decidiu-se construir a estrutura mecânica do seguidor com perfis de alumínio. As empresas que os comercializam consultadas ofereceram a possibilidade de fornecimento das peças necessárias ao projeto já cortadas e furadas, além de uma grande gama de conectores e elementos de fixação para a junção das partes. Isso facilitou muito essa atividade e o resultado obtido pode ser visto na figura 36.

Figura 29 — Estrutura de sustentação do seguidor.



Fonte: autoria própria, 2018.

Em nenhum momento foi necessário o modelamento das peças com o auxílio de software CAD (*Computer-Aided Design*), dada a simplicidade da construção. Isso agilizou a conclusão desta etapa do trabalho.

3.2.1.2 O Eixo de Rotação da Placa Solar e Acessórios

Para sustentar a placa solar permitindo que a mesma rotacionasse para manter-se perpendicular em relação aos raios do Sol, um eixo foi usinado em aço. Antes da fabricação da peça, pensou-se em um eixo que pudesse apoiar-se em mancais, acoplar-se a uma polia para rotacionar e, ainda, pudesse sustentar a placa fotovoltaica escolhida.

Com esses requisitos elencados, teve-se a ideia de usar como matéria prima para a fabricação dessa peça uma barra roscada de diâmetro de 5/8". Isso, porque seria um objeto de fácil obtenção, a ser adquirida em uma loja de ferragens comum, com boa resistência mecânica e que, ainda, permitiria a dar forma a um eixo que poderia receber, ao longo do seu comprimento, porcas e contraporcas, para a fixação futura da placa solar.

De fato, uma barra como a citada foi comprada e a sua usinagem em uma empresa especializada foi feita, rebaixando somente as pontas da peça com vistas ao encaixe dos mancais e da polia. Porcas e contraporcas foram incluídas na peça, para que, na sequência das atividades, fosse fixada a placa solar.

Com relação aos acessórios, estes se referem ao par de mancais e à polia escolhida, sendo esta para o futuro acoplamento como o motor elétrico.

Focando na aquisição de peças baratas, optou-se por adquirir mancais de rolamento fabricados para o uso em aplicações de baixa velocidade e baixos esforços mecânicos, coerentemente com a aplicação pretendida. São componentes geralmente comercializados para a construção de robôs educacionais, com qualidade aquém dos modelos padronizados para o uso industrial, mas muito mais baratos do que os mesmos.

Quanto à polia, foi escolhida uma do tipo dentada feita em material plástico, com o mesmo passo da polia presente no motor, o qual será detalhado mais adiante no texto. Também foi adquirida uma correia dentada compatível.

O resultado dessa etapa é mostrado na figura 37.

Figura 30 — Eixo de rotação da placa solar e acessórios.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.2 A PARTE ELETROELETRÔNICA

3.2.2.1 A Placa Solar

A placa solar escolhida foi obtida junto a um depósito de sucata eletrônica. É uma placa de dimensões reduzidas (28 x 28 cm) que contém duas células de m-Si, as quais rendem uma potência de, aproximadamente, 5 Wp e uma tensão máxima de circuito aberto em torno de 22 V_{cc}.

O fato de ser uma placa pequena foi fundamental para a sua escolha, pois para uma placa grande e mais potente, além de custar mais caro, seriam necessárias partes mecânicas e elétricas mais robustas. Além disso, dado o objetivo do trabalho, não era impositivo que o sistema produzisse ganho real de energia, caso essa potência se mostrasse insuficiente para a alimentação das cargas do seguidor.

Quando adquirido, esse módulo solar apresentava um suporte de fibra de vidro, o qual foi modificado de acordo com as pretensões deste trabalho, com o resultado dessa atividade sendo mostrado na figura 38.

Figura 31 — Placa solar com suporte modificado para acoplar-se ao eixo do seguidor.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.2.2 O Atuador e o seu Acionamento

Na aplicação em referência, os requisitos para a motorização eram baixa velocidade e baixo torque. Isso posto, as duas opções mais baratas à disposição seriam motoredutores CC ou motores de passo. Estes últimos teriam a vantagem de uma movimentação mais precisa, além de uma maior facilidade no controle de velocidade.

Nesse contexto, foi escolhido um motor de passo híbrido (mistura de motor com ímãs permanentes e motor de relutância) da marca Minebea, modelo 17PM-H005-P2VA, com ligação do tipo unipolar (6 fios). Ele apresenta tensão de 3,75 V_{CC} e corrente de 0,75 A por fase, com torque máximo de 0,1 N.m e potência de 2,8 W por fase, sendo estes valores aproximados.

Para o acionamento do motor, poderiam ser empregados *drivers* unipolares operando com tensões de saída de 3,75 V_{CC} ou *drivers* bipolares com tensões de saída de 7,5 V_{CC}, lembrando que nesse segundo caso os TAP's centrais das bobinas não seriam usados, ficando a tensão entre cada par de saídas do *driver* dividida entre duas fases, conforme detalhado anteriormente.

Considerando a facilidade na obtenção, o preço acessível e as características do motor, optou-se pelo emprego de um *driver* baseado no circuito integrado L298. Em mais detalhes, consiste em uma placa pronta, já com os bornes de ligação, dissipador térmico, entre outros, o que facilita a integração dessa parte com o resto do sistema. O conjunto composto pelo motor e acionamento é ilustrado na figura 39.

Figura 32 — Atuador e acionamento.



Fonte: autoria própria, 2018.

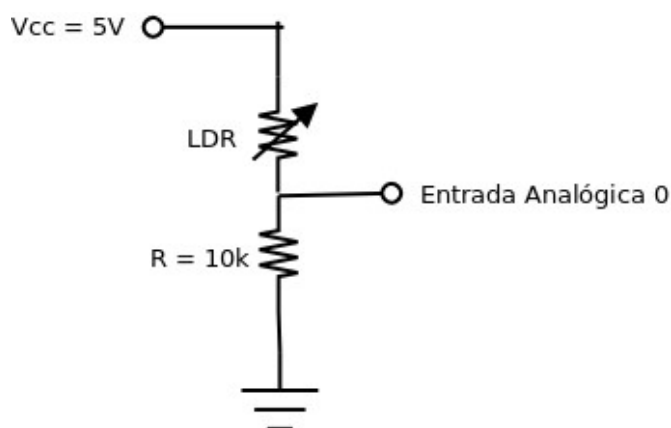
3.2.2.3 Os Sensores de Luminosidade

O plano para o rastreamento do Sol baseou-se na ideia de empregar um par de sensores de luminosidade analógicos cujas saídas fossem conectadas a um par de entradas do microcontrolador. Isso, porque se os sensores fossem dispostos de maneira que um deles recebesse mais luz do que o outro quando do movimento do Sol, a diferença de amplitude dos seus sinais permitiria ao controlador conhecer a necessidade de corrigir a posição da placa fotovoltaica.

Além disso, de acordo com as pesquisas realizadas sobre esse assunto, já era conhecido que esses sensores poderiam ser baseados em LDR's.

Em mais detalhes, um divisor de tensão composto pela série de um resistor e de um LDR poderia ser usado para o fornecimento de um sinal analógico de tensão ao controlador, conforme sugere a figura 40.

Figura 33 — Circuito divisor de tensão composto pela série de um resistor e com um LDR.



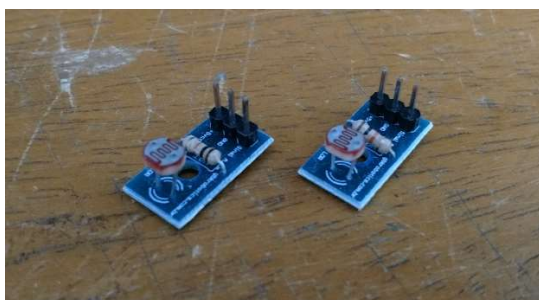
Fonte: IF, 2018.

Assim, a parte eletrônica desses sensores poderia tanto ser fabricada, corroendo-se uma pequena placa de circuito impresso e soldando nela os componentes necessários, quanto comprada pronta, já que existem várias opções do tipo disponíveis em lojas de componentes eletrônicos. Com a popularização das placas baseadas em microcontroladores, uma quantidade muito grande de sensores compatíveis com as mesmas foi introduzida no mercado, incluído sensores de luminosidade, o que permite aos interessados a construção de sistemas de maneira modular.

Com essas informações, decidiu-se pela compra dessas placas prontas, as quais já vieram equipadas com os pinos para a conexão com os cabos, como mostra a figura 41.

Em seguida, foi necessário definir como seriam as carenagens para essas partes, tanto para protegê-las de choques mecânicos, como para promover uma diferença de luminosidade entre elas a partir da movimentação do Sol.

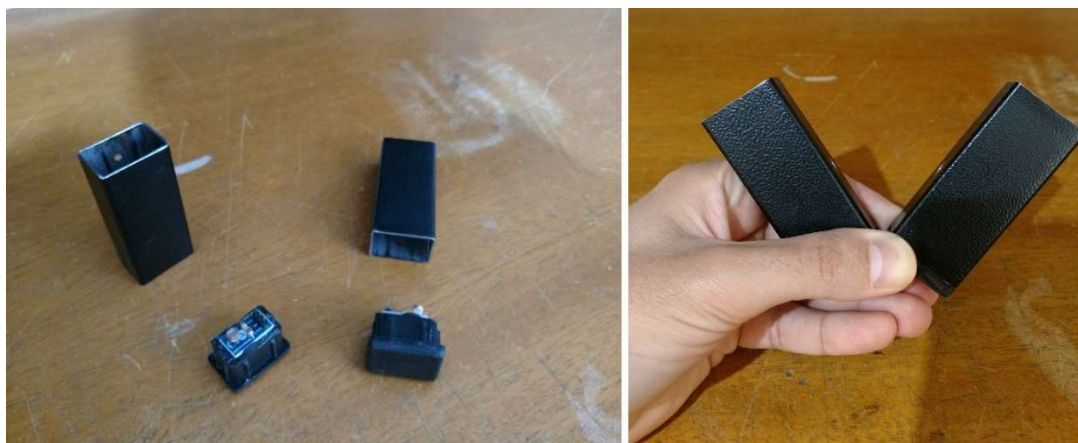
Figura 34 — Sensores de luminosidade analógicos baseados em LDR's.



Fonte: autoria própria, 2018.

Decidiu-se, então, fixá-las no fundo de pequenos tubos quadrados de ferro, de aproximadamente 7 cm de comprimento cada, os quais seriam presos em uma das faces laterais da placa solar, formando um ângulo de 60° entre eles. Tomou-se um cuidado adicional para permitir a que os sensores propriamente ditos pudessem ser separados das respectivas carenagens, para que a instalação elétrica futura ficasse facilitada. O resultado dessa etapa é mostrado na figura 42.

Figura 35 — (a) Detalhes das carenagens dos sensores de luminosidade e (b) as suas posições pretendidas.



(a)

(b)

Fonte: autoria própria, 2018.

Percebe-se que, no arranjo escolhido, manteve-se a convicção de que quanto mais alinhada estivesse a direção da radiação solar com a bissetriz do ângulo entre os tubos, menor seria a diferença entre os sinais de saídas dos sensores. Quanto menos alinhada, maior seria essa diferença.

3.2.2.4 O Sensor Limitador de Curso

Uma vez que a placa solar se movimenta quando equipada com um seguidor solar, foi necessário definir, também, um sensor limitador de curso. Este, deveria informar ao controlador sobre as duas posições finais de curso da parte móvel do equipamento, ou seja, as posições limites para rotação em sentido horário e anti-horário.

Através de recursos de *software*, já era sabido que bastaria apenas um sensor para cumprir essa tarefa, uma vez que, via código de controle, era possível conhecer o sentido de rotação da placa, interrompendo a rotação da mesma ora para um sentido, ora para outro, a partir da variação do nível lógico de apenas uma entrada.

Dessa maneira, foi especificado um sensor indutivo da marca Omron, modelo E2A-M12KS04-WP-C1, visto na figura 43, com saída digital do tipo NPN e tensão de operação entre 12 e 24 V_{CC}. Além disso, duas cames metálicas foram feitas, almejando-se um curso de 90° para placa, ou também, de $\pm 45^\circ$ a partir da horizontal.

Figura 36 — Sensor limitador de curso.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.2.5 A Unidade de Controle

As principais opções disponíveis para a implementação de um controle para o sistema proposto eram as placas baseadas nos microcontroladores PIC's ou as placas da linha Arduino, equipadas com os microcontroladores Atmel AVR.

A fabricação de uma placa demandaria a realização de um projeto eletrônico, a corrosão de um circuito impresso, bem como a compra de vários componentes em separado. Com isso, o custo dessa escolha seria maior do que o de adquirir um sistema acabado.

Nesse contexto, o caminho mais eficiente seria, de fato, comprar uma placa pronta, ficando necessário somente o desenvolvimento de um programa de controle, onde a linha Arduino seria a opção mais barata.

Os pré-requisitos para o controlador eram: possuir quatro saídas digitais, duas entradas analógicas e uma digital, reservadas respectivamente para o driver do motor de passo, para os sensores de luminosidade e para o sensor limitador de curso. Completando essas características e tendo ampla oferta nas lojas especializadas, foi comprado um Arduino UNO SMD, visto na figura 44, o qual conta com um microcontrolador ATMEGA328P-AU.

Figura 37 — Controlador Arduino UNO.



Fonte: autoria própria, 2018.

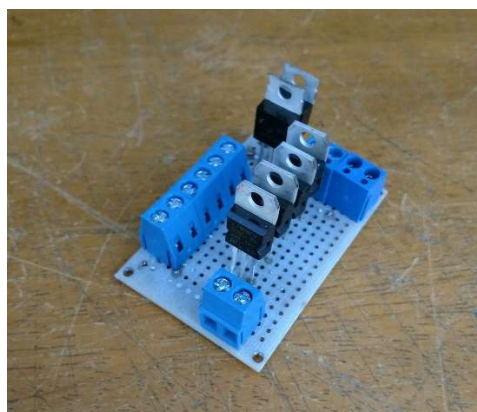
3.2.2.6 A Placa Reguladora de Tensões

A fim de compatibilizar os níveis de tensão necessários à cada parte eletrônica do sistema, uma placa reguladora de tensões foi fabricada.

Era fato que a tensão da placa solar apresentava tensão máxima de 22 V_{CC} com circuito aberto, o que sugeria que, mesmo com carga, a sua tensão poderia ficar acima dos 12 V_{CC} recomendados para a alimentação da unidade de controle e dos 7,5 V_{CC} necessários para o acionamento do motor de passo.

Assim, alguns reguladores de tensão da família 78xx foram montados sobre uma pequena placa universal, para a adequação dos níveis de tensão necessários à cada porção do sistema, com o resultado dessa atividade sendo exibido na figura 45.

Figura 38 — Placa reguladora de tensões.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.2.7 Acessórios

Alguns acessórios também foram comprados pensando na futura junção das diversas partes do sistema.

Entre eles, merecem citação uma caixa plástica para proteger as partes eletrônicas (caixa de ligação), prensa cabos e abraçadeiras plásticas para a fixação de cabos elétricos, ilustrados abaixo na figura 46.

Figura 39 — Caixa de ligação e elementos de fixação.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.3 A INTEGRAÇÃO DAS PARTES

Com a criação de todas as partes mecânicas e eletroeletrônicas, integrou-se todas elas em um único sistema.

Em primeiro lugar, a placa solar com os sensores de luminosidade foi fixada no eixo, através de porcas e contraporcas. Na sequência, os mancais do eixo foram presos à estrutura de alumínio, quando se percebeu a necessidade de balancear esse conjunto, dado que a placa solar gerava um momento no eixo. Esse fato indesejado poderia tornar o torque necessário para o motor sustentar certas posições muito elevado e, até mesmo, comprometer a movimentação almejada.

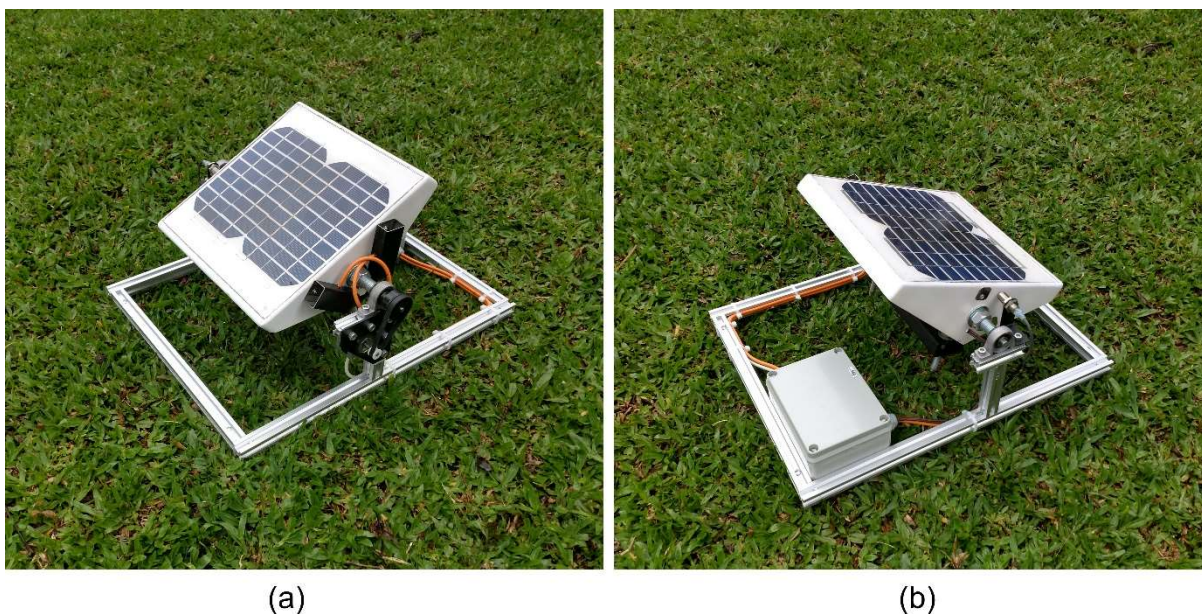
Como medida de contorno, um contrapeso regulável foi incluído no eixo, assegurando, para qualquer ângulo de inclinação do sistema, a necessidade de aplicação de um mesmo torque motor para a sua movimentação.

Em seguida, a caixa de ligação contendo a unidade de controle, o acionamento do motor e a placa reguladora de tensões foi presa à estrutura, bem como os sensores de luminosidade e o sensor limitador de curso.

Concluiu-se a junção de todas as partes com a realização das ligações elétricas correlatas, seguindo-se o esquema geral que é mostrado no Apêndice A.

Uma visão geral do protótipo é mostrada na figura 47 a seguir.

Figura 40 — Visão geral do protótipo (a) tomando os sensores de luminosidade e o motor e (b) tomando a caixa de ligação e o sensor limitador de curso.



Fonte: autoria própria, 2018.

3.2.4 O CÓDIGO DE CONTROLE

A programação de um Arduino pode ser dividida em duas partes principais: a inicialização e o código de controle. Os dados de inicialização são colocados na função *setup* (exceto variáveis globais, uma vez que boas práticas de programação sugerem que sejam colocadas fora dela), enquanto que o código de controle, na função *loop*.

O *setup* é executado uma única vez após a energização do microcontrolador, servindo para definir configurações iniciais, como por exemplo, definição de função para uma dada porta da placa (entrada ou saída), declarações e atribuições de variáveis, entre outras.

Já o *loop* é executado repetidamente durante a operação do sistema, contendo a lógica de operação para o controle do processo.

Nesse contexto, as sucessivas ideias usadas no desenvolvimento dessa etapa do trabalho demandaram o aperfeiçoamento contínuo do código escrito dentro de cada uma dessas partes citadas, até a obtenção dos resultados desejados.

A seguir, são comentados os principais tópicos do programa, bem como são apresentados os códigos correlatos à implementação de cada um deles. Convém destacar que as imagens exibidas a seguir contêm informações pinçadas do programa, somente com a função de auxiliar o entendimento do mesmo, e, por isso, não trazem informações na mesma ordem em que são exibidas no programa.

Considerando que a movimentação do seguidor foi baseada em sensores de luminosidade, uma rotina foi criada para coletar o valor presente na saída de cada um deles. Para minimizar os erros sistemáticos, uma vez que os valores informados por esses sensores oscilavam um pouco mesmo sem alterações de luminosidade no ambiente, quando testes em bancada foram feitos, foi definido que esta atividade deveria contemplar, para cada sensor, a obtenção de uma média de 20 valores a serem coletados no intervalo de tempo de 1 s. Tais parâmetros foram obtidos experimentalmente em bancada. A figura 48 mostra a definição das variáveis usadas, bem como a lógica empregada nessa parte.

Em seguida, várias declarações de variáveis foram feitas, acompanhadas de suas atribuições.

Figura 41 — Código para obtenção dos valores médios de saída dos sensores de luminosidade.



```

tcc_V2 | Arduino 1.8.7
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

tcc_V2 $
void loop() {
  const int INTERVALO_MEDIAS = 1000;
  /* intervalo de tempo no qual o número de amostras deve ser coletado,
  definindo também o tempo entre cada passo do motor */
  const int NUM_LEITURAS = 20;
  // número de amostras para a obtenção da média dos valores dos LDR's
  const int VALOR_LDRO = A0;          // define o pino A0 para LDRO
  const int VALOR_LDRI = A1;          // define o pino A1 para LDRI
  float mediaLDRO = 0;                // média do LDRO
  float mediaLDRI = 0;                // média do LDRI
  float totalLDRO = 0;                // total móvel para LDRO
  float totalLDRI = 0;                // total móvel para LDRI
  int leituraLDRO[NUM_LEITURAS];     // vetor quantidade de amostras p/ LDRO
  int leituraLDRI[NUM_LEITURAS];     // vetor quantidade de amostras p/ LDRI

  /* Contador usado para o índice da leituras dos LDR's */
  for (int i = 0; i < NUM_LEITURAS; i++) {
    leituraLDRO[i] = analogRead(VALOR_LDRO); // lê o valor do LDRO
    totalLDRO += leituraLDRO[i];            // adiciona leitura ao total
    leituraLDRI[i] = analogRead(VALOR_LDRI); // lê o valor do LDRI
    totalLDRI += leituraLDRI[i];           // adiciona leitura ao total
    delay(INTERVALO_MEDIAS/NUM_LEITURAS);
  }

  mediaLDRO = (totalLDRO / NUM_LEITURAS); // calc a média leituras LDRO
  mediaLDRI = (totalLDRI / NUM_LEITURAS); // calc a média leituras LDRI

```

Fonte: autoria própria, 2018.

Para algumas variáveis do tipo constante foram definidos, na sequência, os tipos de portas associadas a cada uma (entradas ou saídas), de acordo com o projeto eletroeletrônico do sistema. Por exemplo, na figura 49, pode-se observar que o sensor S0 (limitador de curso) foi conectado ao pino 7 do Arduino, o qual foi marcado como entrada, ao passo que as variáveis 1A, 1B, 2A e 2B foram ligadas aos pinos 8, 9, 10 e 11, respectivamente, selecionados para operar como saídas.

Figura 42 — Algumas declarações e atribuições de variáveis, seguidas da definição dos tipos de portas associadas a cada uma delas.

```

const int sensorS0 = 7;      // def. pino 7 p/ sensor indutivo S0
const int _1A = 8;          // def. pino 8 p/ terminal 1A do acion. motor
const int _1B = 9;          // def. pino 9 p/ terminal 1B do acion. motor
const int _2A = 10;         // def. pino 10 p/ terminal 2A do acion. motor
const int _2B = 11;         // def. pino 11 p/ terminal 2B do acion. motor

void setup() {
  pinMode(sensorS0, INPUT_PULLUP); // def. pino do sensorS0 como entrada
  pinMode(_1A, OUTPUT);             // def. pino terminal 1A como saída
  pinMode(_1B, OUTPUT);             // def. pino terminal 1B como saída
  pinMode(_2A, OUTPUT);             // def. pino terminal 2A como saída
  pinMode(_2B, OUTPUT);             // def. pino terminal 2B como saída
}

```

Fonte: autoria própria, 2018.

A partir desse estágio, as condicionais para movimentação da placa solar puderam ser construídas.

Em primeiro lugar, pensou-se na movimentação de Leste para Oeste. A partir de testes prévios feitos com os sensores de luminosidade acoplados ao Arduino, já se sabia que os diferentes níveis de iluminação do ambiente eram convertidos para valores inteiros de 0 a 1023. Em outras palavras, na escuridão total, tinha-se leituras iguais ou muito próximas de 0, enquanto que para abundância de luz, valores iguais ou próximos a 1023. Com efeito, o sensor com maior valor de saída no arranjo montado estaria mais alinhado com o Sol.

Definiu-se, então, que a placa deveria rotacionar de Leste para Oeste (sentido arbitrado como horário no *software*) sempre que a diferença de valores dos sensores fosse maior ou igual a 40 (valor obtido a partir de métodos empíricos), obviamente, com o sensor mais voltado ao Sol registrando o maior valor ($mediaLDR1 - mediaLDR0 \geq 40$). Um código para o acionamento do motor de passo nesse sentido de rotação foi, então, criado, considerando um modo de giro com passo completo e com duas bobinas por ciclo. A figura 50 mostra essa condicional para o avanço da placa solar.

Uma vez tocado o sensor fim de curso ao entardecer, definiu-se um atraso para o início do movimento de retorno, ou seja, de Oeste para Leste, com vistas a aproveitar ao máximo a luz do fim do dia (ideia válida para sistemas com acumuladores de energia ou conectados à rede elétrica pública), atraso esse arbitrado

em apenas 60 s nesse trabalho, para efeitos de simulação, conforme ilustrado na figura 51.

Figura 43 — Código para o acionamento do motor no sentido de Leste para Oeste.

```

void setMotor(int _1a, int _1b, int _2a, int _2b) { // aciona mot. passo
  digitalWrite(_1A, _1a); // aciona terminal 1A do motor de passo
  digitalWrite(_1B, _1b); // aciona terminal 1B do motor de passo
  digitalWrite(_2A, _2a); // aciona terminal 2A do motor de passo
  digitalWrite(_2B, _2b); // aciona terminal 2B do motor de passo
}

/* Gira motor em sentido horário */
if ((mediaLDR1 - mediaLDR0 >= 40) && (habilitaSentidohorario)) {
  if (nivelS0) {
    motorSentidohorario = HIGH;
    motorSentidoantihorario = LOW;
  }

  switch (j) {
    case 0:
      // Passo 1
      setMotor(HIGH, LOW, HIGH, LOW);
      j = 1; k = 0;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 1:
      // Passo 2
      setMotor(LOW, HIGH, HIGH, LOW);
      j = 2; k = 3;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 2:
      // Passo 3
      setMotor(LOW, HIGH, LOW, HIGH);
      j = 3; k = 2;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 3:
      // Passo 4
      setMotor(HIGH, LOW, LOW, HIGH);
      j = 0; k = 1;
      getSwitchPosition();
      break;
  }
}
}

```

Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 44 — Lógica usada para o sensor limitador de curso, na qual definiu-se um atraso para o início do movimento de retorno.

```

void getSwitchPosition() {
  const long atrasoRetorno = 60000;
  // def. atraso p/ rastreador voltar à posição inicial
  if (!nivelS0) {
    if ( motorSentidohorario ) {
      habilitaSentidohorario = LOW;
      habilitaSentidoantihorario = HIGH;
      motorSentidohorario = LOW;
      delay(atrasoRetorno);
    } else if ( motorSentidoantihorario ) {
      habilitaSentidoantihorario = LOW;
      habilitaSentidohorario = HIGH;
      motorSentidoantihorario = LOW;
    }
  }
}

```

Fonte: autoria própria, 2018.

Na figura 52, mostram-se os códigos para o movimento de retorno da placa, até tocar de novo o sensor fim de curso, desta vez voltada para o Leste, permanecendo nesta posição até o amanhecer do próximo dia.

Adicionalmente, considerou-se a possibilidade de o seguidor não chegar ao limite de curso de avanço ao final de um dia, quando da ocorrência de tempo nublado. Para contornar essa situação, uma rotina específica para a detecção da noite foi criada, como mostrado na figura 53 permitindo que a placa seja conduzida de volta à posição inicial sem qualquer prejuízo para o ciclo do dia seguinte.

É importante destacar, por fim, que o movimento de retorno só foi habilitado após a placa chegar ao limite do curso de avanço ou após o cair da noite, para evitar um possível movimento “vai e vem” da mesma, pensado para o caso de dias com Sol entre nuvens, movimento que além de aumentar a possibilidade de o seguidor se perder, no que diz respeito ao rastreo do Sol, aumenta também o consumo de energia do sistema.

O código de controle completo usado no protótipo encontra-se no Apêndice B deste texto.

Figura 45 — Código para o acionamento do motor no sentido de Oeste para Leste.

```

/* Gira motor em sentido anti-horário */
if (habilitaSentidoantihorario) {
  if (nivelS0) {
    motorSentidoantihorario = HIGH;
    motorSentidohorario = LOW;
  }

  switch(k) {
    case 0:
      // Passo 4
      setMotor(HIGH, LOW, LOW, HIGH);
      k = 1; j = 0;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 1:
      // Passo 3
      setMotor(LOW, HIGH, LOW, HIGH);
      k = 2; j = 3;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 2:
      // Passo 2
      setMotor(LOW, HIGH, HIGH, LOW);
      k = 3; j = 2;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 3:
      // Passo 1
      setMotor(HIGH, LOW, HIGH, LOW);
      k = 0; j = 1;
      getSwitchPosition();
      break;
  }
}
}
}

```

Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 46 — Condicional para detecção da noite e a consequente condução da placa para a posição inicial.

```

/* Condição para detecção da noite */
if (((mediaLDR0 <= 6) && (mediaLDR1 <= 6)) && nivelS0) {
  habilitaSentidoantihorario = HIGH;
  habilitaSentidohorario = LOW;
}

```

Fonte: autoria própria, 2018.

4 TESTES E RESULTADOS

Para comprovar o correto funcionamento do sistema construído, alguns testes foram realizados contemplando as principais situações nas quais um seguidor solar deve operar, no sentido de submeter o protótipo a situações reais de emprego.

É verdade que, ainda durante o desenvolvimento da proposta solução, alguns testes em bancada já haviam sido feitos em partes isoladas do seguidor, como, por exemplo, os realizados para conhecer as respostas dos sensores de luminosidade quando submetidos a variações de luz. Isso serviu para a realização do código de controle, como explicado anteriormente.

Neste Capítulo, no entanto, são descritos os testes feitos no sistema finalizado, os quais permitiram conhecer a utilidade do protótipo, bem como validade da técnica de rastreamento do Sol escolhida.

Juntamente com a descrição de cada teste realizado tem-se uma breve análise dos respectivos resultados.

4.1 TESTE 1 — FUNCIONAMENTO EM BANCADA (COM LUZ ARTIFICIAL)

O primeiro teste realizado foi em bancada. Nesse caso, uma fonte de alimentação externa foi usada para energizar a parte eletroeletrônica do sistema, dado que em ambiente interno a placa solar não gera uma quantidade significativa de energia.

Com efeito, uma tensão de 12 V_{CC} foi aplicada na entrada da placa reguladora de tensão, em um par de bornes já projetados para serem usados nesse tipo de situação, conforme mostrado no Apêndice A deste trabalho, a qual alimentou os demais componentes do protótipo.

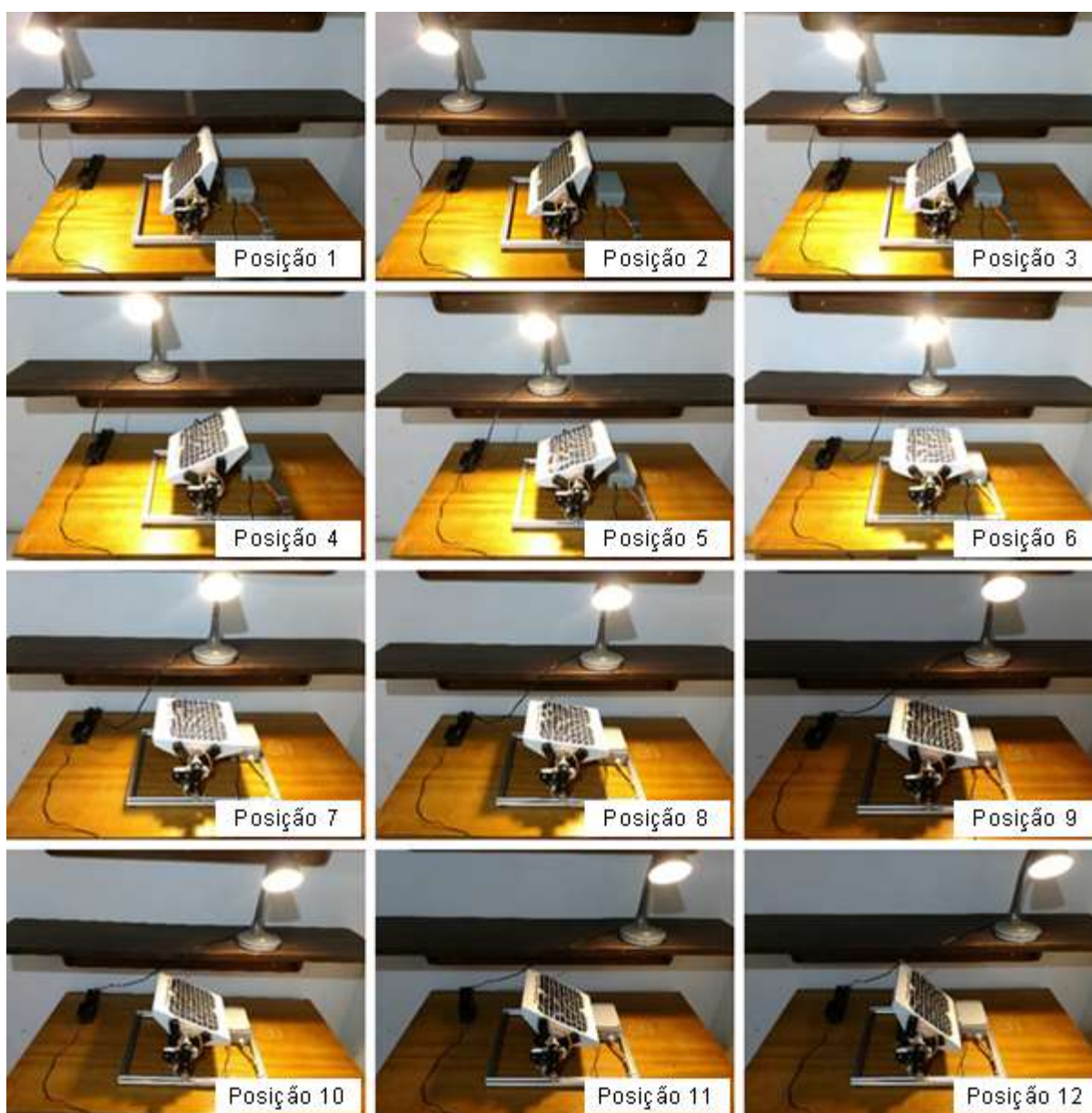
Com o seguidor colocado sobre uma escrivaninha e uma luminária de mesa simulando o Sol, a movimentação do sistema foi testada para um fotoperíodo.

A posição 1, mostrada na figura 54, simulou o amanhecer de um dia. Considerou-se, então, que nessa posição a placa solar estivesse voltada para o Leste, com o seguidor na posição inicial de um ciclo. Na sequência, a luminária foi movida alguns centímetros para a direita, de acordo com a posição 2, simulando o movimento do Sol de Leste para Oeste, com o seguidor rotacionando a placa solar em sentido horário para adequar-se à nova situação. Essa ação foi repetida outras vezes, como

ilustrado nas posições 3, 4 e 5, até que a luminária estivesse em uma posição tal qual à do Sol do meio dia, mostrada na posição 6. Como era esperado, a placa solar ficou em uma posição muito próxima da horizontal.

Continuando o teste, a luminária foi movida outras vezes para a direita, como indicado no intervalo de posições de 7 a 12, quando, finalmente, a posição final foi atingida, com as últimas posições representando o pôr do Sol. Depois de 60 s contados após o acionamento do sensor limitador de curso, a placa solar iniciou o seu retorno à origem, de acordo com o programa carregado no microcontrolador.

Figura 47 — Resultado do teste em bancada, onde uma luminária de mesa simulou o Sol.



Fonte: autoria própria, 2018.

Após esses experimentos e ainda com o uso da luminária de mesa, a placa solar foi colocada em uma posição intermediária, quando, então, todas as luzes do ambiente foram apagadas, para simular a chegada da noite. Com efeito, mais uma vez a placa iniciou o movimento de retorno à origem, com vistas a esperar o início de um novo ciclo voltada para o Leste.

Os resultados desse teste foram satisfatórios, porque a movimentação do sistema ocorreu exatamente como planejado.

4.2 TESTE 2 — COMPORTAMENTO EM MODO AUTÔNOMO

Com o objetivo de testar o comportamento do sistema em modo autônomo, colocou-se o mesmo em um ambiente externo e em um dia ensolarado.

Nesse caso, sem nenhuma fonte de alimentação externa conectada, esperava-se que a placa fosse fornecer a energia necessária para a operação do conjunto. No entanto, isso não ocorreu. Constatou-se que, embora a parte eletrônica ficasse energizada, o motor, quando acionado, não apresentava o torque necessário para a movimentar as partes móveis.

De volta à bancada, conectou-se novamente a fonte de alimentação com o objetivo de medir a potência demandada pelo sistema. Assim, com todas as cargas ligadas, mediu-se a tensão e a corrente fornecida pela fonte, obtendo valores de 11,84 V_{CC} e 2,15 A, o que resultou em 25,46 W.

De fato, a potência máxima da placa era de 5 W, um valor menor que 25 W.

Devido às limitações de custo na construção do protótipo, algumas peças foram adquiridas pelo seu tamanho e, também, por seu preço, sendo algumas delas compradas em lojas de sucatas eletrônicas, como foi o caso da placa solar e do motor. Nesse contexto, pouca importância se deu ao dimensionamento dos componentes, ou também, ao balanço de energia pertinente a um seguidor solar. O enfoque foi o de construir um protótipo para validar a possibilidade de rastreamento do sol a partir de sensores de luminosidade, apenas.

Se fosse o caso de uma aplicação real, um estudo de viabilidade técnica seria feito, onde mostrar-se-ia o ganho real com a construção do sistema, a partir do emprego de componentes comerciais, muito mais caros do que os usados no protótipo construído.

Isso posto, planejou-se a realização de outros testes simulando condições reais, para avaliar o desempenho do seguidor no que diz respeito ao rastreamento do Sol, evidentemente, com o auxílio de uma fonte de energia externa.

4.3 TESTE 3 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA ENSOLARADO)

Em um dia de céu com poucas nuvens, o seguidor foi colocado sobre um telhado e deixado em funcionamento das 8:00h às 17:00h.

Cabe destacar que a escolha desse local para a realização do teste foi feita com vistas a minimizar os sombreamentos sobre placa solar, dado que o telhado da edificação era uma área mais alta em relação às demais disponíveis para a colocação do sistema e, por isso, menos suscetível às sombras das muitas árvores existentes no terreno em questão. Contudo, o protótipo poderia ser testado em qualquer outro lugar julgado conveniente, inclusive no chão, caso as características do lugar do teste fossem outras.

Como o telhado citado apresentava uma pequena inclinação, o seguidor foi calçado com placas de madeira para ficar nivelado, assegurando que a placa solar pudesse girar $\pm 45^\circ$ a partir da horizontal.

Devido à dificuldade de gravar um vídeo de todo o experimento, por limitação de memória das câmeras pessoais disponíveis para essa atividade, o resultado desse teste foi registrado em fotos, tiradas, aproximadamente, de hora em hora, conforme exibido na figura 55.

Em mais detalhes, o seguidor foi ligado por volta das 08:00h com a placa fotovoltaica voltada para o Leste, iniciando o ciclo. Com o passar das horas, percebeu-se que o mesmo atuou no sentido de seguir o movimento do Sol, girando a placa em sentido horário sempre que a diferença entre as leituras dos sensores de luminosidade demandava tal ação.

Por volta das 13:00h, a placa havia atingido uma posição muito próxima da horizontal. Sobre essa constatação, vale lembrar a vigência do horário de verão durante o período de testes, o qual consiste em adiantar os relógios em uma hora com o objetivo de economizar energia elétrica, o que faz com que a altura solar máxima ocorra por volta das 13:00h e não das 12:00h. Isso posto, o desempenho do sistema até então ocorreu dentro do padrão de normalidade.

Durante o período da tarde, o sistema continuou a sua operação até atingir a sua posição final por volta das 17:00h, quando, após o período de espera nessa posição (60 s), iniciou o seu movimento de retorno. Como explicado anteriormente, em uma aplicação real esse tempo seria maior, para que a luz do entardecer pudesse ser aproveitada ao máximo, sendo o valor de 60 s arbitrado somente para a experimentação do protótipo.

Esse teste permitiu comprovar a eficácia do sistema quando usado em um dia com predomínio de radiação solar direta, não ocorrendo qualquer problema.

Figura 48 — Resultado do teste em condições reais, com dia ensolarado.



Fonte: autoria própria, 2018.

4.4 TESTE 4 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA NUBLADO)

Em um dia com o céu completamente encoberto, o seguidor foi colocado sobre o mesmo telhado e deixado em funcionamento das 8:00h às 20:00h.

O mesmo cuidado para nivelar o seguidor foi tomado e, assim como no teste 3, o resultado do experimento foi registrado em fotos tiradas, aproximadamente, de hora em hora, conforme exibido na figura 56.

O seguidor iniciou sua operação por volta das 08:00h e atuou movimentando a placa solar ao longo do dia, apesar do predomínio da radiação solar difusa.

Por volta das 13:00h, com a altura solar máxima, a inclinação da placa com relação à horizontal era muito pequena, como esperado.

Durante o período da tarde, o sistema continuou a girar em sentido horário até por volta das 18:00h. É possível observar, analisando com atenção as fotografias das 18:00h e das 19:00h da figura 56, que nesse período final da tarde a placa não rotacionou. Isso, porque a diferença de leituras dos sensores de luminosidade para esse período não foi suficiente para ativar o movimento de avanço da placa, em função do céu encoberto.

Em nenhum momento a posição final foi atingida, sendo a rotina para a detecção da noite a responsável por desencadear o movimento de retorno do seguidor, o que ocorreu por volta das 20:00h.

Esse teste também provou a funcionalidade do projeto, mesmo em uma condição com o predomínio de radiação solar difusa.

4.5 TESTE 5 — FUNCIONAMENTO EM CONDIÇÕES REAIS (DIA COM UM PERÍODO DE SOL ENTRE NUVENS E COM OUTRO COMPLETAMENTE NUBLADO)

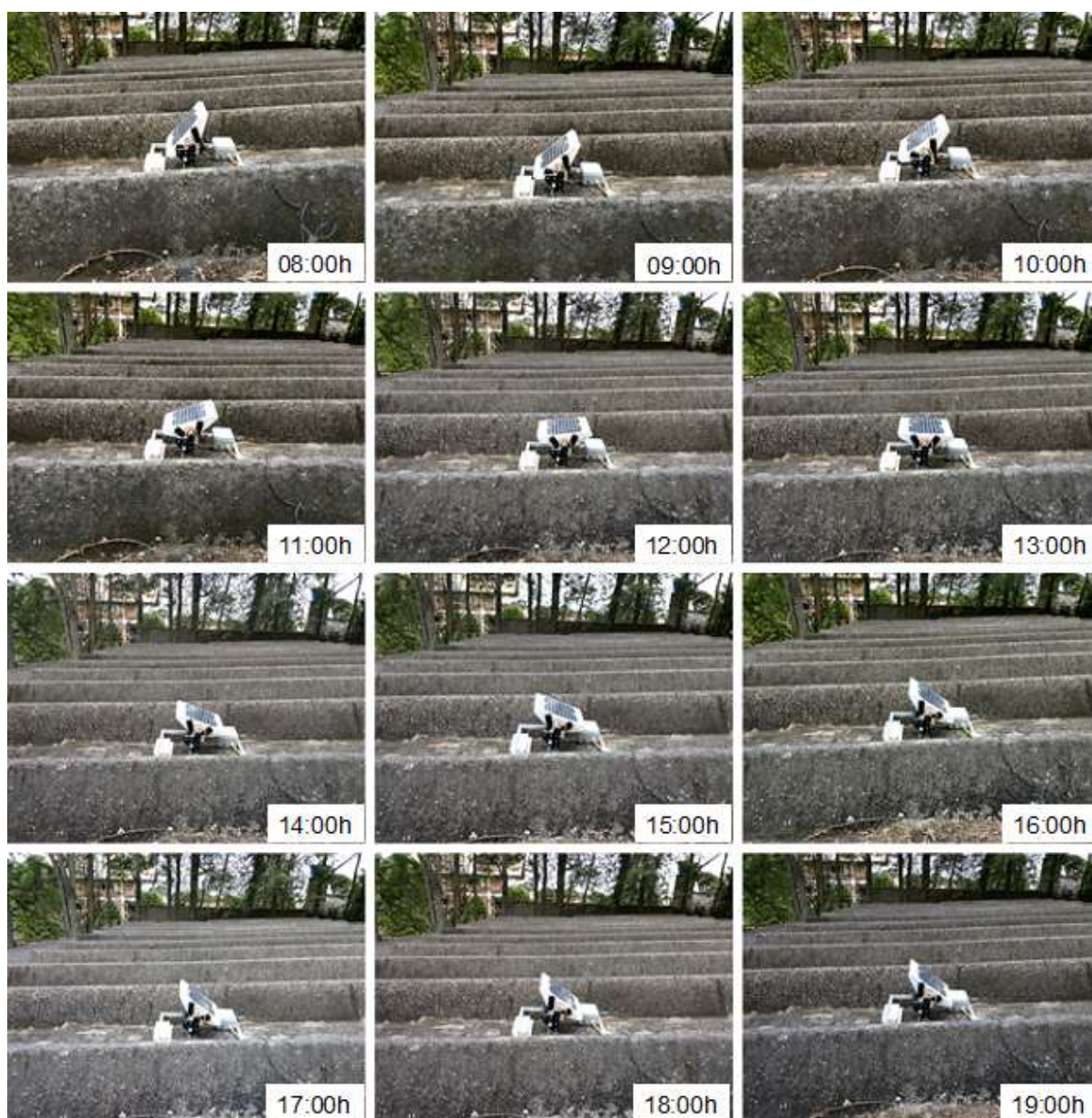
Outro teste foi feito em condições de tempo diferentes das anteriores. Em um dia que começou com o Sol aparecendo intermitentemente, e por volta das 16:00h foi completamente encoberto por nuvens, o seguidor foi ligado das 8:00h às 20:00h.

O local do teste foi o mesmo telhado e o seguidor foi nivelado assim como nos testes 3 e 4. O resultado do experimento foi registrado em fotos feitas de hora em hora, aproximadamente, conforme exibido na figura 57.

Ao longo do dia, o seguidor movimentou a placa normalmente, apesar de o Sol ora aparecer, ora não, na maior parte do período considerado.

Esse teste foi muito importante para comprovar a importância de se habilitar o movimento de retorno somente após a placa chegar ao limite de curso de avanço ou após o cair da noite, porque sem esse cuidado, nas condições desse teste, provavelmente os sensores indicariam a necessidade de movimento ora para um lado ora para o outro, aumentando a possibilidade de o seguidor se perder e, também, o consumo de energia do sistema.

Figura 49 — Resultado do teste em condições reais, com dia nublado.

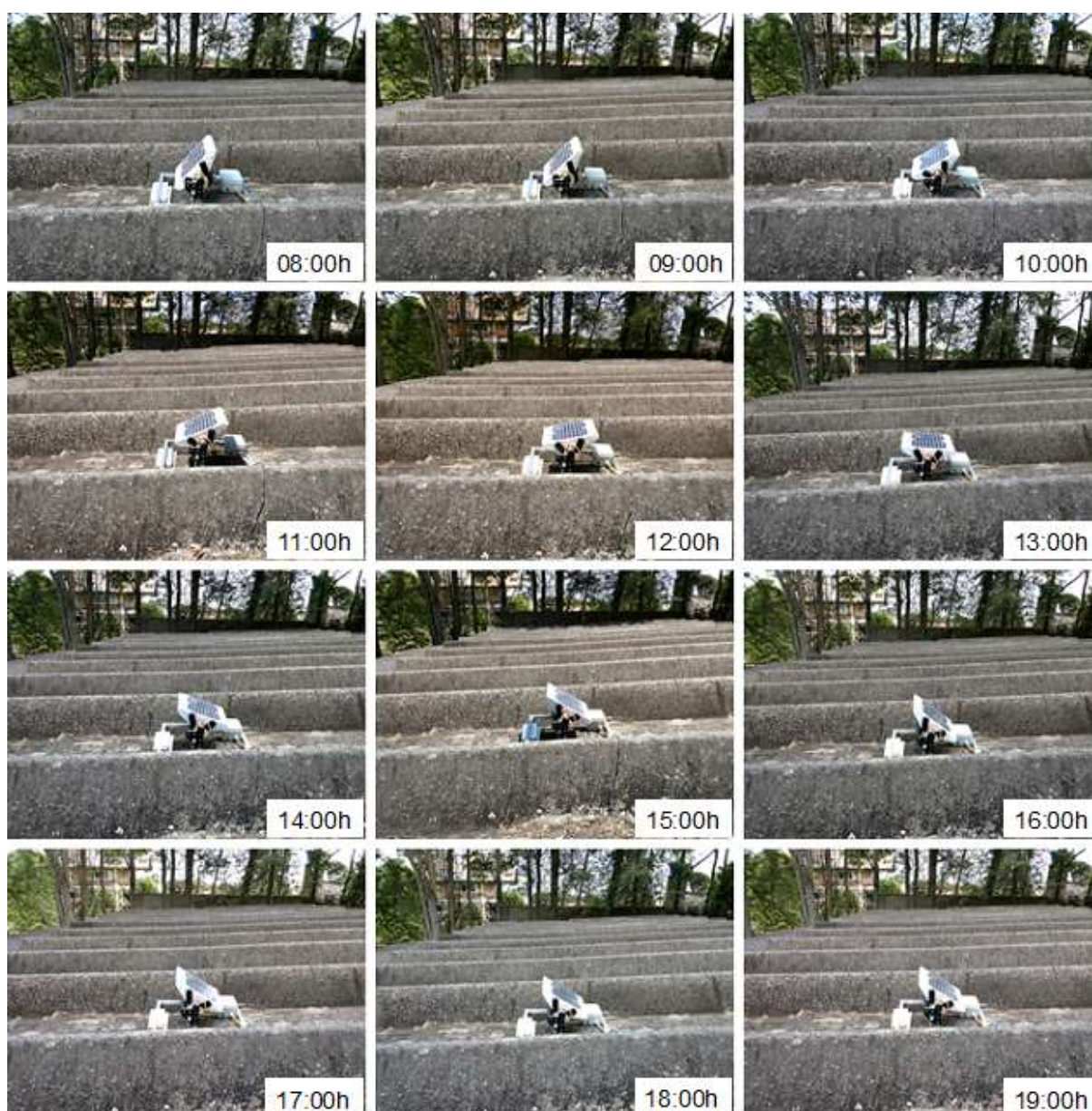


Fonte: autoria própria, 2018.

Em nenhum momento a posição final foi atingida, sendo mais uma vez, a rotina para a detecção da noite usada, com o retorno do seguidor tendo acontecido por volta das 20:00h.

Esse teste também provou a eficácia do seguidor no que diz respeito ao rastreamento do Sol, com o mesmo apresentando posições muito parecidas com as posições observadas nos outros testes, comparando-as para um mesmo horário do dia.

Figura 50 — Resultados do teste em condições reais, com dia com um período de Sol entre nuvens e com outro completamente nublado.



Fonte: autoria própria, 2018.

5 CONCLUSÕES

Considerando a insustentável pressão que a sociedade moderna faz sobre os seus recursos naturais, o uso de energia limpa tem sido, cada vez mais, incentivado. A energia solar é, nesse contexto, uma das fontes renováveis de maior destaque, pois além de ter um enorme potencial de geração, pode ser aproveitada de maneira distribuída, a partir de pequenos projetos com baixos impactos ambientais.

O presente trabalho pôde, então, somar resultados positivos no esforço para melhorar o aproveitamento da energia solar. A partir de testes de funcionalidade feitos em um protótipo, ele demonstrou a possibilidade do rastreamento do Sol a partir de sensores de luminosidade, o que permite a construção de seguidores solares e o consequente aumento de eficiência na conversão fotovoltaica de energia.

Ainda que tenha sido construído com componentes de baixo custo, o protótipo permitiu a experimentação da técnica de rastreamento escolhida em diferentes condições reais de operação. Os resultados obtidos revelaram que o sistema foi capaz de movimentar a placa solar como almejado, mostrando que os objetivos do trabalho foram cumpridos.

Tanto nos dias com predomínio de radiação solar direta, tomando-se como referência o teste feito em um dia ensolarado, quanto em dias com predomínio de radiação difusa, como mostrado no teste realizado com o céu completamente encoberto, a solução proposta mostrou-se eficaz. Ainda que a posição final não tenha sido atingida nos dias com predomínio de radiação solar difusa, os sensores de luminosidade baseados em LDR's construídos permitiram a otimização da posição da placa solar para a maior parte do fotoperíodo. Ademais, novos estudos podem definir a importância desse fato, dado que para as horas finais de um dia nublado, a movimentação do sistema talvez não compense o ganho de eficiência correspondente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas atividades podem complementar os resultados obtidos nesse trabalho, com o objetivo de ampliar o entendimento das questões relativas à energia solar. São elas:

1. Mostrar o ganho real de energia produzida pelo sistema com o seguidor solar em relação ao mesmo sistema sem ele;
2. Aprimorar a construção dos sensores de luminosidade aumentando o seu grau de proteção, a fim de permitir que sejam expostos à chuva;
3. Mostrar o ganho real de energia produzida pelo sistema com o seguidor solar em relação ao mesmo sistema sem ele, quando utilizadas outras tecnologias de placas solares.
4. Realizar um estudo de eficiência financeira para a instalação de um seguidor solar em um sistema gerador de potência usual.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. B. **Pontos quânticos coloidais de semicondutores: sínteses, caracterizações e aplicações**. 2013. 264 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2013.

ARDUINO. **Download the Arduino IDE**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

BLUESOL. **Painel Solar (Placa Solar): A Verdade Sobre o Preço e Como Funciona**. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/painel-solar-preco-e-como-funciona/>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

BOSE, B. **Power electronics and motor drives: advances and trends**. San Diego: Elsevier, 2006.

BOSIO, A.; MENOSSI, D.; MAZZAMUTO, S.; ROMEO, N. **Manufacturing of CdTe Thin Film Photovoltaic Modules**. *Thin Solid Films*. Pisa, 2010.

BRASIL JÚNIOR, A. G. **Desenvolvimento de processos de bioconjugação empregando pontos quânticos fluorescentes de semicondutores II-VI**. 2010. 101 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal de Pernambuco: Recife, 2010.

BRITES, F. G.; SANTOS, V. P. A. **Motor de passo**. 2008. 15 f. Trabalho Acadêmico (Curso de Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense: Niterói, 2008.

BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre : AMGH, 2011.

BUTANE. **Elemental Carbon, Silicon, Germanium**. Disponível em: <<http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/GenChem2/C3/1.html> >. Acesso em: 17 ago. 2018.

CARVALHO, D. R. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar Biaxial**. 2011. 60 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2011.

CORTEZ, R. J. M. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade do Porto: Porto, 2013.

DECAFER. **Tubos de aço: saiba mais sobre os diferentes tipos e aplicações desse produto**. Disponível em: <<https://decafer.com.br/tubos-de-aco-saiba-mais-sobre-os-diferentes-tipos-e-aplicacoes-desse-produto/>>. Acesso em: 8 nov. 2018.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

ECYCLE. **O que é energia solar, vantagens e desvantagens.** Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2890-energia-solar>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

EDGEFX. **Arduino technology architecture and its advantages.** Disponível em: <<https://www.edgefxkits.com/blog/arduino-technology-architecture-and-applications/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

ENERGIA SOLAR ALFA. **Sistema Solar OFF-GRID ou sistema autonomo de energia.** Disponível em: <<http://energiasolaralfa.com.br/sistema-solar-off-grid.html>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

ENDEAVOR BRASIL. **5 dúvidas básicas sobre fazer um protótipo para seu negócio.** Disponível em: <<https://endeavor.org.br/estrategia-e-gestao/prototipo/>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

FILIPE FLOP. **Como utilizar o Gravador de PIC USB K150.** Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/como-utilizar-gravador-de-pic-usb-k150/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

FILIPE FLOP. **Motor DC com driver ponte H L298N.** Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/motor-dc-arduino-ponte-h-l298n/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

FÍSICA. **Radiação Solar e Terrestre. Balanço de Calor.** Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. **Máquinas.** São Paulo: Mcgraw-Hill, 1975.

FORSETI. **A estrutura forte e inteligente.** Disponível em: <<https://loja.forsetisolucoes.com.br/>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

FORUM ARDUINO. **Bipolar stepping motor and Arduino (without H-Bridge)?** Disponível em: <<http://forum.arduino.cc/index.php?topic=91442.0>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

FRANCESCHI, A.; ANTONELLO, M. G. **Elementos de máquinas.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2014.

GONÇALVES, M. L. F. **Instalações de microgeração e sua evolução com o enquadramento legal.** 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade da Beira Interior: Covilhã, 2014.

GREENPRO. **Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projeto e instalação.** Portugal. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2004.

IF. **Curso: Arduíno e eletrônica.** Disponível em: <http://wiki.foz.ifpr.edu.br/wiki/index.php/Curso:_Ardu%C3%ADno_e_Eletr%C3%B4nica>. Acesso em: 14 nov. 2018.

INFOESCOLA. **Dopagem Eletrônica**. Disponível em:
<<https://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

INSTITUTO NCB. **Tudo sobre relés**. Disponível em:
<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/597-como-funcionam-os-reles?showall=1&limitstart>>. Acesso em: 9 nov. 2018.

INSTITUTO NCB. **Conheça os microcontroladores PIC**: parte 1. Disponível em:
<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontroladores/141-microchip-pic/1243-mic001>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

INSTRUCTABLES. **Driving a unipolar stepper motor with ULN2004 and Arduino**. Disponível em: <<https://www.instructables.com/topics/Driving-a-unipolar-stepper-motor-with-ULN2004-and-/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

JP JUSTINIANO. **Where is the Sun? (Solar position algorithms)**. Disponível em:
<<https://jpjustiniano.wordpress.com/2011/07/11/where-is-the-sun-solar-position-algorithms/>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

KALATEC. **Drivers para motores de passo – várias opções**. Disponível em:
<<http://www.kalatec.com.br/drivers-motores-de-passo/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

KLIMOV, V. I. **Nanocrystal Quantum Dots**. 2. Ed. Boca Raton: CRC, 2010.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Porto Alegre: Globo, 1982.

LABORATÓRIO DE GARAGEM. **Tutorial motor de passo - parte 1**: introdução, tipos, modos de acionamento. Disponível em:
<<http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-sobre-motor-de-passo>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

LOJA DA ELÉTRICA. **Arduino MEGA 2560 com cabo USB**. Disponível em:
<<https://www.daeletrica.com.br/arduino-mega-2560-com-cabo-usb>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126-143, 14 de outubro de 2014.

MASTER WALKER. **Como usar com Arduino o motor de passo 28BYJ-48 com driver ULN2003**. Disponível em:
<<http://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/arduino-utilizando-motor-de-passo-28byj-48-e-driver-uln2003/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

MAZIDI, M. A.; MCKINLAY, R. D.; CAUSAY, D. **PIC microcontroller and embedded systems**: using assembly and C for PIC18. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008.

METALICA. **Fabricação de perfis e chapas utilizadas.** Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/detalhamento-em-estruturas-metalicas>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

MUNDO DA ELÉTRICA. **O que é relé? Como funciona um relé?** Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-rele-como-funciona-um-rele/>>. Acesso em: 9 nov. 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOVA ELETRÔNICA. **Qual a diferença entre Microprocessador e Microcontrolador.** Disponível em: <<http://blog.novaeletronica.com.br/qual-diferenca-entre-microprocessador-e-microcontrolador/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

NREL. **News Release: NREL, University of Washington Scientists Elevate Quantum Dot Solar Cell World Record to 13.4 Percent.** Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/press/2017/scientists-elevate-quantum-dot-solar-cell-world-record.html>>. Acesso em: 04 nov. 2018.

OTTOBONI, A. Servo-acionamentos. **Mecatrônica Atual.** [S.l.], n. 6, p. 11-14, out. 2002.

PAZOS, F. **Automação de Sistemas e Robótica.** Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

PENA, A. L. **Dióxido de Titânio para Aplicações em Células Solares.** 2015. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal de São João del-Rei: São João del-Rei, 2015.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M. ; PEREIRA, S. V. ; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2ª Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

POMBAS, J. P. C. **Sistema Robótico para Seguimento Solar CPV Baseado em Processamento de Imagem.** 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade Nova de Lisboa: Lisboa, 2016.

PORTAL ENERGIA. **Diferenças entre seguidores solares de eixo único e eixo duplo.** Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/diferencas-seguidores-solares-eixo-unico-eixo-duplo/>>. Acesso em: 1 nov. 2018.

PORTAL ENERGIA. **Em que consiste um sistema seguidor solar fotovoltaico.** Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

PORTAL O SETOR ELÉTRICO. **Energia Solar: o potencial brasileiro.** Fascículo Renováveis. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-i-energia-solar-o-potencial-brasileiro/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

PORTAL SOLAR. **Modelos de Placa Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/modelos-de-placa-solar.html>>. Acesso em: 5 nov. 2018.

PORTAL SOLAR. **Seguidor Solar – Tracker: vantagens e desvantagens parte 1**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar---tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

PORTAL VIDA DE SILÍCIO. **Sensor de Luz – Aprendendo a usar o LDR com Arduino**. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sensor-de-luz-com-ldr/>>. Acesso em: 9 nov. 2018.

REDA, I.; ANDREAS, A. **Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications**. National Renewable Energy Laboratory: Golden, 2008.

ROBOCORE. **Controlando motores: motor de passo**. Disponível em: <<https://www.robocore.net/tutorials/97.html>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, R.; BEYER, H.G.; MONTENEGRO, A.A.; DACOREGIO, M.M.; KNOB, P. **Performance results of the first grid-connected, thin-film PV installation in Brazil: high performance ratios over six years of continuous operation**. 19ª Conferência Européia de Energia Solar Fotovoltaica. Paris: 2004. França.

SANTOS, B.S.; FARIAS, P. M. A.; FONTES, A. Semiconductor Quantum Dots for Biological Applications. In: HENINI, M. **Handbook of Self Assembled Semiconductor Nanostructures for Novel Devices in Photonics and Electronics**. Oxford: Elsevier, 2008. cap.26, p.773-798.

SEQUEIRA, S. I. H. **Células Solares Sensibilizadas por Novos Corantes Derivados de Cumarinas**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Meio Ambiente) – Universidade de Lisboa: Lisboa, 2012.

SGN ROBÓTICA EDUCACIONAL. **Qual a diferença entre os modelos de Arduino? Qual deles devo escolher?** Disponível em: <<https://www.sgnrobotica.com/single-post/2017/08/24/Qual-a-diferen%C3%A7a-entre-os-modelos-de-Arduino-Qual-deles-devo-escolher>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

SHAREENERGY. **O que é o inversor e qual a sua função em um sistema fotovoltaico?** Disponível em: <<http://shareenergy.com.br/o-que-e-o-inversor-e-como-ele-funciona/>>. Acesso em: 7 nov. 2018.

SILVA, F. B. F.; GOUVEIA, D. C. de; URBANETZ JÚNIOR, J. Análise da demanda de potência consumida por rastreadores solares automatizados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado.

STEPHAN, R. M. Descrição do servoconversor. **Guia de aplicação de servoacionamentos**. [S.l.; s. n.], p. 31-46. [200-?].

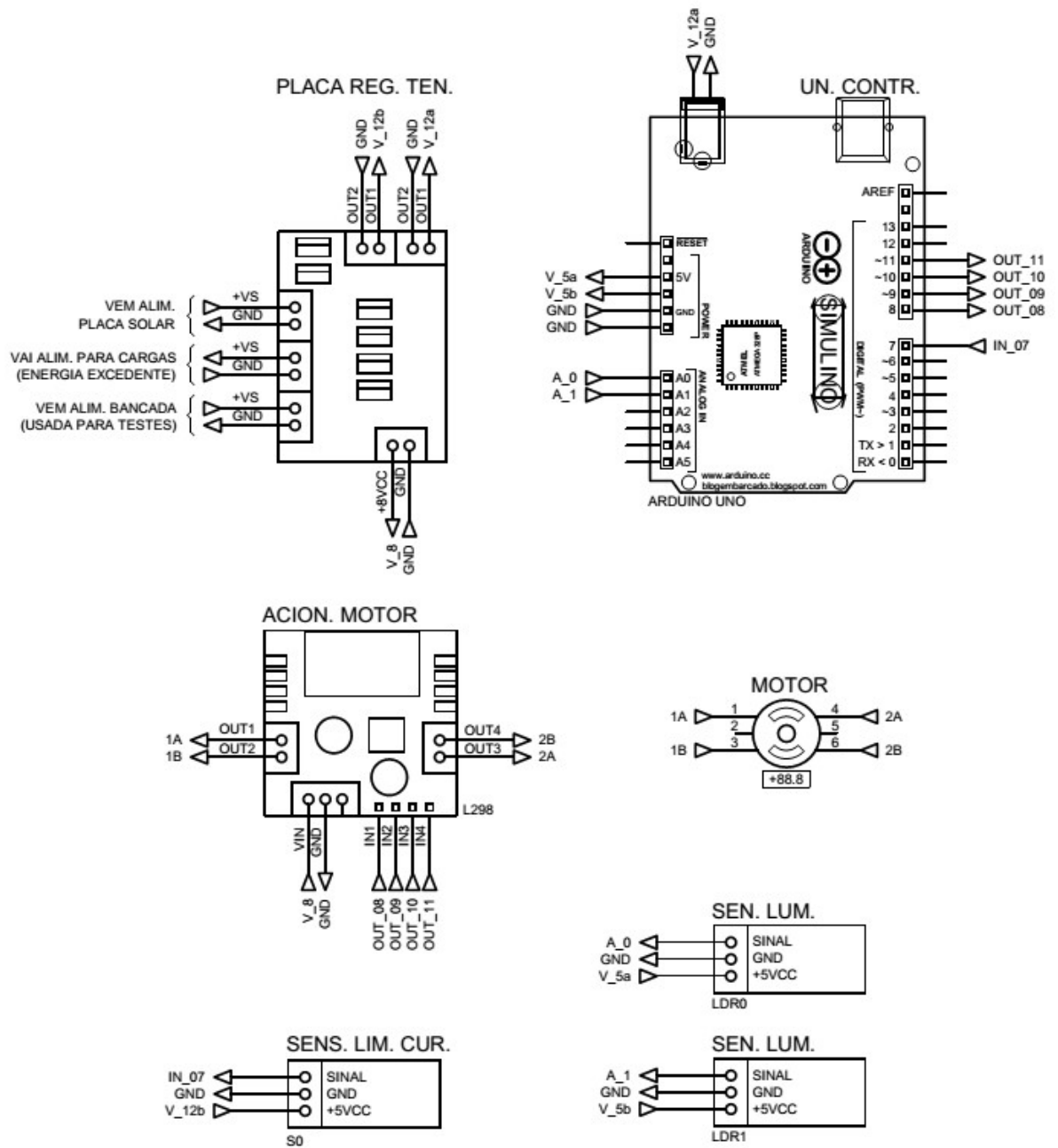
STURM, W. **Sensores Industriais**. Rio de Janeiro: Papel Virtual, 2004.

SOLOMAN, S. **Sensores e Sistemas de Controle na Indústria**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

VALLDOREIX GREENPOWER. **The Benefits of Solar Trackers**. Disponível em: <<http://www.valldoreix-gp.com/the-benefits-of-solar-trackers/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

VILLAS BÔAS, N.; DOCA, R. H.; BISCUOLA G. J. **Tópicos de Física 2**. 18ª Ed. São Paulo: Saraiva, 2007

APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DO PROTÓTIPO



APÊNDICE B – CÓDIGO DE CONTROLE DO PROTÓTIPO

```

/*
 * UTFPR [TCC]
 * Autor    : Felipe José Perez
 * Data     : 2018.11.18
 * Versao   : 0.7
 * Descrição : Código de Controle para Protótipo de Seguidor Solar de Um Eixo
 */

const int sensorS0 = 7;           // define o pino 7 para o sensor indutivo S0
const int _1A = 8;                // define o pino 8 para o terminal 1A do acion. do motor
const int _1B = 9;                // define o pino 9 para o terminal 1B do acion. do motor
const int _2A = 10;               // define o pino 10 para o terminal 2A do acion. do motor
const int _2B = 11;               // define o pino 11 para o terminal 2B do acion. do motor
boolean nivelS0;                  // indica o nível lógico do sensor S0
boolean habilitaSentidohorario = HIGH; // hab. sentido horário de rotação do motor
boolean habilitaSentidoantihorario = LOW; // hab. sentido anti-horário de rotação do motor
boolean motorSentidohorario = LOW; // indica o sentido horário de rot. do motor
boolean motorSentidoantihorario = LOW; // indica o sentido anti-horário de rot. do motor
int j = 0, k = 0;                 // contadores para o sequenciamento dos passos do motor

void setMotor(int _1a, int _1b, int _2a, int _2b) { // aciona motor de passo
  digitalWrite(_1A, _1a);           // aciona terminal 1A do motor de passo
  digitalWrite(_1B, _1b);           // aciona terminal 1B do motor de passo
  digitalWrite(_2A, _2a);           // aciona terminal 2A do motor de passo
  digitalWrite(_2B, _2b);           // aciona terminal 2B do motor de passo
}

void getSwitchPosition() {
  const long atrasoRetorno = 60000; // Define o atraso para rastr. voltar à posição inicial
  if (!nivelS0) {
    if ( motorSentidohorario ) {
      habilitaSentidohorario = LOW;
      habilitaSentidoantihorario = HIGH;
      motorSentidohorario = LOW;
      delay(atrasoRetorno);
    } else if ( motorSentidoantihorario ) {
      habilitaSentidoantihorario = LOW;
      habilitaSentidohorario = HIGH;
      motorSentidoantihorario = LOW;
    }
  }
}

void setup() {
  pinMode(sensorS0, INPUT_PULLUP); // define o pino do sensorS0 como entrada e com
  resistor de pull-up ativado
  pinMode(_1A, OUTPUT);           // define o pino do terminal 1A como saída
  pinMode(_1B, OUTPUT);           // define o pino do terminal 1B como saída
  pinMode(_2A, OUTPUT);           // define o pino do terminal 2A como saída
  pinMode(_2B, OUTPUT);           // define o pino do terminal 2B como saída
}

```



```

}

void loop() {
  const int INTERVALO_MEDIAS = 1000; // define o intervalo de tempo no qual o número de
  amostras deve ser coletado, definindo também o tempo entre cada passo do motor
  const int NUM_LEITURAS = 20; // define o número de amostras para a obtenção
  da média dos valores dos LDR's
  const int VALOR_LDR0 = A0; // define o pino A0 para LDR0
  const int VALOR_LDR1 = A1; // define o pino A1 para LDR1
  float mediaLDR0 = 0; // média do LDR0
  float mediaLDR1 = 0; // média do LDR1
  float totalLDR0 = 0; // total móvel para LDR0
  float totalLDR1 = 0; // total móvel para LDR1
  int leituraLDR0[NUM_LEITURAS]; // vetor quantidade de amostras para LDR0
  int leituraLDR1[NUM_LEITURAS]; // vetor quantidade de amostras para LDR1

  /* Contador usado para o índice da leituras dos LDR's */
  for (int i = 0; i < NUM_LEITURAS; i++) {
    leituraLDR0[i] = analogRead(VALOR_LDR0); // lê o valor do LDR0
    totalLDR0 += leituraLDR0[i]; // adiciona leitura ao total
    leituraLDR1[i] = analogRead(VALOR_LDR1); // lê o valor do LDR1
    totalLDR1 += leituraLDR1[i]; // adiciona leitura ao total
    delay(INTERVALO_MEDIAS/NUM_LEITURAS);
  }

  mediaLDR0 = (totalLDR0 / NUM_LEITURAS); // calcula a média das leituras do LDR0
  mediaLDR1 = (totalLDR1 / NUM_LEITURAS); // calcula a média das leituras do LDR1

  nivelS0 = digitalRead (sensorS0); // lê o nível lógico de S0

  /* Gira motor em sentido horário */
  if ((mediaLDR1 - mediaLDR0 >= 40) && (habilitaSentidohorario)) {
    if (nivelS0) {
      motorSentidohorario = HIGH;
      motorSentidoantihorario = LOW;
    }
  }

  switch (j) {
    case 0:
      // Passo 1
      setMotor(HIGH, LOW, HIGH, LOW);
      j = 1; k = 0;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 1:
      // Passo 2
      setMotor(LOW, HIGH, HIGH, LOW);
      j = 2; k = 3;
      getSwitchPosition();
      break;
    case 2:
      // Passo 3
      setMotor(LOW, HIGH, LOW, HIGH);
      j = 3; k = 2;

```

```

    getSwitchPosition();
    break;
case 3:
    // Passo 4
    setMotor(HIGH, LOW, LOW, HIGH);
    j = 0; k = 1;
    getSwitchPosition();
    break;
}
}

/* Condição para detecção da noite */
if (((mediaLDR0 <= 6) && (mediaLDR1 <= 6)) && nivelS0) {
    habilitaSentidoantihorario = HIGH;
    habilitaSentidohorario = LOW;
}

/* Gira motor em sentido anti-horário */
if (habilitaSentidoantihorario) {
    if (nivelS0) {
        motorSentidoantihorario = HIGH;
        motorSentidohorario = LOW;
    }
}

switch(k) {
case 0:
    // Passo 4
    setMotor(HIGH, LOW, LOW, HIGH);
    k = 1; j = 0;
    getSwitchPosition();
    break;
case 1:
    // Passo 3
    setMotor(LOW, HIGH, LOW, HIGH);
    k = 2; j = 3;
    getSwitchPosition();
    break;
case 2:
    // Passo 2
    setMotor(LOW, HIGH, HIGH, LOW);
    k = 3; j = 2;
    getSwitchPosition();
    break;
case 3:
    // Passo 1
    setMotor(HIGH, LOW, HIGH, LOW);
    k = 0; j = 1;
    getSwitchPosition();
    break;
}
}
}
}

```

**APÊNDICE C – RELAÇÃO DE MATERIAIS E SERVIÇOS NECESSÁRIOS À
CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SEUS RESPECTIVOS CUSTOS**

Materiais			
Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Valor
Perfil 20 x 20 mm	2,10 m	R\$ 16,30	R\$ 34,13
Parafuso cab. cilíndrica Allen – M6 x 10 mm	4,00 pç	R\$ 0,35	R\$ 1,40
Porca quadrada – M6 x 20 mm	13,00 pç	R\$ 1,80	R\$ 23,40
Placa quadrada 90° - 30 x 30 sem corte	1,00 pç	R\$ 7,20	R\$ 7,20
Parafuso cab. cilíndrica Allen – M6 x 8 mm	9,00 pç	R\$ 0,40	R\$ 3,60
KIT conector universal 20	7,00 pç	R\$ 5,55	R\$ 38,85
Pé nivelador ¼" – base Ø18 mm	4,00 pç	R\$ 1,35	R\$ 5,40
Barra roscada 5/8" x 1 m (eixo)	1,00 pç	R\$ 34,00	R\$ 34,00
Porca sextavada 5/8" (eixo)	8,00 pç	R\$ 3,00	R\$ 24,00
Arruela 5/8" (eixo)	8,00 pç	R\$ 1,00	R\$ 8,00
Mancal de rolamento Ø10 mm	2,00 pç	R\$ 25,00	R\$ 50,00
Barra roscada M10 x 1 m (contrapeso)	1,00 pç	R\$ 8,50	R\$ 8,50
Porca sextavada M10 (contrapeso)	8,00 pç	R\$ 0,25	R\$ 2,00
Arruela M10 (contrapeso)	8,00 pç	R\$ 0,15	R\$ 1,20
Tubo aço quadrado 50 x 25 x 230 mm parede 3mm	1,00 pç	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Polia dentada plástica passo GT2 50 dentes	1,00 pç	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Correia dent. passo GT2 81MXL 207 x 6,35 mm	1,00 pç	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Placa solar de m-Si 5W _p	1,00 pç	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Motor de passo Minebea 17PM-H005-P2VA	1,00 pç	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Driver para motor de passo L298	1,00 pç	R\$ 15,36	R\$ 15,36
Placas eletrônicas para sensores de luminosidade	2,00 pç	R\$ 7,00	R\$ 14,00
Carenagens para sensores de luminosidade	2,00 pç	R\$ 5,00	R\$ 10,00
Sensor indutivo Omron E2A-M12KS04-WP-C1	1,00 pç	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Placa Arduino UNO	1,00 pç	R\$ 28,00	R\$ 28,00
Placa universal 40 x 60 mm para circuito impresso	1,00 pç	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Regulador de tensão 7808	4,00 pç	R\$ 1,75	R\$ 7,00
Regulador de tensão 7812	2,00 pç	R\$ 1,75	R\$ 3,50
Bornes duplos para placa de circuito impresso	6,00 pç	R\$ 1,25	R\$ 7,50
Caixa plástica Steck SSX161 165 x 120 x 80 mm	1,00 pç	R\$ 16,30	R\$ 16,30
Prensa cabo PG11	2,00 pç	R\$ 2,30	R\$ 4,60
Abraçadeira plástica 200 x 4,6 mm	1,00 pct	R\$ 15,90	R\$ 15,90
Conector Jack P4 macho	1,00 pç	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Conector Jack P4 fêmea para painel	1,00 pç	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Cabo 4 x 0,34mm ²	2,00 m	R\$ 2,00	R\$ 4,00
Cabo manga 6 x 26 AWG	1,00 m	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Cabo 1mm ² marrom	1,00 m	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Cabo 1mm ² azul	1,00 m	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Cabos de ligação macho/fêmea Arduino (40 vias)	1,00 pct	R\$ 13,00	R\$ 13,00
Fonte de alimentação 127~220V _{AC} / 12V _{CC} 2A	1,00 pç	R\$ 19,90	R\$ 19,90
Tinta spray branco fosco	1,00 pç	R\$ 13,20	R\$ 13,20
Serviços			
Serviço de usinagem do eixo			R\$ 100,00
Serviço de corte e furação de perfis de alumínio			R\$ 20,00
Total			R\$ 683,54