

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

BRUNA SACZK
GABRIELA CAMARGO CALLEGARI
VINICIUS HENRIQUE PEREIRA DA SILVA

RASTREADOR SOLAR PARA PLACAS FOTOVOLTAICAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

BRUNA SACZK
GABRIELA CAMARGO CALLEGARI
VINICIUS HENRIQUE PEREIRA DA SILVA

RASTREADOR SOLAR PARA PLACAS FOTOVOLTAICAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador Prof. Me. Celso Fabrício De Melo Júnior

Co-orientador Prof. Me. Ubirajara Zoccoli

CURITIBA

2018

Bruna Saczk
Gabriela Camargo Callegari
Vinicius Henrique Pereira da Silva

Rastreador solar 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 de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de novembro de 2018.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Celso Fabrício de Melo Junior, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Ubirajara Zoccoli, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Celso Fabrício de Melo Junior, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ubirajara Zoccoli, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Aparecido Batista, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

AGRADECIMENTOS

A minha equipe de trabalho, que tornaram possível o desafio de lidar com o tempo e com as mudanças.

Aos nossos pais, por todo carinho e apoio e por não medirem esforços para que chegássemos onde estamos.

Ao Prof. Me. Celso, pelas orientações neste período de aprendizado.

Ao Prof. Me. Ubirajara Zoccoli, pela disponibilidade e atenção de sempre.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

SACZK, Bruna; CALLEGARI, Gabriela Camargo; SILVA, Vinicius Henrique Pereira da. Rastreador solar para placas fotovoltaicos. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente trabalho de conclusão de curso refere-se a construção de um protótipo de rastreador solar para painéis fotovoltaicos atuante em dois eixos. A partir da observação de painéis fixos, tem-se a constatação que a radiação solar quando recebida nas placas de forma perpendicular, tem eficiência teórica máxima. Para tanto, buscou-se no referencial teórico as equações que foram utilizadas e criou-se uma programação. Utilizaram-se dois Arduinos (Uno e Mega) para recepção e manipulação dos dados. Os dados de localização, data e horários foram recebidos a partir de um módulo GPS e manipulados conforme equações para atuação da rotina de dois motores de passo. Para gravação dos dados e posterior análise, utilizou-se um módulo SD. Entretanto, apesar da perfeita funcionalidade do protótipo, tem-se a ineficiência devido a baixa geração de energia.

Palavras-chave: Rastreador solar, painéis fotovoltaicos, Arduino, módulo GPS.

ABSTRACT

SACZK, Bruna; CALLEGARI, Gabriela Camargo; SILVA, Vinicius Henrique Pereira da. Solar tracker for photovoltaic panels. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The present final paper refers to the construction of a prototype of solar tracker for photovoltaic panels acting in two axes. From the observation of fixed panels, there is a realization that the solar radiation, when received in perpendicular form, has maximum theoretical efficiency. In order to do so, the theoretical framework was used to find the equations that were used and a programming was created. Two Arduinos (Uno and Mega) were used for receiving and manipulating the data. The location, date and time data were received from a GPS module and manipulated according to equations for the routine operation of two step motors. For data recording and subsequent analysis, an SD module was used. However, despite the perfect functionality of the prototype, there is inefficiency due low power generation.

Key words: solar tracker, photovoltaic panels, Arduino, GPS module.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Unidade</u>
δ	Ângulo de declinação solar	Graus
ϕ	Ângulo de latitude	Graus
A	Ano	-
A	Área útil do módulo	m ²
q	Carga do elétron	C
λ	Coeficiente de irradiação solar	W/m ²
k	Constante de Boltzmann's	J/K
I _{sc}	Corrente de curto circuito do painel	A
I _s	Corrente de saturação	A
I	Corrente gerada pelo efeito fotovoltaico	A
I _{mp}	Corrente máxima de pico	A
D	Dia	-
DJ	Dia Juliano	-
NDA	Dia sequencial do ano	-
x	Distância do referencial	m
η	Eficiência em painéis fotovoltaicos	-
E _g	Faixa de energia semicondutor	eV
n	Fator de idealidade do diodo	-
γ	Fator de preenchimento da célula	Nm
I _{PH}	Fotocorrente gerada pela radiação luminosa	A
H _N	Horário do nascer do sol	h
H _P	Horário do pôr do sol	h
I _c	Irradiância solar	W/m ²
LDR	Light Dependent Resistor	-
m	Massa	Kg
M	Mês	-
P	Peso	N
P _{MÁX}	Potência máxima do painel fotovoltaico	W
R _{SH}	Resistência paralela do sistema fotovoltaico	Ω
R _s	Resistência série do sistema fotovoltaico	Ω

SD	Secure digital	-
SPI	Serial Peripheral Interface	-
T	Temperatura da célula	K
K_i	Temperatura de curto-circuito do painel	K
T_{Di}	Temperatura de operação do diodo	K
T_C	Temperatura de trabalho da célula	K
T_{NOM}	Temperatura nominal do diodo	K
T_D	Tempo de duração do dia	h
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	V
V	Tensão de saída do sistema fotovoltaico	V
V_{mp}	Tensão máxima de pico	V
V_T	Tensão térmica	V
τ	Torque	N.m

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fusos horários do Brasil.....	20
Figura 2 – Analema	21
Figura 3 – Estações do ano de acordo com a declinação solar	22
Figura 4 – Placas fotovoltaicas com células de silício monocristalino	23
Figura 5 – Placas fotovoltaicas com células de silício policristalino	24
Figura 6 – Placas voltaicas com células orgânicas	25
Figura 7 –Representação de funcionamento do painel fotovoltaico	26
Figura 8 – Gráfico tensão versus corrente	28
Figura 9 – Gráfico potência versus tensão.....	28
Figura 10 – Diagrama de blocos da programação	32
Figura 11 – Circuito LDR.....	33
Figura 12 – Circuito da placa fotovoltaica.....	33
Figura 13 – Estrutura caixa inferior.....	34
Figura 14 – Interior da caixa inferior	35
Figura 15 – Estrutura da caixa superior.....	35
Figura 16 – Motor de passo 28BYJ-48	39
Figura 17 – Esquema elétrico do driver ULN2003.....	40
Figura 18 – Hardware do drive ULN2003.....	40
Figura 19 – Esquema de pulso do motor de passo	41
Figura 20 – Esquema de um motor de passo de dois polos (Adaptada)	41
Figura 21 – Arduino MEGA 2560	42
Figura 22 – Arduino UNO	43
Figura 23 – Mini painel fotovoltaico	43
Figura 24 – Módulo GPS e antena	44
Figura 25 – Módulo SD.....	44
Figura 26 – Interior do protótipo	45
Figura 27 – Posição do protótipo as 06:23	46
Figura 28 – Posição do protótipo as 10:23	47
Figura 29 – Posição do protótipo as 12:53	47
Figura 30 – Posição do protótipo as 16:30	48
Figura 31 – Posição do protótipo as 19:30	48
Figura 32 – Gráfico tensão x tempo	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento médio das células e módulos fotovoltaicos.....	16
Tabela 2 – Características dos materiais de carga do motor superior.....	36
Tabela 3 – Posição de cada material em relação ao eixo do motor superior ...	37
Tabela 4 – Características dos materiais de carga do motor superior.....	38
Tabela 5 – Posição de cada material em relação ao eixo do motor superior ...	38
Tabela 6 – Planilha de custos.....	45

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do Dia Juliano.....	20
Equação 2 – Ângulo da declinação solar	21
Equação 3 – Tempo de duração do dia.....	22
Equação 4 – Cálculo do horário do nascer do sol	22
Equação 5 – Cálculo do horário do pôr do sol.....	23
Equação 6 – Corrente de saída de um painel fotovoltaico	26
Equação 7 – Fotocorrente gerada pela radiação luminosa	27
Equação 8 – Corrente de saturação reversa do diodo	27
Equação 9 – Potência máxima do painel fotovoltaico	27
Equação 10 – Eficiência em painéis fotovoltaicos	29
Equação 11 – Ângulo de movimento do motor	31
Equação 12 – Cálculo do centro de massa	37
Equação 13 – Torque	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA.....	14
1.1.1	Delimitação do Tema.....	15
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	17
1.4	JUSTIFICATIVAS.....	17
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	MOVIMENTOS DA TERRA.....	19
2.1.1	Fusos horários.....	19
2.2	TRAJETÓRIA SOLAR.....	20
2.2.1	Dia Juliano.....	20
2.2.2	Declinação solar.....	21
2.3	TEMPO DE DURAÇÃO DO DIA.....	22
2.3.1	Horário do nascer do sol.....	22
2.3.2	Horário do pôr do sol.....	22
2.4	TIPOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.4.1	Silício monocristalino.....	23
2.4.2	Silício policristalino.....	24
2.4.3	Células orgânicas.....	24
2.4.4	Filmes finos.....	25
2.4.5	Painel solar híbrido.....	25
2.5	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	26
2.6	EFICIÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	29
3	DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO	30
3.1	BIBLIOTECAS UTILIZADAS.....	30
3.1.1	Tiny GPS.....	30
3.1.2	Custom Stepper.....	30

3.1.3	SD (Secure Digital)	30
3.2	FUNCIONAMENTO	30
3.3	GRAVAÇÃO DE DADOS	32
4	MATERIAIS UTILIZADOS	34
4.1	ESTRUTURA	34
4.2	MOTOR DE PASSO	36
4.2.1	Cálculo do torque	36
4.2.2	Motor 28BYJ-48	39
4.2.3	Driver ULN2003	39
4.2.4	Funcionamento	40
4.3	MICROCONTROLADOR E MÓDULOS	42
4.3.1	Arduino MEGA 2560	42
4.4	PAINEL FOTOVOLTAICO	43
4.5	MODULO GPS NEO-6M	44
4.6	MÓDULO SD	44
4.7	SENSOR DE LUMINOSIDADE LDR	44
4.8	PLANILHA DE CUSTOS	45
4.9	PROTÓTIPO	45
5	TESTES E ENSAIOS	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Todas as atividades humanas em geral precisam de energia para que possam ser realizadas. Desde os primórdios, o homem vem buscando diferentes formas de suprir sua necessidade de energia. O marco dessa necessidade se deu no século XVIII com a invenção da máquina a vapor, que passou a mover desde teares e locomotivas até navios a vapor (GAVINO, 2011).

Entretanto, as mudanças climáticas decorrentes das emissões dos gases de efeito estufa vêm gerando impactos graves e incontestáveis. Assim, a busca por energias renováveis aumenta a cada ano.

De acordo com o relatório síntese do Balanço Energético Nacional (2017), a utilização de energias renováveis no Brasil, em 2016, aumentou para 43,5%, 2,2% a mais comparado aos dados de 2015. Já no contexto mundial, segundo dados de 2014, tem-se a utilização de renováveis como 13,5% do uso total.

Já quando se trata de energia elétrica, de acordo com o BNE 2017, a participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira é de 81,7%.

Nesse contexto, a energia solar toma cada vez mais destaque por ser uma das mais promissoras e uma excelente alternativa para diversificação da matriz energética brasileira. Isso porque, o Brasil é um dos países campeões quando se trata de incidência solar. E ainda, a superfície terrestre recebe anualmente uma quantidade suficiente de energia para suprir as necessidades mundiais milhares de vezes no mesmo período. (VILLALVA; GAZOLI, 2013)

A conversão de energia solar em energia elétrica foi observada pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839. Foram mergulhadas placas de platina e prata em eletrólitos e notou-se que, quando expostas a luz, geravam uma diferença de potencial nas extremidades. Já as células fotovoltaicas destinadas ao ramo industrial, passaram a ser construídas apenas a partir de 1956, após as descobertas da microeletrônica (VALLÊRA; BRITO, 2006; NASCIMENTO, 2004).

O elevado custo de fabricação postergou o desenvolvimento das pesquisas no ramo, mas devido as crises do petróleo em 1973, as placas fotovoltaicas atraíram maior atenção.

As células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, como o silício. Entretanto, o silício, quando cristal puro, não possui elétrons livres e por isso, possui baixa condutividade. Assim, é necessário que o material passe por um processo de dopagem, em que são inseridos porcentagens de outros elementos. Dependendo do material inserido ao silício nesse processo, as cargas livres podem ser positivas ou negativas. Ao serem unidas, essas cargas formam um campo elétrico. Quando a luz incide sobre o painel, os fótons chocam-se com os elétrons, transformando-os em condutores. Por meio de um condutor externo, quando liga-se a camada negativa à positiva, gera-se uma corrente elétrica, cuja intensidade varia na proporção da luz incidente. (NASCIMENTO, 2004)

Os painéis solares têm seu maior aproveitamento quando a luz incide de forma perpendicular sobre a placa. Daí vê-se a necessidade da utilização de um rastreador solar para obtenção da eficiência máxima das células.

1.1.1 Delimitação do Tema

O foco do presente trabalho é a montagem de um protótipo de rastreador solar robótico baseado no uso de Arduino, levando em consideração posição geográfica e buscando total eficiência da placa solar fotovoltaica acoplada.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A eficiência energética dos módulos fotovoltaicos é relacionada a vários critérios como temperatura, intensidade da irradiação solar, o tipo dos módulos solares e o ângulo de inclinação dos painéis em relação a incidência solar. (SOUZA e ARISTONE, 2016)

Devido aos avanços da tecnologia atual, é possível alcançar uma eficiência próxima de 25% com células individuais de cristais de silício em condições padrões de teste. Entretanto, em módulos fotovoltaicos comercializados, a eficiência é de apenas 13 a 19%. Isso devido ao fator de empacotamento, a eficiência ótica do módulo e as perdas nas interconexões das células. (GREEN, 2015)

Na Tabela 1 são apresentados os valores de rendimento médio das células e módulos fotovoltaicos.

Tabela 1 – Rendimento médio das células e módulos fotovoltaicos

Materiais/Tecnologias	Eficiência das células (%)	Eficiência dos módulos (%)
Silício Monocristalino	14 a 25	14 a 21
Silício Policristalino	20	13 a 16,5
Orgânicas	12	7 a 12
Filmes Finos	9 a 16	7 a 13
Silício Amorfo	9	6 a 9
Telureto de Cádmio	14,4	9 a 11
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio	22	10 a 12
Híbrido	-	23

Fonte: (GREEN, 2015)

Nesse contexto, vê-se a possibilidade de um aumento na eficiência dos painéis fotovoltaicos com a utilização de rastreadores solares. Isso porque, quando os raios solares atingem uma superfície de forma perpendicular, sua intensidade luminosa se concentra em uma determinada área, aumentando a potência da incidência solar por metro quadrado e conseqüentemente, aumentando a geração de energia do painel.

Por outro lado, tem-se o alto de custo de implantação, não só das placas como também do rastreador. Por esse motivo, deve ser levado em consideração também a apresentação de uma solução viável.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Construir um protótipo de rastreador solar acoplado a uma placa solar fotovoltaica.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Realizar estudo de posição geográfica definida para construção de rastreador solar;
- b) Realizar estudo teórico para desenvolvimento de *software*;
- c) Desenvolver *software* para controle do protótipo do rastreador solar;
- d) Realizar a construção e automatização de um protótipo de rastreador solar acoplado a uma placa solar fotovoltaica.

1.4 JUSTIFICATIVAS

É evidente a crescente demanda brasileira por energia elétrica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), essa demanda tende a dobrar até 2050. Assim, a busca por fontes de energia renovável não poluente vem aumentando.

A energia proveniente de painéis fotovoltaicos é considerada uma das mais limpas. Além disso, não existem grandes variações em seu rendimento durante o ano (GNOATTO, 2003). Entretanto, essa geração possui baixa eficiência variando de 7 a 23% dependendo do tipo de módulo utilizado, conforme apresentado na Tabela 1.

A partir daí, tem-se a possibilidade de um aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos utilizando-se um rastreador solar.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o estudo das posições geográficas utilizou-se o estudo qualitativo bibliográfico, valendo-se de livros e artigos sobre o tema.

Tendo a base teórica, passou-se para o desenvolvimento do *software* e em seguida, do protótipo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por 6 (seis) partes, com 5 (cinco) capítulos, sendo; -

Parte 1 – Capítulo Introdutório: Capítulo 1

Parte 2 – Fundamentação Teórica: Capítulo 2

Parte 3 – Desenvolvimento da Programação: Capítulo 3

Parte 4 – Materiais utilizados na construção do protótipo: Capítulo 4

Parte 5 – Testes e Ensaios: Capítulo 5

Parte 6 – Resultados, discussões e conclusões: Capítulo 6

Parte 7 – Elementos Complementares: Referências e Anexos.

No capítulo 1, introdutório desse estudo, consta o tema, bem como suas delimitações, a justificativa do presente trabalho, os objetivos, os problemas e premissas e os procedimentos metodológicos.

No capítulo 2, inicia-se a fundamentação teórica destacando-se as equações para posicionamento solar, o estudo da eficiência energética de placas fotovoltaicas e a base teórica utilizada para construção do protótipo.

No capítulo 3, detalha-se o desenvolvimento do *software*.

No capítulo 4, descrevem-se detalhadamente os passos realizados para a construção do rastreador solar automático.

No capítulo 5, constam os testes e ensaios realizados com o protótipo, mostrando seu funcionamento.

No capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos e as conclusões a partir desse estudo.

No capítulo 7, estão presentes os arquivos anexados ao trabalho e as referências utilizadas para a pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOVIMENTOS DA TERRA

Até meados do século XV, havia poucos estudos sobre o sistema solar e acreditava-se na teoria proposta por Ptolomeu: de que o Sol e todos os astros e planetas giravam em torno da Terra – a chamada teoria geocêntrica (FAGUNDES, 2008).

Foi a partir das pesquisas de Nicolau Copérnico e da publicação de sua obra “De Revolutionibus Orbium Coelestium”, após sua morte, que passou-se a conhecer a teoria heliocêntrica. Copérnico propôs o Sol como centro do universo e teve sua teoria aperfeiçoada, posteriormente por Kepler, Tycho e outros cientistas (FAGUNDES, 2008).

A partir disso, as pesquisas sobre os movimentos da Terra e como isso poderia influenciar nos dias, anos e estações foram intensificadas.

O planeta Terra realiza três movimentos periódicos: a rotação, a translação e a precessão. Entretanto, este último tem duração de cerca de 26000 anos e não será considerado para fins desse projeto.

A rotação é o movimento do planeta Terra em torno do seu próprio eixo, inclinado em $23,45^\circ$ e é o responsável pelo nascer e pôr-do-Sol, ou seja, pelos dias e noites. Tem duração de 23 horas e 56 minutos e velocidade com poucas variações durante o ano (COSTA, 2017).

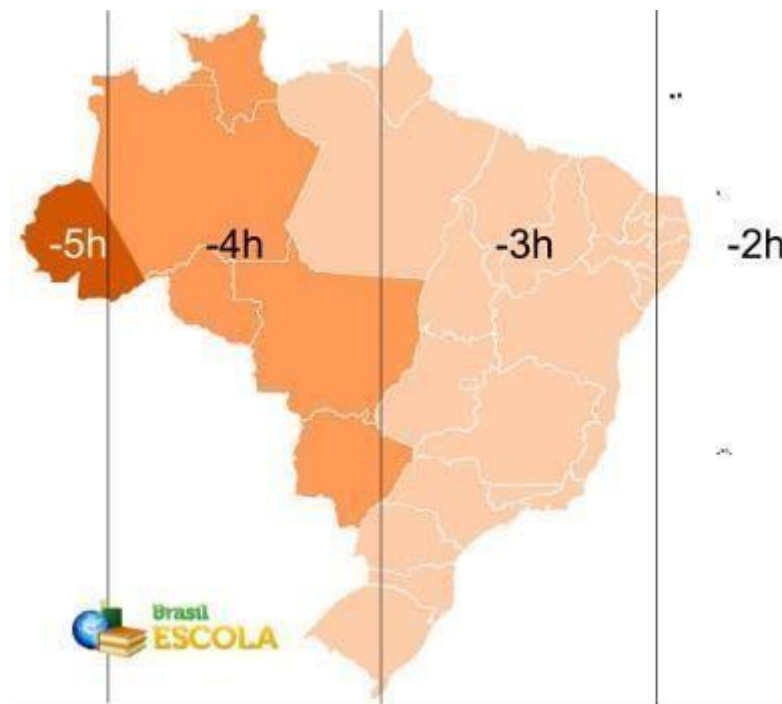
Já a translação é um movimento orbital, segundo uma elipse, em torno do Sol com duração de 365,25 dias. Sua velocidade já não é constante pois nos dois focos em que a Terra está mais próxima do Sol, sua velocidade é maior que nos outros dois focos (COSTA, 2017).

2.1.1 Fusos horários

Considerando que o movimento de rotação terrestre dura 24 horas e completa um giro de 360° , a cada hora tem-se o movimento de 15° . A partir daí, surge o conceito de fusos horários. E conforme o acordo internacional de 1884, todos os fusos são definidos a partir do Meridiano de Greenwich (CAMPOS, 2012).

O território brasileiro localiza-se entre os fusos 2, 3 e 4 de acordo com a Lei Nº 11.662 de 2008 que determina o país com apenas três fusos oficiais, apesar de abranger 4 fusos conforme Figura 1.

Figura 1 – Fusos horários do Brasil



Fonte: (PENA)

2.2 TRAJETÓRIA SOLAR

2.2.1 Dia Juliano

O dia juliano, para o calendário gregoriano, utilizado para o cálculo do dia sequencial do ano, é calculado conforme Equação 1 (WEISSTEIN, 2007).

$$DJ = 367 * A - INT(7 * (A + \frac{INT(\frac{M+9}{12})}{4})) + INT(\frac{275 * M}{9}) + D + 1721013,5 \quad (1)$$

Sendo

DJ o dia juliano

A o ano

M o mês

D o dia

INT a formulação em números inteiros de cada parcela.

2.2.2 Declinação solar

O movimento de translação aliado a inclinação terrestre explicam o fato de o Sol nascer em diferentes pontos do horizonte de acordo com o período do ano. Se escolhido um ponto de observação, anotar-se a cada 9 dias aproximadamente, a posição de nascimento de Sol, observa-se uma figura que pode ser chamada de analema, conforme Figura 2 (BEDAQUE e BRETONES, 2016).

Figura 2 – Analema



Fonte: (CASABELLA, 2015)

Para calcular a declinação solar em determinado dia do ano, tem-se a Equação 2 (NOGUEIRA; SILVA; LÊDO, 2012)

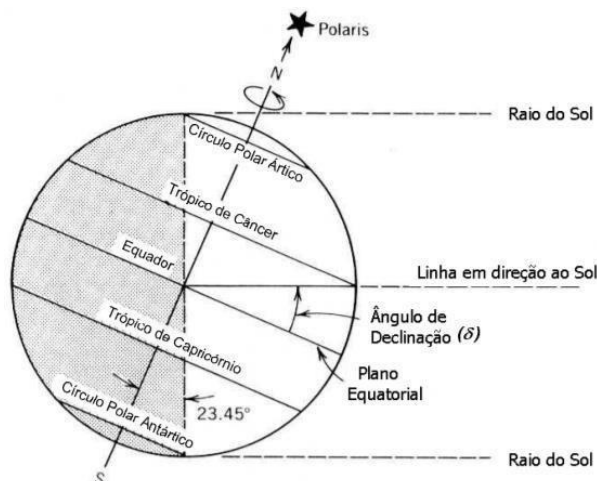
$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2 * \pi * NDA}{365} - 1,39\right) \quad (2)$$

Sendo

NDA o dia sequencial do ano.

Esse ângulo pode variar de $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$ conforme Figura 3.

Figura 3 – Estações do ano de acordo com a declinação solar



Fonte: (GALVANI, 2017)

2.3 TEMPO DE DURAÇÃO DO DIA

Na Equação 3 tem-se o cálculo de duração do dia, que varia conforme a latitude e a declinação solar (BORGES, 2018).

$$T_D = \frac{2}{15} * \arccos(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (3)$$

Sendo

Φ a latitude do local;

δ o ângulo de declinação solar.

2.3.1 Horário do nascer do sol

A partir da Equação 4, o tempo de duração do dia será dividido por 2 e subtraído de 12 horas para obter-se o horário de nascer do sol (Equação 5) (BORGES, 2018).

$$H_N = \frac{T_D}{2} - 12 \quad (4)$$

2.3.2 Horário do pôr do sol

Ao contrário do horário do nascer do sol, para obter-se o horário do pôr do sol, aumenta-se 12 horas em $\frac{1}{2} T_D$ (Equação 5) (BORGES, 2018).

$$H_p = \frac{T_D}{2} + 12 \quad (5)$$

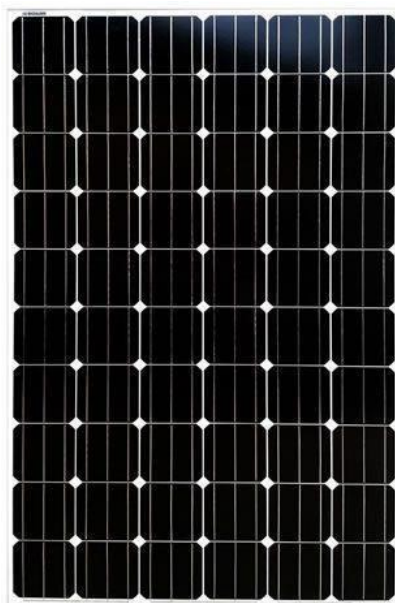
2.4 TIPOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.4.1 Silício monocristalino

As células desses painéis são formadas de finas lâminas de um único cristal de silício puro. A alta pureza confere aos módulos fotovoltaicos construídos a partir dessas células, uma alta eficiência em relação as demais células, variando entre 14 a 22%, mas em paralelo, um alto custo devido a alta quantidade de energia envolvida na sua fabricação (FADIGAS, 2012; GREEN, 2015).

Uma de suas principais vantagens é que, devido ao seu alto rendimento, é necessária uma menor área para geração da mesma quantidade de energia quando comparado a outros painéis. Além disso, possuem uma extensa vida útil e tendem a funcionar melhor em situação de baixa intensidade solar (GAZOLI, VILLALVA e GUERRA, 2012).

Figura 4 – Placas fotovoltaicas com células de silício monocristalino



Fonte: (AQUINO, 2018)

2.4.2 Silício policristalino

O painel policristalino possui um processo de fabricação diferente do painel monocristalino, pois o bloco de silício é fundido em blocos menores, o que mantém sua estrutura com múltiplos cristais. Devido as interfaces entre os vários cristais, a eficiência dos módulos construídos a partir dessas células varia entre 13 a 16,5% - menor se comparada aos módulos com células de silício monocristalino (FADIGAS, 2012; GAZOLI, VILLALVA e GUERRA, 2012; GREEN, 2015).

Possui vida útil levemente inferior ao painel de silício monocristalino, entretanto pode ser considerado vantajoso devido ao menor custo. (GAZOLI, VILLALVA e GUERRA, 2012)

Figura 5 – Placas fotovoltaicas com células de silício policristalino



Fonte: (AQUINO, 2018)

2.4.3 Células orgânicas

Também conhecidas por células orgânicas poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*), baseiam-se na utilização de um semicondutor orgânico responsável pela absorção de luz, geração e transporte de cargas. Essa nova tecnologia tem apresentado eficiência dos módulos de 7 a 12% e custo de fabricação não competitivo (KLEPA, PRAZERES, *et al.*, 2016; GREEN, 2015).

Figura 6 – Placas voltaicas com células orgânicas



Fonte: SUSTENTARQUI (2014)

2.4.4 Filmes finos

Essa tecnologia de células fotovoltaicas difere-se de outras pela espessura das lâminas dos materiais semicondutores utilizados em sua estrutura (OLIVEIRA, 2008).

Apesar de serem de fácil produção, possuem baixo rendimento variando de 7 a 13%. Necessitam ainda de uma grande área para serem instalados (GAZOLI, VILLALVA e GUERRA, 2012).

Existem muitas possibilidades de produção de células de filmes finos, sendo elas: silício amorfo, disseleneto de cobre, índio e gálio. Além de sua baixa eficiência, existem problemas relacionados a vida útil e a disponibilidade desses materiais. (PINHO e GALDINO, 2014)

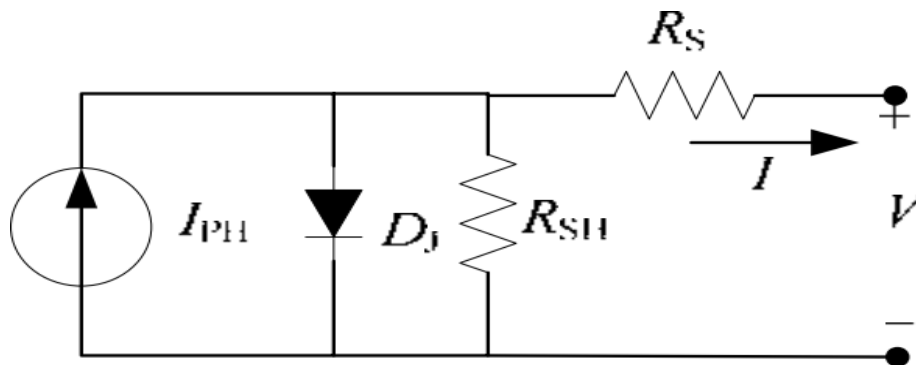
2.4.5 Painel solar híbrido

Painéis criados a partir da tecnologia de heterojunção, possuindo uma construção semelhante ao painel monocristalino. Entretanto, também utiliza a aplicação de silício amorfo. Com isso, tem-se um rendimento aproximado de 23% (GAZOLI, VILLALVA e GUERRA, 2012; GREEN, 2015).

2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um painel fotovoltaico pode ser representado por um circuito elétrico, como o mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Representação de funcionamento do painel fotovoltaico



Fonte: (TSAI, 2008)

A partir do circuito tem-se o valor da corrente de saída, que é dado pela Equação 6 (SALMI, 2012).

$$I = I_{PH} - I_S \left\{ e^{\frac{q(V + R_S I)}{n k T}} - 1 \right\} - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (6)$$

Sendo

I_{PH} é a fotocorrente gerada pela radiação luminosa [A]

I_S é a corrente de saturação [A]

q a carga elétrica do elétron igual a $1,6 \times 10^{-19}$ C

V a tensão de saída do sistema fotovoltaico [V]

R_S a resistência série do sistema fotovoltaico [Ω]

n é o fator de idealidade do diodo é a adimensional

k a constante de Boltzmann's que possui valor igual a $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T a temperatura da célula [K]

R_{SH} a resistência paralela do sistema fotovoltaico [Ω]

A corrente I_{PH} pode ser obtida através da Equação 7.

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I(T_C - 298)] \frac{\lambda}{1000} \quad (7)$$

Sendo

I_{SC} a corrente de curto circuito do painel a uma temperatura de 25°C com uma irradiação solar de 1kW/m² [A]

K_I a temperatura de curto circuito do painel [K]

λ o coeficiente de irradiação solar [W/m²] T_C

é a temperatura de trabalho da célula [K]

A corrente de saturação reversa do diodo em função da temperatura de operação, I_s , de acordo com Salmi et al.(2012), pode ser obtida através da Equação 8.

$$I_s(T_{Di}) = I_s \left(\frac{T_{Di}}{T_{NOM}} \right)^3 \exp \left[\left(\left(\frac{T_{Di}}{T_{NOM}} \right) - 1 \right) \frac{E_g}{V_T} \right] \quad (8)$$

Sendo

T_{NOM} a temperatura nominal do diodo [K]

T_{Di} a temperatura de operação do diodo [K]

E_g a faixa de energia semicondutor [eV]

V_T é a tensão térmica [V]

É possível determinar também a potência máxima do painel através da Equação 9 (SALMI, 2012).

$$P_{MÁX} = V_{OC} * I_{SC} * \gamma \quad (9)$$

Sendo

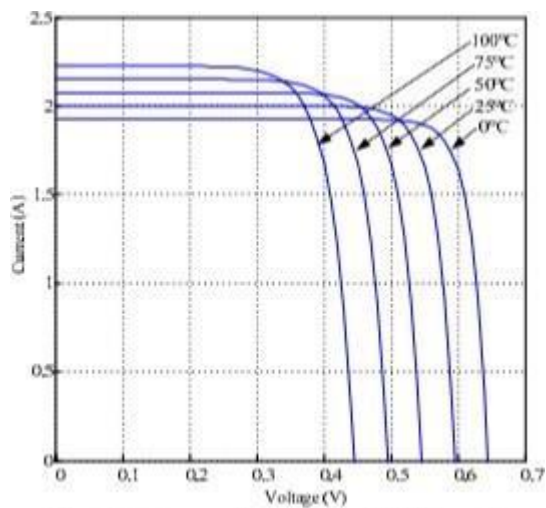
$P_{MÁX}$ a potência do circuito [W]

V_{OC} a tensão de circuito aberto [V]

γ o fator de preenchimento da célula [nm], fator que representa quão próximo de um retângulo ideal está a curva V_{xl} .

A partir dessas equações é possível, determinar as curvas características de um painel fotovoltaico, conforme Figura 8 (SALMI, 2012).

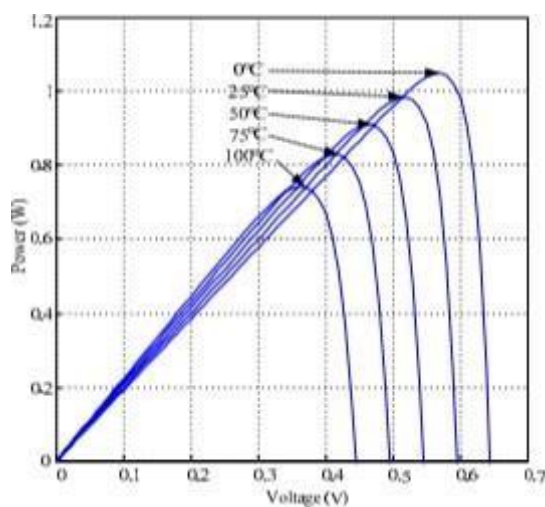
Figura 8 – Gráfico tensão versus corrente



Fonte: (TSAI, 2008)

A partir do gráfico apresentado, tem-se que a temperatura que o painel está trabalhando interfere diretamente no seu rendimento, pois quanto maior a temperatura, menor a tensão e maior a corrente.

Figura 9 – Gráfico potência versus tensão



Fonte: (TSAI, 2008)

É notável que a potência cresce em função da tensão de saída, sendo possível observar que ao atingir certo nível de tensão, a potência cai bruscamente. Também, a temperatura na qual os semicondutores do painel trabalham influencia diretamente a potência gerada, fazendo com que em temperaturas mais altas o painel tenha sua capacidade de geração reduzida.

2.6 EFICIÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A eficiência de um módulo fotovoltaico é dada pela relação entre a potência gerada e a potência de entrada, ou seja, pela irradiação incidente sobre o módulo fotovoltaico, conforme Equação 10 (TREBLE, 1991).

$$\eta = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_c * A} * 100 \quad (10)$$

Sendo

I_{mp} a corrente máxima de pico [A]

V_{mp} a tensão máxima de pico [V]

I_c a irradiância solar [W/m^2]

A a área útil do módulo [m^2]

3 DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO

Para a programação foi utilizado o *software* próprio do Arduino IDE Versão 1.8.7. O ambiente é escrito em Java e possui licença aberta.

3.1 BIBLIOTECAS UTILIZADAS

3.1.1 Tiny GPS

É uma biblioteca desenvolvida pelo engenheiro de software Mikal Hart. Permite a conversão de dados NMEA para variáveis como latitude, longitude, dia, mês, ano, velocidade, entre outras (HART, 2018).

Foi a biblioteca utilizada para aquisição dos dados do módulo GPS e posterior utilização na programação dos motores de passo.

3.1.2 Custom Stepper

Biblioteca elaborada por Igor Campos que permite controlar motores de passo. Permite rotação por ângulo ou quantidade de rotação, a partir da definição de quantos passos o motor executa em uma volta completa.

Foi a biblioteca utilizada para a criação da rotina dos motores.

3.1.3 SD (Secure Digital)

A biblioteca SD permite escrever e ler os dados em cartões SD. Através do cartão SD conectado nas saídas da interface SPI que o Arduino possui, é possível criar arquivos com os dados desejados no cartão SD.

Utilizou-se essa biblioteca para coleta dos dados de tensão gerada pelo circuito do LDR (*Light Dependent Resistor*) e da placa fotovoltaica.

3.2 FUNCIONAMENTO

O módulo GPS recebe os dados de localização e horário e a partir daí calcula o dia juliano, a declinação solar, o tempo de duração do dia, a hora do nascer e por do sol. Então, ativa a rotina dos motores na hora do nascer do sol.

Ao receber o sinal de ativação, o motor inferior desloca-se até o ângulo da declinação solar, posição onde o sol irá nascer, e ativa a primeira rotina do motor superior que se desloca de acordo com a Equação 11 até o ângulo

complementar da declinação solar, ângulo a partir do qual o sol irá realizar o movimento diário.

A Equação 11 resulta no ângulo que o motor deve ser movido, a cada 5 minutos, para que ao completar o dia no tempo de duração calculado, o motor tenha realizado a volta de 180°.

$$a = \left(\frac{180}{T_D * 60} \right) * 5 \quad (11)$$

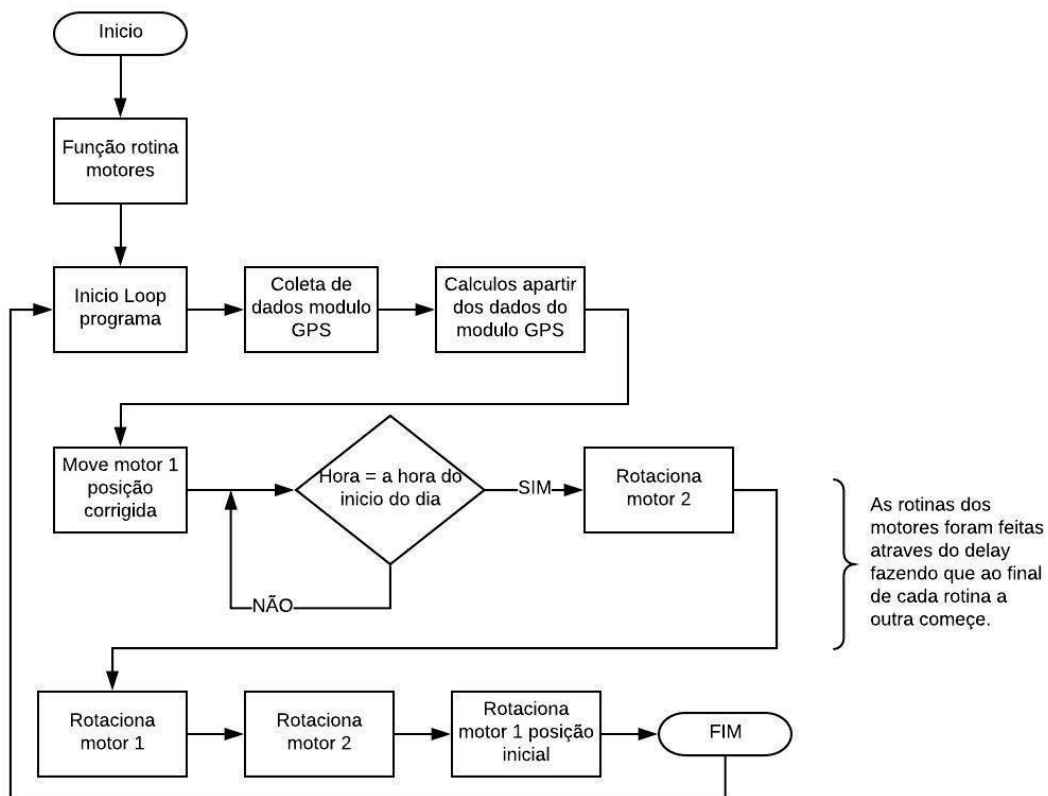
Sendo

T_D o tempo de duração do dia.

Ao alcançar o valor complementar da declinação, o motor 1 é ativado e realiza o movimento de rotação seguindo também a Equação 11 até o valor suplementar da declinação, local onde o sol passará a se por. Assim, é ativado novamente o motor superior que segue a Equação 11 para voltar a sua posição inicial acompanhando o movimento solar.

A programação completa consta no Anexo A. O digrama de blocos referente ao funcionamento encontra-se na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de blocos da programação



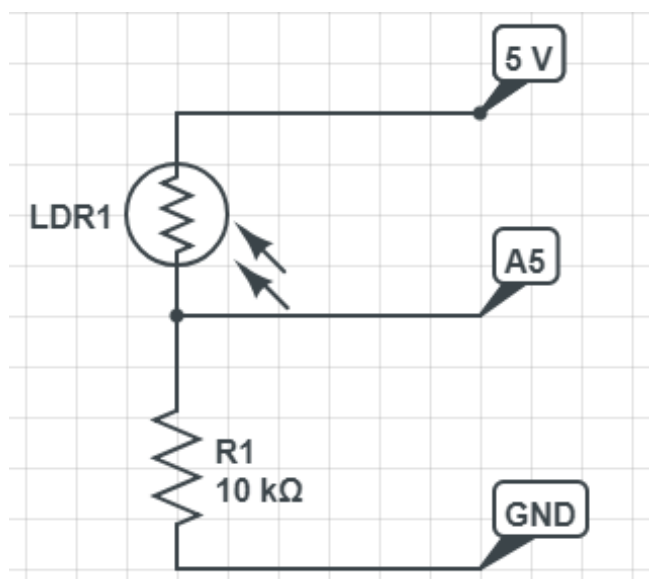
Fonte: Autoria própria, 2018

3.3 GRAVAÇÃO DE DADOS

Os dados foram gravados utilizando o módulo do cartão SD no Arduino UNO.

Para coletar a curva de tensão do circuito ligado ao LDR, utilizou-se um divisor de tensão com o LDR e um resistor de 10kΩ, como apresentado na Figura 11, onde o 5V e GND representam a alimentação fornecida pelo Arduino e A5 uma entrada analógica.

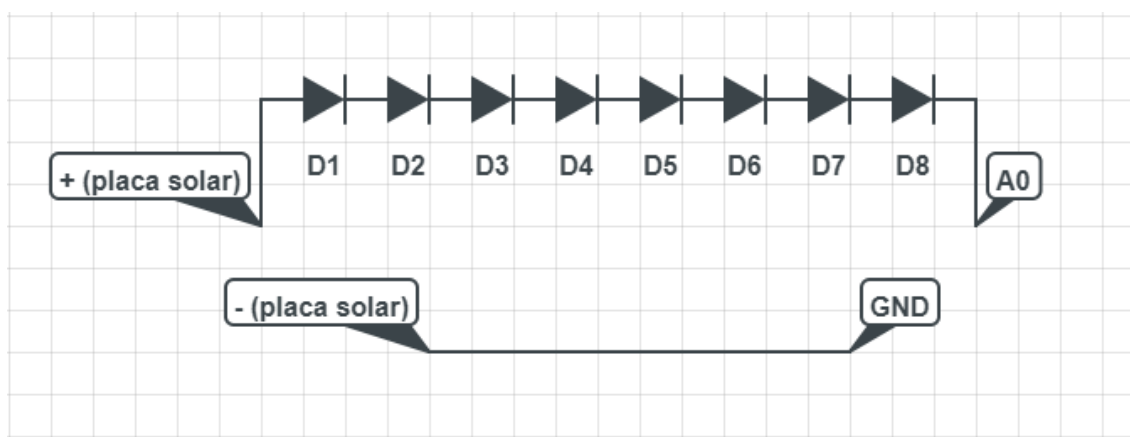
Figura 11 – Circuito LDR



Fonte: Autoria própria, 2018

Já para a coleta de dados do painel fotovoltaico, utilizou-se diodos em série para reduzir a tensão gerada pela placa, já que as entradas e saídas do Arduino suportam até 5V. O circuito utilizado (Figura 12) possui o polo positivo e negativo do painel fotovoltaico representado pelo + e -, respectivamente, uma entrada analógica A0 e GND proveniente do Arduino.

Figura 12 – Circuito da placa fotovoltaica



Fonte: Autoria própria, 2018

A programação consta no Anexo B.

4 MATERIAIS UTILIZADOS

No presente capítulo serão destacadas a relação dos materiais e tecnologias utilizadas para a confecção do protótipo de sistema fotovoltaico com rastreador solar.

4.1 ESTRUTURA

A estrutura do protótipo foi confeccionada por uma empresa terceira, em alumínio. Esse material foi escolhido pela maleabilidade, alta resistência e leveza.

Foi confeccionada uma caixa 25x15x5cm (Figura 13) para a parte inferior do protótipo, onde foram colocados o Arduino MEGA, o módulo GPS, um dos motores, os drives dos motores e o módulo SD. Na base interior da caixa foi colocado um recorte de espuma vinílica acetinada (Figura 14) para fins de isolamento elétrico.

Figura 13 – Estrutura caixa inferior



Fonte: Autoria própria, 2018

Figura 14 – Interior da caixa inferior



Fonte: Autoria própria, 2018

Para a parte superior do protótipo, foi confeccionada uma caixa também em alumínio de dimensões 5x5x5cm (Figura 15), onde foi alocado um dos motores.

Figura 15 – Estrutura da caixa superior



Fonte: Autoria própria, 2018

Para suporte do mini painel fotovoltaico, bem como do fotodiodo, foi confeccionado uma peça em alumínio, com um recorte de espuma vinílica acetinada para isolamento elétrico entre a placa e o alumínio.

4.2 MOTOR DE PASSO

Devido a necessidade de um controle de posicionamento preciso, baixo custo e comunicação com uma placa microcontrolada escolheu-se o motor de passo para utilizar na construção do protótipo de sistema fotovoltaico.

O motor de passo é uma máquina eletromecânica que converte os pulsos elétricos em deslocamento mecânico. É projetado para girar uma quantidade de graus a cada pulso elétrico enviado pela unidade de controle. O movimento dessa máquina se dá pela sequência de pulsos elétricos aplicados nos terminais das bobinas do motor. A sequência dos pulsos tem influência sobre o sentido de giro do motor, a frequência dos pulsos reflete na velocidade e o número de pulsos altera o tamanho do ângulo rotacionado (BRITES e SANTOS, 2008)

4.2.1 Cálculo do torque

4.2.1.1 Motor superior

A carga do motor superior será o mini painel fotovoltaico, bem como seu suporte, o fotodiodo e o tubo de proteção do fotodiodo. As características de cada um dos materiais são apresentadas na Tabela 2, considerando gravidade como $9,807\text{m/s}^2$.

Tabela 2 – Características dos materiais de carga do motor superior

Carga	Material	Dimensões (m)	Massa (kg)
Mini painel solar	Células policristalinas	0,068x0,037	0,010
Suporte painel solar	Alumínio	0,075x0,040	0,012
Fotodiodo	Material semicondutor	0,005x0,005	0,001
Tubo de proteção do fotodiodo	Plástico	Ø0,008x0,030	0,001
		Massa total	0,024
		Peso (N)	0,235

Fonte: Autoria própria, 2018

Os materiais foram posicionados centralizados no eixo em relação a y. As posições do centro de cada material em relação ao eixo do motor superior são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Posição de cada material em relação ao eixo do motor superior

Carga	Posição em x (m)	Posição em y
Mini painel solar	0,034	0,000
Suporte painel solar	0,038	0,000
Fotodiodo	0,078	0,000
Tubo de proteção do fotodiodo	0,078	0,000

Fonte: Autoria própria, 2018

- Centro de massa

A partir da Equação 12, tem-se o cálculo do centro de massa tendo como referência o eixo do motor.

$$X_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n}{\sum_1^n m_n} \quad (12)$$

Sendo

m os dados de massa em kg;

x a distância de acordo com o referencial em m.

De acordo com os dados das Tabela 2 e Tabela 3, tem-se $X_M = 0,040m$.

- Torque

O torque necessário para o motor superior pode ser calculado de acordo com a Equação 13.

$$\tau = P * X_{CM} \quad (13)$$

Sendo P o peso da carga, considerando gravidade como $9,807m/s^2$.

Assim, tem-se o valor do torque como $\tau = 9,33mN.m$.

4.2.1.2 Motor inferior

A carga do motor inferior será toda a carga já considerada do motor superior, bem como o motor em si e a caixa que protege o motor superior. As características de cada um dos materiais são apresentadas na Tabela 4, considerando gravidade como $9,807\text{m/s}^2$.

Tabela 4 – Características dos materiais de carga do motor superior

Carga	Material	Dimensões (m)	Massa (kg)
Mini painel solar	Células policristalinas	0,068x0,037	0,010
Suporte painel solar	Alumínio	0,075x0,040	0,012
Fotodiodo	Material semicondutor	0,005x0,005	0,001
Tubo de proteção do fotodiodo	Plástico	Ø0,008x0,030	0,001
Motor superior	-	Ø0,028x0,019	0,032
Caixa de proteção do motor superior	Alumínio	0,050x0,050	0,040
		Massa total	0,096
		Peso (N)	0,941

Fonte: Autoria própria, 2018

Os materiais foram posicionados centralizados no eixo em relação a y. As posições do centro de cada material em relação ao eixo do motor superior são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Posição de cada material em relação ao eixo do motor superior

Carga	Posição em x (m)	Posição em y
Mini painel solar	0,059	0,000
Suporte painel solar	0,063	0,000
Fotodiodo	0,103	0,000
Tubo de proteção do fotodiodo	0,103	0,000
Motor superior	0,006	0,000
Caixa de proteção do motor superior	0,000	0,000

Fonte: Autoria própria, 2018

- Centro de massa

A partir da Equação 14, tem-se o cálculo do centro de massa tendo como referência o eixo do motor.

De acordo com os dados das Tabela 4 e Tabela 5, tem-se $X_M=0,018m$.

- Torque

O torque necessário para o motor superior pode ser calculado de acordo com a Equação 15.

Assim, tem-se o valor do torque como $\tau = 17mN.m$.

4.2.2 Motor 28BYJ-48

A partir do valor de torque calculado, o motor de passo escolhido para a parte inferior e superior do protótipo, foi o motor 28BYJ-48 (Figura 16), por ser o motor de passo de valor comercial mais próximo ao necessário. Além de ser compatível com o Arduino MEGA, esse motor possui 4 fases, um ângulo de passo de $0,088^\circ$ e um torque de $34,3mN.m$.

Figura 16 – Motor de passo 28BYJ-48

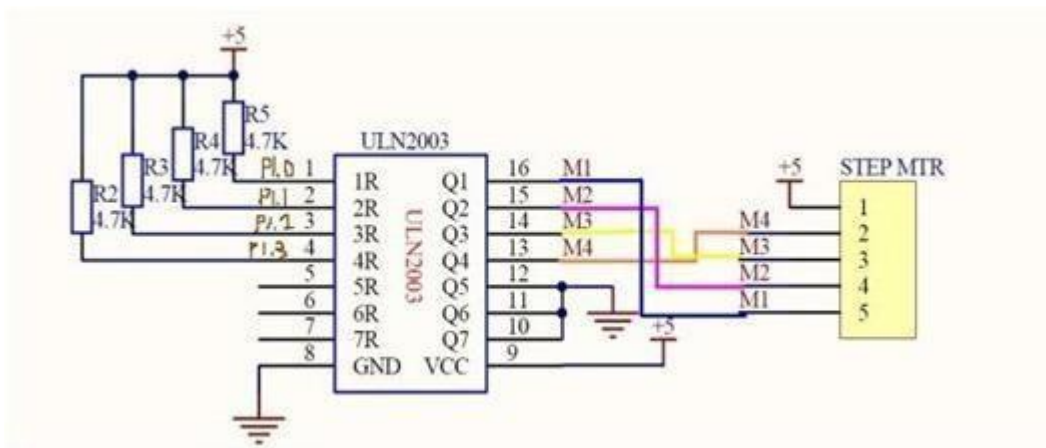


Fonte: Datasheet 28BYJ-48

4.2.3 Driver ULN2003

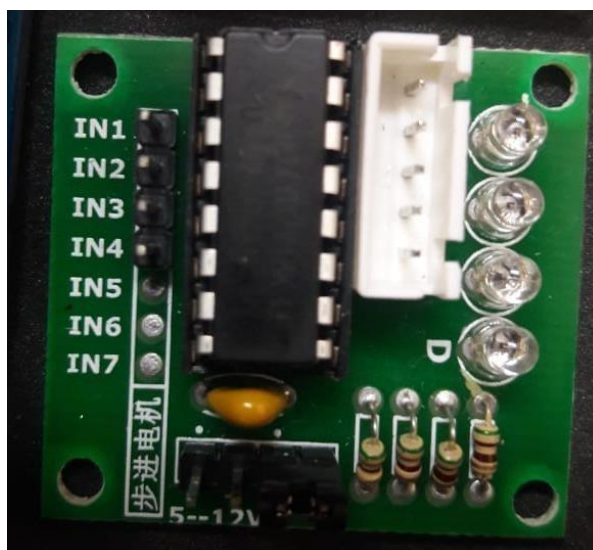
O controle do motor será realizado através do módulo controlador que possui CI (circuito integrado) ULN2003 (Figura 18). Esse componente permite o controle de motores que precisam de uma corrente maior do que a corrente fornecida pelas portas do Arduino. Na Figura 17 tem-se o diagrama elétrico do drive.

Figura 17 – Esquema elétrico do driver ULN2003



Fonte: (BAÚ DA ELETRÔNICA COMPONENTES ELETRÔNICOS)

Figura 18 – Hardware do drive ULN2003



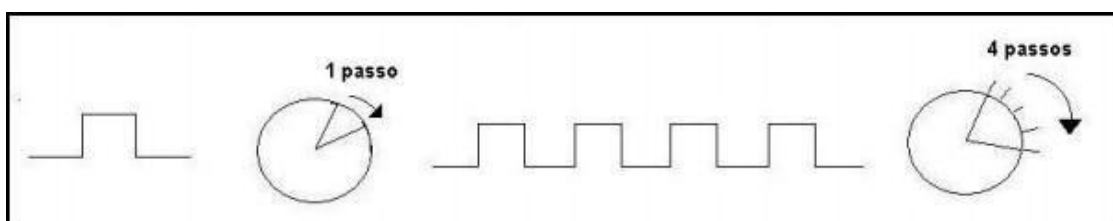
Fonte: Autoria própria, 2018

4.2.4 Funcionamento

O funcionamento básico de um motor de passo se dá pela utilização de bobinas alinhadas duas a duas. Quando se energizam as bobinas, o rotor se alinha com a direção do campo magnético criado pelas bobinas energizadas, havendo um deslocamento do rotor. Esse deslocamento é uma variação angular chamada passo. A velocidade e a direção são determinadas pela forma de como as bobinas são acionadas. O envio desses pulsos elétricos se dá por uma unidade de controle externa (BRITES e SANTOS, 2008).

O passo é o deslocamento angular mínimo que o rotor pode dar em determinada configuração de energização das bobinas. Na Figura 19 pode-se ver um esquema de pulsos do motor de passo, primeiramente tem-se somente um pulso, o que gera o deslocamento de um passo, e logo após temos um trem de pulsos, que gera quatro passos seguidos tendo um maior deslocamento (FERREIRA, 2008)

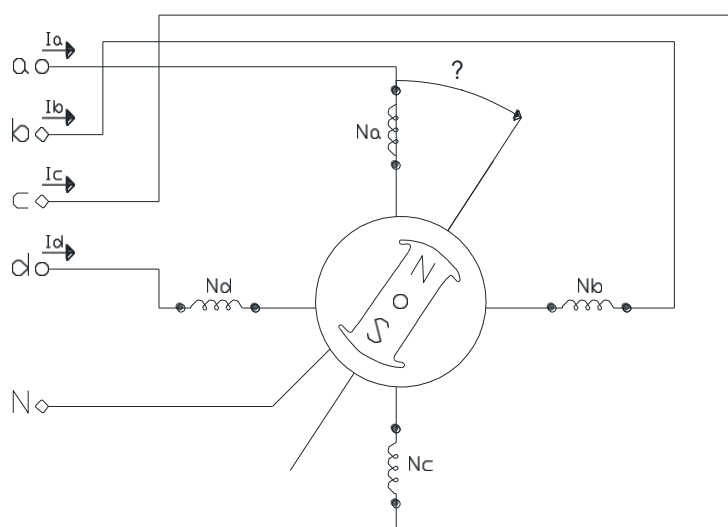
Figura 19 – Esquema de pulso do motor de passo



Fonte: (FERREIRA, 2008)

Na Figura 20, tem-se o diagrama de um motor de passo de dois polos. Existem diversas maneiras de energizar as bobinas a, b, c e d, e cada uma dessas maneiras o rotor irá girar um determinado grau. Por exemplo, quando energiza-se somente a bobina Na, a corrente i_a irá induzir um campo magnético horizontal indo da direção de Nd para Nb da figura, e assim o rotor irá se alinhar a esse campo, e o eletroímã irá se posicionar no ângulo 0° (FERREIRA, 2008).

Figura 20 – Esquema de um motor de passo de dois polos (Adaptada)



Fonte: (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1975)

4.3 MICROCONTROLADOR E MÓDULOS

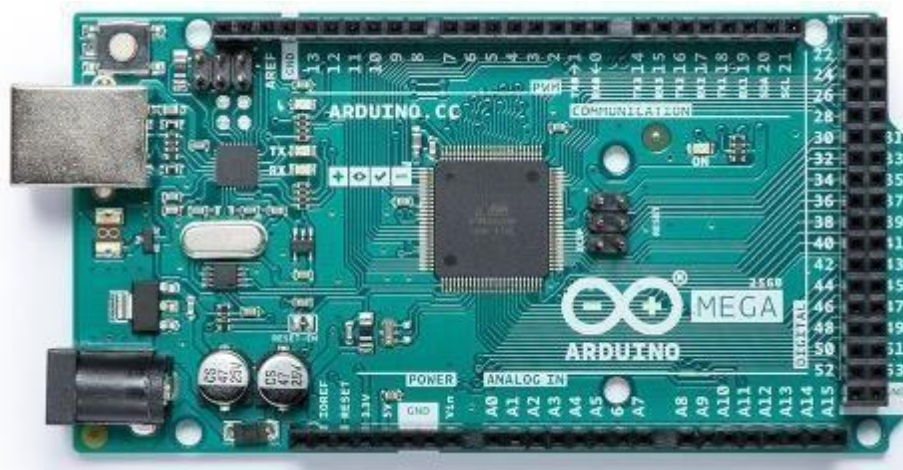
O Arduino é uma placa eletrônica que contém um microcontrolador capaz de receber sinais de entrada, controlar saídas e interagir com o ambiente. Tanto o *software* como *hardware* são plataformas *open source*. Além da placa principal, o Arduino possui uma enorme gama de extensões que podem ser facilmente conectadas a ele. Essas extensões são pequenas placas que são chamadas de módulos ou *Shields* e podem acrescentar ao Arduino funções como: bluetooth, GPS, wireless, câmera entre muitos outros (FERRONI, VIEIRA, *et al.*, 2014).

4.3.1 Arduino MEGA 2560

Para o presente projeto foram utilizados o Arduino Mega 2560 e o Arduino UNO, pela necessidade de diversas entradas.

O Arduino Mega 2560 (Figura 21) é uma atualização do Arduino Mega e possui 54 I/O digitais (sendo 15 possíveis de serem usadas como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 portas seriais, cristais osciladores de 16MHz, uma conexão USB, um *power jack*, pinos de ICSP e um botão de reset.

Figura 21 – Arduino MEGA 2560



Fonte: ARDUINO

Já o Arduino UNO (Figura 22) possui apenas 14 I/O digitais e 6 entradas analógicas. O restante é semelhante ao Arduino MEGA.

Figura 22 – Arduino UNO

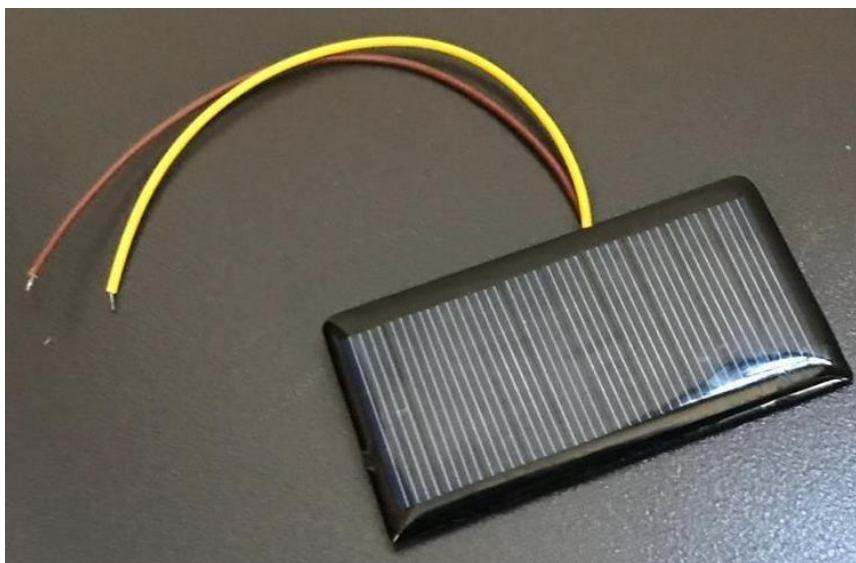


Fonte: ARDUINO

4.4 PAINEL FOTOVOLTAICO

O painel escolhido para a realização dos testes foi um painel policristalino de pequenas dimensões, devido a seu baixo custo e leveza. O painel escolhido possui 68 mm de comprimento e 37 mm de largura, sua tensão de trabalho é aproximadamente 5V, a potência de saída é de 0,3W e sua corrente varia de 0 a 60 mA. Na Figura 23 tem-se o mini painel utilizado.

Figura 23 – Mini painel fotovoltaico



Fonte: Autoria própria, 2018

4.5 MÓDULO GPS NEO-6M

O módulo GPS NEO-6M (Figura 24) é compatível com o Arduino e sua função é informar a localização exata (latitude e longitude) de onde o módulo está instalado, bem como a data, horário e velocidade de deslocamento caso haja. Os dados do satélite são captados através da antena do módulo e enviados ao Arduino.

Figura 24 – Módulo GPS e antena

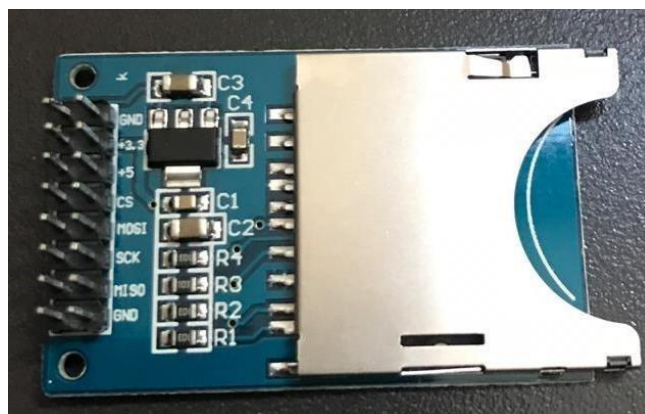


Fonte: (INOBOT)

4.6 MÓDULO SD

Foi conectado um módulo SD (Figura 25) com cartão para aquisição dos dados do Arduino e posterior comparação com os dados obtidos pelo fotodiodo.

Figura 25 – Módulo SD



Fonte: Autoria própria, 2018

4.7 SENSOR DE LUMINOSIDADE LDR

O Sensor de Luminosidade LDR (Light Dependent Resistor) foi adicionado ao projeto com um tubo escuro com a mesma inclinação do painel fotovoltaico,

para verificar o funcionamento correto do rastreador. Assim, se o mini painel estiver na direção correta perpendicular ao sol, o fotodiodo receberá luz e atuará com menor resistência, possibilitando a análise da corrente.

4.8 PLANILHA DE CUSTOS

Na Tabela 6 tem-se a planilha de gastos para montagem do protótipo.

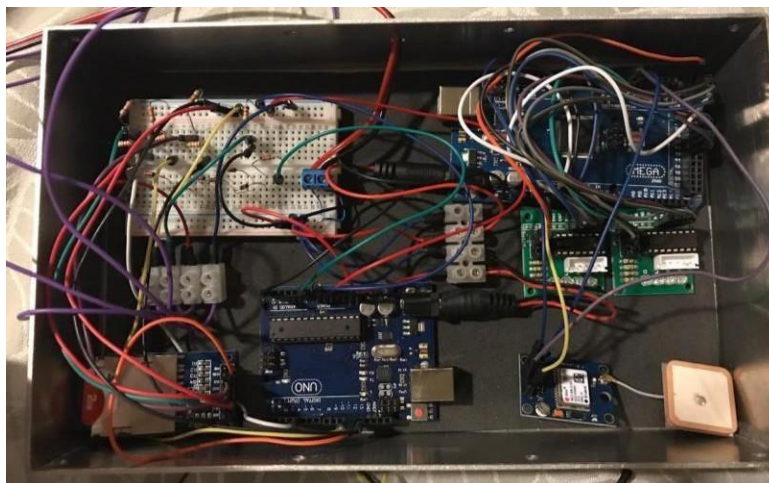
Tabela 6 – Planilha de custos

Componente	Quantidade	Unitário	Total
Arduino MEGA	1	R\$ 99,90	R\$ 99,90
Arduino UNO	1	R\$ 68,00	R\$ 68,00
Bateria	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Estrutura	1	R\$ -	R\$ -
Mini painel solar	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Módulo GPS NEO 6m	1	R\$ 79,90	R\$ 79,90
Módulo SD	1	R\$ 8,90	R\$ 8,90
Motor de Passo 28BYJ-48 + drive ULN 2003	2	R\$ 19,90	R\$ 39,80
Outros gastos	-	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Protoboard	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
		TOTAL	R\$ 448,50

4.9 PROTÓTIPO

Na Figura 26 tem-se uma foto do interior do protótipo.

Figura 26 – Interior do protótipo



Fonte: Autoria própria, 2018

5 TESTES E ENSAIOS

A instalação do protótipo para obtenção dos dados ocorreu no dia 12 de novembro de 2018 na cidade de Campo Largo. Foram realizadas fotos do movimento a cada 30 minutos.

Figura 27 – Posição do protótipo as 06:23



Fonte: Autoria própria, 2018

A coleta dos dados de tensão para obtenção das curvas ocorreu via programação no Arduino com cartão SD.

Algumas das posições do protótipo durante o dia são apresentadas nas figuras 27 a 30.

Figura 28 – Posição do protótipo as 10:23



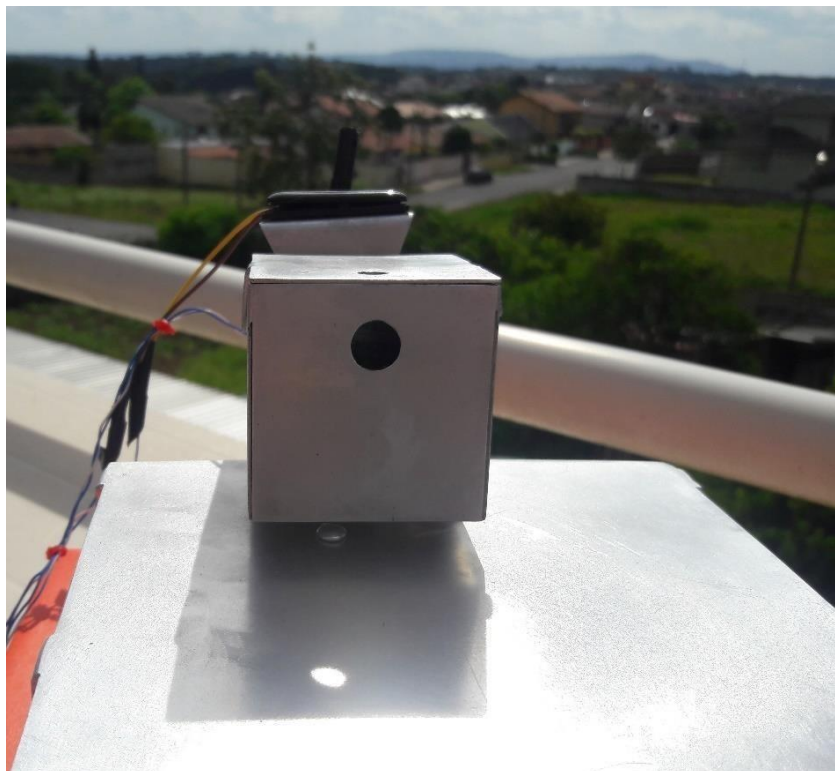
Fonte: Autoria própria, 2018

Figura 29 – Posição do protótipo as 12:53



Fonte: Autoria própria, 2018

Figura 30 – Posição do protótipo as 16:30



Fonte: Autoria própria, 2018

Figura 31 – Posição do protótipo as 19:30



Fonte: Autoria própria, 2018

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 32 apresenta os valores obtidos de tensão por tempo. Foram coletados dados de tensão a cada 12 segundos. A curva em vermelho refere-se a tensão de saída do circuito do LDR e a curva azul refere-se a tensão gerada no circuito do painel fotovoltaico.

A variação de resistência do LDR dá-se pelo recebimento de luminosidade. Então, como o LDR estava envolto por um tubo preto, a variação de tensão no circuito indica que o elemento estava perfeitamente inclinado ao sol, recebendo assim alta luminosidade.

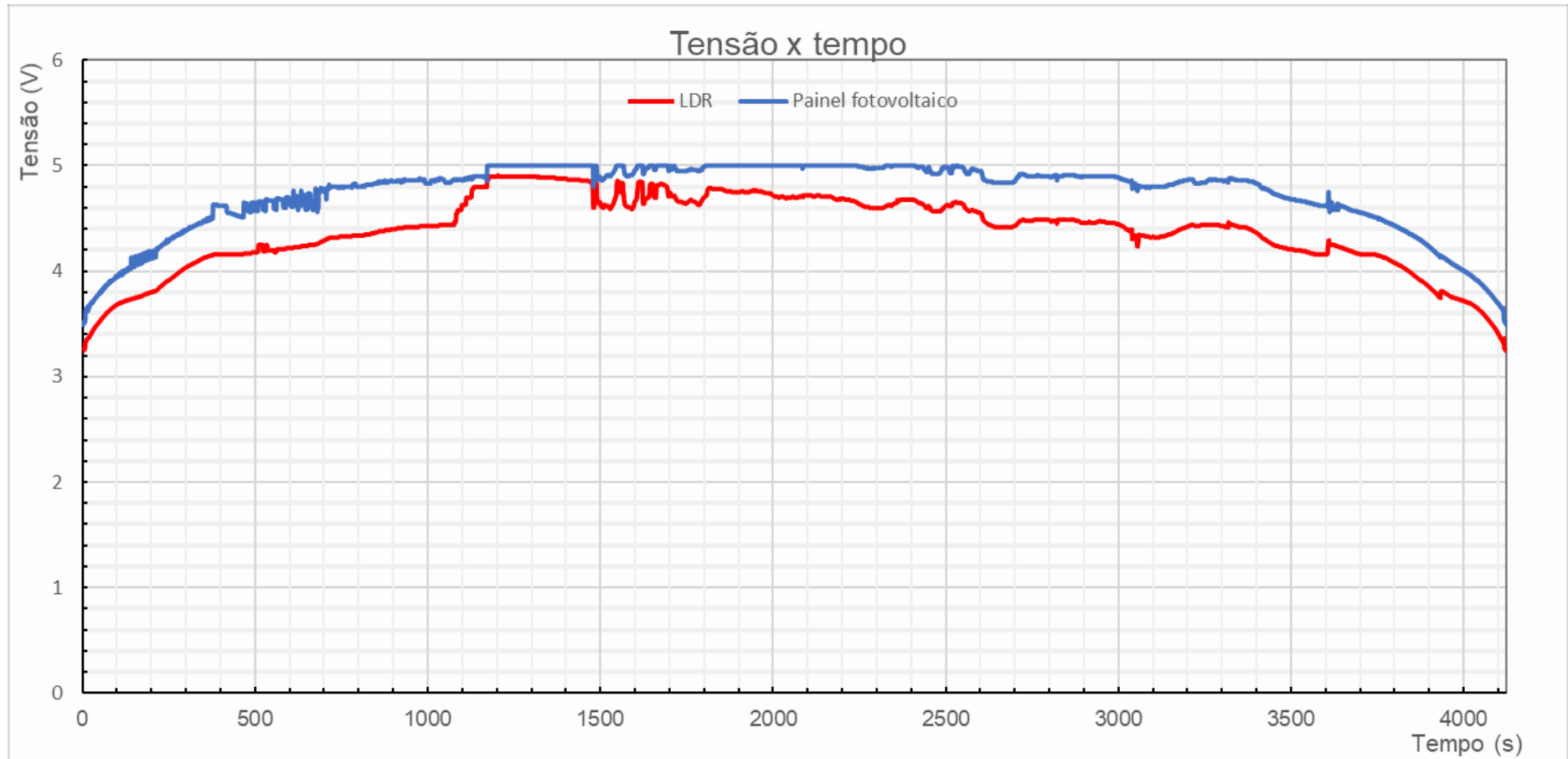
A curva de tensão de ambos os circuitos analisados possui variação devido a presença de nuvens e áreas de sombra. Entretanto, ambas possuem configuração semelhante atestando que o painel solar estava recebendo luminosidade de forma perpendicular durante a maior parcela do dia, tendo assim alta eficiência.

A curva de tensão do painel fotovoltaico atinge, em alguns momentos, a tensão máxima (5V), isso porque o painel é pequeno e a radiação foi muito alta no dia da medição.

Em contrapartida, alguns detalhes tornam o protótipo ineficiente. Houve a necessidade de utilização de dois Arduinos: um para controle dos motores e recebimento dos dados GPS e outro para coleta de dados no cartão SD, pois não haviam entradas suficientes disponíveis em um único Arduino. Além disso, o peso do painel solar inclinou levemente a estrutura.

Também, a geração do painel, em si, não seria suficiente para alimentar ambos os Arduinos.

Figura 32 – Gráfico tensão x tempo



CONCLUSÃO

O protótipo construído utilizou diversos dos conhecimentos obtidos durante o curso de engenharia, seja Elétrica ou Controle e Automação. Desde resistência dos materiais a programação em Java.

O objetivo principal do presente estudo foi desenvolver um protótipo de rastreador solar acoplado a uma placa solar fotovoltaica. Tal objetivo foi alcançado, tendo seu perfeito funcionamento atestado pelo dispositivo LDR. A curva de tensão do circuito acoplado ao LDR teve resultado muito semelhante a curva de tensão de geração obtida do circuito ligado ao mini painel fotovoltaico.

As variações nas curvas de tensão resultantes podem ser explicadas pelo fato de o painel fotovoltaico ser influenciado pela radiação solar e o dispositivo LDR ter sua resistência reduzida quando é exposto a qualquer luminosidade.

Foram usadas duas fórmulas em relação ao posicionamento solar: a declinação solar e o tempo de duração do dia. Levando em consideração que o trajeto do Sol é de 180° durante o tempo de duração total do dia.

O protótipo atingiu seu objetivo principal apesar de possuir alguns problemas relacionados a construção como: o uso de durepox para determinadas emendas, o que atrapalhou na exatidão, além do alto custo envolvido na construção.

Assim, conclui-se a inviabilidade do protótipo dentro da microeletrônica.

REFERÊNCIAS

AQUINO, E. Energia Solar. **Eduardo Aquino**, 2018. Disponível em: <<http://www.eduardoaquino.com.br/energia-solar/>>. Acesso em: 30 Julho 2018.

ARDUINO. Arduino Uno Rev3. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>>.

BAÚ DA ELETRÔNICA COMPONENTES ELETRÔNICOS. Driver para Motor de Passo ULN2003. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/driver-para-motor-de-passo-uln2003.html>>. Acesso em: 28 Maio 2018.

BEDAQUE, P.; BRETONES, P. S. Variação da posição de nascimento do Sol em função da latitude. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v. 38, n. 3, 3 Junho 2016. ISSN 1806-9126. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000300406>. Acesso em: 6 Maio 2018.

BORGES, Roberto Cabral de Mello. **Cálculo do Nascer e Pôr do Sol**. Disponível em: <https://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Nascer_Por_Sol.html>. Acesso em: 02 nov. 2018.

BRITES, F. G.; SANTOS, V. P. D. A. Motor de passo. **Universidade Federal Fluminense**, 2008. 15.

CAMPOS, A. C. Fusos Horários: conceitos e determinações. **Notas de Aula UFS**, Aracaju, 2012. 13. Disponível em: <http://www.cesadufs.com.br/ORBI/public/uploadCatalogo/11204204042012Cartografia_Basica_Aula_14.pdf>. Acesso em: 24 Maio 2018.

CAMPOS, Igor. **CustomStepper**. Disponível em: <https://playground.arduino.cc/Main/CustomStepper?fbclid=IwAR0zO4HcotGsT_Uf-vxlywcYlu5SSR4jxr7pA6HyL8Ox4455yxGwUpo80Pc>. Acesso em: 02 nov. 2018.

CASABELLA, N. Analema: ¿Qué es? ¿Cómo fotografiarlo? **El tiempo**, Colombia, 4 Outubro 2015. Disponível em: <<https://noticias.eltiempo.es/analema-que-es-como-fotografiarlo/>>. Acesso em: 6 Maio 2018.

COSTA, J. R. D. V. Os movimentos da Terra. **Nossa Ciência**, 29 Dezembro 2017. Disponível em: <<http://nossaciencia.com.br/colunas/os-movimentos-da-terra/>>. Acesso em: 05 Maio 2018.

Energia Solar no Brasil e no Mundo. Ministério de Minas e Energia. [S.l.]. 2017.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico-Econômica**. USP. São Paulo, p. 71. 2012.

FAGUNDES, H. V. **As teorias do sistema solar, de Ptolomeu a Einstein**. São Paulo, p. 4. 2008.

FARNELL. Datasheet Arduino UNO. Disponível em:
<<https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

FERREIRA, P. V. A. Automação de um sistema de medidas de força de levitação magnética., 2008. 58.

FERRONI, E. H. et al. A plataforma arduino e suas aplicações, 2014. 16.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; KUSKO, A. **Máquinas Elétrica**. 3ª. ed. [S.l.]: McGraw, 1975.

GALVANI, E. Relações Astronômicas Terra - Sol. **Slides de Aula USP Departamento de Geografia**, 2017. Disponível em:
<http://www.geografia.ffe.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/flg0253/2014/aula3/Radiacao_solar_estacoes_do_ano.pdf>. Acesso em: 17 Março 2018.

GAVINO, N. A. **Energia Eólica: uma análise dos incentivos à produção (2002 - 2009)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 115. 2011.

GAZOLI, J. R.; VILLALVA, M. G.; GUERRA, J. Energia solar fotovoltaica – Introdução. In:_____ **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações – sistemas isolados e conectados à rede**. [S.l.]: Érica, 2012. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/261175798_Energia_Solar_Fotovoltaica_-_Introducao>. Acesso em: 27 Maio 2018.

GNOATTO, E. **Desempenho de painel fotovoltaico para geração de energia elétrica na região de Cascavel**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, p. 58. 2003.

GREEN, M. **Solar cell efficiency tables (version 45)**. 1. ed. Amsterdã: [s.n.], v. 23, 2015.

HART, Mikal. **TinyGPS**. 2018. Disponível em:
<<http://arduiniiana.org/libraries/tinygps/>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

INOBOT. Módulo GPS NEO-6M com antena. Disponível em: <<http://www.inobot.com.br/pd-2097e7-modulo-gps-neo-6m-com-antena.html>>. Acesso em: 28 Maio 2018.

KLEPA, R. B. et al. Comparação entre os módulos de células fotovoltaicas classificados pelas normas brasileiras. **XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, João Pessoa, 03 a 06 Outubro 2016. 13. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WPG_236_374_30087.pdf>. Acesso em: 30 Julho 2018.

MERCADO LIVRE. Mini Painel Solar 6v 1w 200ma 110x60mm. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1016079206-mini-painel-solar-6v-1w-200ma-110x60mm-_JM>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro, p. 61. 2017.

NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2004.

NOGUEIRA, Dijauma Honório; SILVA, Mairton Gomes da; LÊDO, Éder Ramon Feitoza. Estimativa da Radiação Solar Global através da amplitude térmica diária. **Inovagri International Meeting**, Fortaleza, maio 2012. Disponível em: <<http://www.inovagri.org.br/meeting2012/wp-content/uploads/2012/06/Protocolo138.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia Fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 56. 2008.

PENA, R. F. A. Fusos horários no Brasil. **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/fuso-horario-brasileiro.htm>>. Acesso em: 24 Maio 2018.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 01 Agosto 2018.

REDAÇÃO SUSTENTARQUI. Brasil "come" etapas e produz células orgânicas. **SustentArqui**, 2014. Disponível em: <<https://sustentarqui.com.br/sem-categoria/brasil-come-etapas-e-produz-celulas-solares-organicas/>>. Acesso em: 01 Agosto 2018.

SALMI, T. **MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell**. [S.l.]. 2012.

SANTOS, V. D. P. A. Motor de Passo. **Notas de Aula UNESP**, São Paulo, 2013. 43. Disponível em:
<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2018.

SOUZA, A. D.; ARISTONE, F. Estudo da Eficiência Energética de Células Fotovoltaicas em Função da Radiação Solar no Centro-Oeste Brasileiro. **Interespaço - Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, Grajaú, Setembro 2016. 115-128. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/318811271_ESTUDO_DA_EFICIENCIA_ENERGETICA_DE_CELULAS_FOTOVOLTAICAS_EM_FUNCAO_DA_RADIACAO_SOLAR_NO_CENTRO-OESTE_BRASILEIRO>. Acesso em: 16 Julho 2018.

TREBLE, F. C.. **Generating Electricity from the Sun**. Farnborough: Pergamon, 1991.

TSAI, H.-L. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. **IAENG Online Journals**, 22-24 out. 2008.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século de História Fotovoltaica. In: VARANDAS, C. **Gazeta de Física**. [S.l.]: [s.n.], v. 29, 2006. p. 92. Disponível em: <<https://www.spf.pt/magazines/GFIS/76/pdf>>. Acesso em: 26 Maio 2018.

WEISSTEIN, Eric W. **Julian Date**. 2007. Disponível em:
<<http://scienceworld.wolfram.com/astronomy/JulianDate.html>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

ANEXO A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO

```
#include <SoftwareSerial.h> //Biblioteca referente ao motor serial
#include <TinyGPS.h> //Biblioteca referente ao módulo GPS
#include <CustomStepper.h> //Biblioteca referente aos motores de passo

TinyGPS gps1;
CustomStepper stepper1(22, 24, 26, 28); //Declaração dos pinos dos motores
CustomStepper stepper2(36, 38, 40, 42);

void setup() {
  Serial1.begin(9600); //Recebimento de dados módulo GPS
  Serial.begin(9600); //Recebimento de dados monitor serial
  stepper1.setRPM(12); //Velocidade do motor 1 em RPM
  stepper1.setSPR(4096); //Número de passos a serem dados em 1 volta
  completa
  stepper2.setRPM(12); //Velocidade do motor 2 em RPM
  stepper2.setSPR(4096); //Número de passos a serem dados em 1 volta
  completa
}

//Auxiliares para funcionamento do motor

int done1=false, done2=false, done3=false, done4=false, done5=false;
int aux=false;
float angulo=0, angulo2=0, angulo3=0;

//Angulo de giro dos motores
float a;

//Variáveis respostas do GPS
long latitude, longitude;
long idadeInfo;
int ano;
byte mes, dia, hora, minuto, segundo, centesimo;
```

```

//Variáveis de cálculo
long DJ; //Dia juliano
int aux1, aux2, aux3; // auxiliares para calculo do dia juliano
long DJant;
int anoant=ano-1;
int aux4;
int NDA; //Numero de dias do ano
float DS; //Declinação solar
float DSC; // Declinação solar corrigida
float aux5, aux6; //Auxiliares para calculo da declinação solar
float TD, HN, MN, HP, MP; // Tempo de duração do dia, horário de nascer e por
do sol
float tg_lat, tg_decli, aux7, aux8;

void motor1 () //Motor inferior girando até o angulo de declinação solar
{
  if (stepper1.isDone() && done1==false){
    stepper1.setDirection(CW);
    stepper1.rotateDegrees(DSC);
    done1=true;
  }
}

void motor2 () //Motor superior girando com angulo a de 5 em 5 minutos
{
  if (stepper2.isDone() && done2==false){
    stepper2.setDirection(CW);
    stepper2.rotateDegrees(a);
    done2=true;
  }
}

void motor12 () //Motor inferior girando com angulo a de 5 em 5 minutos

```

```
{  
  if (stepper1.isDone() && done3==false){  
    stepper1.setDirection(CW);  
    stepper1.rotateDegrees(a);  
    done3=true;  
  
  }  
}
```

```
void motor21 () //Motor superior girando com angulo a de 5 em 5 minutos
```

```
{  
  if (done4==false){  
    stepper2.setDirection(CW);  
    stepper2.rotateDegrees(a);  
    done4=true;  
  }  
}
```

```
void motorfinal () //Motor inferior voltando a posição inicial
```

```
{  
  if(done5==false){  
    stepper1.setDirection(CW);  
    stepper1.rotateDegrees(180+DSC);  
    done5=true;  
  }  
}
```

```
void loop() {
```

```
  //Leitura de dados GPS
```

```
  bool recebido = false;
```

```
  while (Serial1.available()) {
```

```
char cIn = Serial1.read();
recebido = gps1.encode(cIn);
}

if (recebido) {
Serial.println("-----");

//Latitude e Longitude

gps1.get_position(&latitude, &longitude, &idadeInfo);

if (latitude != TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE) {
  Serial.print("Latitude: ");
  Serial.println(float(latitude) / 100000, 6);
}

if (longitude != TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE) {
  Serial.print("Longitude: ");
  Serial.println(float(longitude) / 100000, 6);
}

//Dia e Hora

gps1.crack_datetime(&ano, &mes, &dia, &hora, &minuto, &segundo,
&centesimo);

Serial.print("Data (GMT): ");
Serial.print(dia);
Serial.print("/");
Serial.print(mes);
Serial.print("/");
Serial.println(ano);

Serial.print("Horario (GMT): ");
```

```
Serial.print(hora-3);
Serial.print(":");
Serial.print(minuto);
Serial.print(":");
Serial.print(segundo);
Serial.print(":");
Serial.println(centesimo);

//Cálculo do dia Juliano

//Cálculo do dia desejado

aux1=((mes+9)/12);
aux2=(7*(ano+aux1))/4;
aux3=(275*mes)/9;

DJ=(367.0*ano)-aux2+aux3+dia+1721013.5;

//Cálculo do último dia do ano anterior

aux4=(7*(anoant+1))/4;

DJant=(367.0*anoant)-aux4+366+31+1721013.5;

//Cálculo do dia sequencial do ano

NDA=DJ-DJant;

//Cálculo da declinação solar

aux5 = (((2.0*3.1412)/365.0)*NDA)-1.39;
aux6 = sin(aux5);
DS = (180/3.1412)*aux6*0.409;
String sDS = String(DS,4);
```

```

//Cálculo da declinação solar corrigida

if (latitude > 0) {
  DSC = ((latitude)/100000) - DS;
  String sDSC = String(DSC,4);
}
if (latitude < 0) {

  DSC = -((latitude)/100000) + DS;
  String sDSC = String(DSC,4);
}

//CALCULO DURAÇÃO DO DIA E HORA E MINUTO NASCER DO SOL

//duração dia
tg_lat = tan((latitude/100000)*3.1412/180);
tg_decli = tan(DS/(180/3.1412));
TD = 0.1333*(acos(-tg_lat*tg_decli))*180/3.1412;
String sTD = String(TD,4);

//hora e minuto do nascer do sol
aux7 = 12-(TD/2);
HN = abs((TD/2)-12);
MN = (aux7-HN)*60;

//hora e minuto do por do sol
aux8 = 12+(TD/2);
HN = abs((TD/2)+12);
MN = (aux8-HN)*60;

// PROGRAMAÇÃO MOTORES

a=(180/(TD*60))*5;

```

```
//Motor 1 girando até o angulo de declinação
```

```
if (aux==false and hora==HN and minuto==MN) {
    motor1();
    stepper1.run();
```

```

//Motor 2 girando até o angulo da declinação com angulo a de 5 em 5
minutos
```

```

    if(stepper1.isDone()) {
        motor2();
        stepper2.run();

        if(stepper2.isDone() and angulo<(90-DSC)){
            delay(300000);
            angulo=angulo+a;
            done2=false;
        }
    }
}
```

```
//Motor 1 girando de acordo com o decorrer do dia
```

```

if (done2==true and angulo>=(90-DSC)) {
    motor12();
    stepper1.run();
    if (stepper1.isDone() and angulo2<(180-(2*DSC)-a)){
        delay(300000); //300000
        angulo2=angulo2+a;
        done3=false;
    }
}
```

```
//Motor 2 girando de acordo com o por do sol
```

```
if(done3==true and angulo2>=(180-(2*DSC)-a)) {  
    motor21();  
    stepper2.run();  
  
    if (stepper2.isDone() and angulo3<(DSC)){  
        delay(300000); // 300000  
        angulo3=angulo3+a;  
        done4=false;  
    }  
}
```

```
//Motor 1 voltando a posição inicial
```

```
if(done4==true and angulo3>=(DSC)){  
    motorfinal();  
    stepper1.run();  
}  
  
}  
  
}
```


ANEXO B – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO COLETA DE DADOS

[code]

```
#include <SD.h>
```

```
#define LDR A5
```

```
#define PLACA A0
```

```
const int CS = 4;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  if (!SD.begin(CS)) //Verifica se o cartão SD esta conectado corretamente
```

```
  {
```

```
    Serial.println("Falha ao acessar o cartao SD !");
```

```
    Serial.println("Verifique o cartao/conexoes e reinicie o Arduino...");
```

```
    return;
```

```
  }
```

```
  Serial.println("Cartao iniciado corretamente !");
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

```
  float valor = analogRead(A5); //Le a entrada analogica A5
```

```
  float valor1 = analogRead(A0); // Le a entrada analogia A0
```

```
  Serial.print("LDR: ");
```

```
  Serial.print(valor * 5 / 1023); //Mostra no monitor serial a tensão do circuito do
```

```
LDR
```

```
  Serial.print(" V");
```

```
  Serial.print(" PLACA: ");
```

```
  Serial.print(valor1 * 5 / 1023); //Mostra no monitor serial a tensão do circuito da
```

```
placa
```

```
  Serial.println(" V");
```

```
File dataFile = SD.open("arquivo1.txt", FILE_WRITE);
delay(12000); //repete a cada 12s

if (dataFile)
{

    dataFile.print("LDR: ");
    dataFile.print(valor * 5 / 1023); //Grava a tensão do circuito do LDR no cartão
SD
    dataFile.print(" V");
    dataFile.print(" PLACA: ");
    dataFile.print(valor1 * 5 / 1023); //Grava a tensão do circuito da placa no cartão
SD
    dataFile.println(" V");
    dataFile.close();
    delay(12000); // repete a cada 12s
}
else
{

    Serial.println("Erro ao abrir arquivo1.txt !");
}
}
```