

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
E COMPUTAÇÃO**

**Sistema Fotovoltaico com Eficiência Aumentada
Usando Rastreamento Solar.**

Autor: Henrique José Caravita de Andrade

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos

2016

Henrique José Caravita de Andrade

Sistema Fotovoltaico com Eficiência Aumentada Usando Rastreamento Solar.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D518s de Andrade, Henrique José Caravita
 Sistema Fotovoltaico com Eficiência Aumentada
 Usando Rastreamento Solar / Henrique José Caravita de
 Andrade; orientador Evandro Luís Linhari Rodrigues. São
 Carlos, 2016.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
 ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

 1. energia solar. 2. painel fotovoltaico. 3.
 rastreamento solar. 4. sistema fotovoltaico. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Henrique José Caravita de Andrade

Título: "Sistema fotovoltaico com eficiência aumentada usando rastreamento solar"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 11 / 2016,

com NOTA 10,0 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Evandro Luis Linhari Rodrigues - Orientador -
SEL/EESC/USP*

Prof. Associado Adilson Gonzaga - SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Celso Aparecido de França - UFSCar

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedicatória

Dedico esse projeto à minha família, que sempre me apoiou, com muito amor, para que eu fizesse uma faculdade de excelente qualidade e longe de casa.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me dar saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão por proporcionarem tudo que foi necessário para minha graduação, sempre com muito amor.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Evandro por estar sempre me incentivando a melhorar.

Agradeço também aos meus amigos Lucas Fidelis, Rafael Fidelis, André Sena, Pedro Finger e Victor Mathias pela ótima convivência na nossa república e aos amigos inseparáveis Amanda Ferlin, Juan Almeida, Francisco Moraes e Natália Bressan pela amizade sincera.

Lista de Figuras

Figura 1 - Radiação solar global - média anual (kWh/m ²).....	21
Figura 2 - Célula solar fotovoltaica conectada a uma carga.....	26
Figura 3 - Curva I x V de uma célula solar.....	26
Figura 4 - Inclinação do sol no hemisfério Sul.....	28
Figura 5 - Área da curva p(t).....	29
Figura 6 - Materiais representados em diagrama de blocos.....	33
Figura 7 - Arduino uno utilizado.....	34
Figura 8 - Módulo sensor de tensão DC utilizado.....	35
Figura 9 - Motor de passo 28BYJ-48 e driver ULN2003.....	36
Figura 10 - Pannel solar utilizado.....	36
Figura 11 - Curva VxI do pannel fotovoltaico.....	38
Figura 12 - Potência máxima do pannel fotovoltaico.....	38
Figura 13 - Curvas características de um pannel fotovoltaico em diferentes condições.....	39
Figura 14 - Estrutura em PLA com os motores e o pannel solar.....	40
Figura 15 - Fluxograma do método de varredura.....	44
Figura 16 - Esquemático das conexões.....	45
Figura 17 - Gráfico de potência do método estático no primeiro teste.....	50
Figura 18 - Gráfico de potência do método estático no segundo teste.....	51
Figura 19 - Gráfico de potência do método de 1%.....	52
Figura 20 - Gráfico de potência do método de 5%.....	53
Figura 21 - Comparação do método variável de 1% e do método estático.....	55
Figura 22 - Comparação do método variável de 5% e do método estático.....	55
Figura 23 - Medidas da base.....	71
Figura 24 - Medidas da bandeja.....	72
Figura 25 - Medidas do braço inferior esquerdo.....	73
Figura 26 - Medidas do braço inferior direito.....	74
Figura 27 - Medidas das engrenagens.....	75
Figura 28 - Medidas do braço superior.....	76
Figura 29 - Medidas do suporte da placa.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Medições de tensão, corrente e potência da placa fotovoltaica	37
Tabela 2 - Parâmetros do painel fotovoltaico.....	38
Tabela 3 - Dados do método estático no primeiro teste.....	80
Tabela 4 - Dados do método estático no segundo teste.....	82
Tabela 5 - Dados do método de 1%.....	84
Tabela 6 - Dados do método de 5%.....	86

Siglas

<i>ABS</i>	<i>Acrilonitrila butadieno estireno</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>EEPROM</i>	<i>electrically erasable programmable read-only memory</i>
<i>GND</i>	<i>Ground</i>
<i>LDR</i>	<i>Light-Dependent Resistance</i>
<i>PLA</i>	<i>ácido poliático</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>USP</i>	<i>Universidade de São Paulo</i>
<i>VCC</i>	<i>Tensão Corrente Contínua</i>

Resumo

A energia elétrica no Brasil tem um custo elevado e a energia solar ainda não é muito utilizada pela baixa eficiência de conversão energética. Nesse projeto, foi desenvolvido e testado um modelo de painel fotovoltaico que se autoajusta para estar sempre direcionado à captação da maior quantidade de luz solar, produzindo assim, a maior quantidade de energia. Também foi feita a análise da eficiência de um painel fotovoltaico comparando um sistema com rastreamento e um fixo. A comparação entre os dados obtidos com o painel fixo e os dados obtidos com o painel se ajustando mostra que o painel solar autoajustável é mais eficiente. Foi feita também uma análise da varredura com o rastreamento feito a partir de diferentes níveis de queda de potência a fim de se descobrir qual é mais eficiente. A metodologia desenvolvida foi comparada com o método de rastreamento utilizando resistores dependentes de luz (LDRs) de trabalhos encontrados na literatura.

Palavras-Chave: energia solar, painel fotovoltaico, rastreamento solar, sistema fotovoltaico.

Abstract

The energy in Brazil has a high cost and solar energy is not commonly applied because of the low energy conversion efficiency. In this project, a model of photovoltaic panel was developed and tested; It adjusts itself to always be directed to receive the largest amount of sunlight and thus, producing the largest amount of electric energy. An analysis of the efficiency of a photovoltaic panel was also performed comparing a tracking system and a fixed one. A comparison between the static panel data and the adjusting panel data shows that the adjusting one is more efficient. The method was analyzed using solar tracking done based on different levels of power loss in order to define which one is more efficient. These methods were also compared with a method of tracking using light-dependent resistances (LDRs) from the literature.

Keywords: solar energy, photovoltaic panel, solar tracking, photovoltaic system.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Objetivo	23
1.2. Motivação	24
2. Embasamento Teórico.....	25
2.1. Células Fotovoltaicas	25
2.2. Kit Arduino	27
2.3. Posicionamento	27
2.4. Energia gerada	28
2.5. Eficiência energética	29
2.6. Comparação entre os sistemas fixo e com rastreamento	30
3. Materiais e Métodos	33
3.1. Materiais.....	33
3.1.1. Arduino Uno.....	33
3.1.2. Sensor de Tensão DC	34
3.1.3. Motor de Passo	35
3.1.4. Pannel Solar	36
3.1.5. Impressão 3D	39
3.1.6. Engrenagens	40
3.1.7. Demais Materiais.....	42
3.2. Métodos.....	42
3.2.1. Rastreamento.....	42
3.2.2. Hardware	45
3.2.3. Software	45
3.2.4. Aquisição de dados	47
4. Resultados	49
4.1. Pannel fixo	49
4.1.1. Sistema fixo do dia do sistema com rastreamento de 1%	49
4.1.2. Sistema fixo do dia do sistema com rastreamento de 5%	50
4.2. Pannel com rastreamento	51
4.2.1. Rastreamento com queda de potência de 1%	51
4.2.2. Rastreamento com queda de potência de 5%	52
4.3. Comparação.....	53

4.3.1. Comparação entre métodos com rastreamento e estático	53
4.3.2. Comparação entre métodos com rastreamento	56
4.3.3. Comparação entre os métodos por queda de potência e por LDR	56
4.4. Energia consumida	57
5. Conclusão	59
6. Sequência do Trabalho	61
Referências Bibliográficas	63
Apêndice A – Programa para rastreamento	65
Apêndice B – Programa para ler a memória do Arduino	68
Apêndice C - Informações sobre impressão 3D	70
Apêndice D - Peças impressas e suas medidas	71
Apêndice E - Tabelas com os valores de cada método	78

1. Introdução

O Brasil possui um alto índice de radiação solar, como mostrado na figura 1, que pode ser usada para gerar energia conforme diz o INPE no Atlas brasileiro de energia solar (INPE, 2006 p.31):

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global – $6,5\text{kWh/m}^2$ – ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente 300mm/ano) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil. A menor irradiação solar global – $4,25\text{kWh/m}^2$ – ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro ($1500\text{-}2500\text{ kWh/m}^2$) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha ($900\text{-}1250\text{ kWh/m}^2$), França ($900\text{-}1650\text{kWh/m}^2$) e Espanha ($1200\text{-}1850\text{ kWh/m}^2$), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

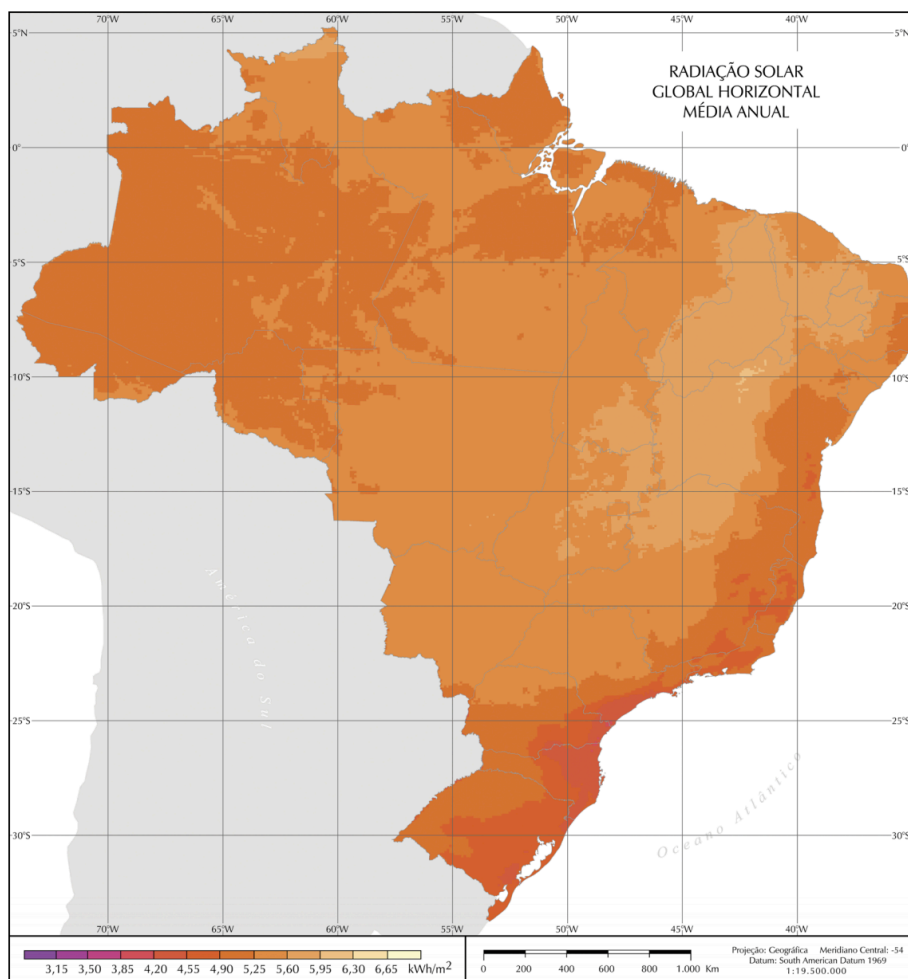


Figura 1 - Radiação solar global - média anual (kWh/m²)
Fonte: Atlas brasileiro de energia solar (INPE, 2006 p.34)

Mesmo assim o seu aproveitamento ainda é muito baixo, possivelmente devido ao fato de que essa conversão não é muito eficiente, devido ao alto custo de produção e instalação desses equipamentos e porque o Brasil já tem grande parte da sua geração de energia partindo de fontes renováveis.

Um fator favorável ao uso de sistemas com rastreamento é o estado da indústria de células fotovoltaicas de silício, que apresenta estagnação em seu desenvolvimento, com o preço da produção de células mais eficientes cada vez mais elevado (Levitan, 2012). Portanto, busca-se outras formas de extrair o máximo de energia elétrica possível dos painéis baratos.

A radiação solar vem do aquecimento da camada do Sol chamada cromosfera. Aproximando-se da Terra, observa-se uma radiação média de 1367 W/m^2 , sendo que aproximadamente 75% disso passa para dentro da atmosfera sem ser dispersado ou absorvido em um dia de céu limpo. Assim, aproximadamente 1000 Wh/m^2 de radiação solar atinge a superfície da Terra, o que é chamado de radiação normal direta. Uma parte da luz solar que foi dispersa acaba atingindo também a superfície terrestre, o que é chamado de radiação difusa. Existe ainda um terceiro tipo de radiação que é o resultado de reflexão no solo e depois dispersão. A soma dessas três formas de radiação é chamada de radiação global (de Paula, 2015 p.13).

A radiação solar pode ser convertida em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico que decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar. A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar que incide na superfície da célula e a que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células comerciais têm a eficiência em torno de 25% (ANEEL, 2005).

As vantagens de se utilizar um sistema são que essa energia não polui durante seu uso, a poluição decorrente da fabricação dos equipamentos necessários para a construção dos painéis solares, as centrais necessitam de manutenção mínima, a energia solar é excelente em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a enormes investimentos em linhas de transmissão.

As desvantagens são que existe variação na quantidade de energia produzida de acordo com a situação climática, além de que durante a noite não existe produção, obrigando a utilização de meios de armazenamento da energia produzida durante o dia em locais onde os painéis solares não estejam ligados à rede de transmissão, locais em latitudes elevadas, como Finlândia, Islândia e Sul da Argentina e Chile, sofrem quedas bruscas de produção durante os meses de Inverno devido à menor disponibilidade diária de energia solar, além das formas de armazenamento da energia proveniente de painéis fotovoltaicos serem pouco eficientes quando comparadas as outras formas de produção de energia (Portal Energia, 2016).

Existem também trabalhos semelhantes a esse, como a tese de mestrado para engenharia elétrica da USP de São Paulo do Sérgio Eduardo Alves de Paula intitulada "Estudo do Ganho de Energia Elétrica em Painéis Fotovoltaicos Usando Rastreamento Solar Baseado em Sistemas Embarcados" (de Paula, 2015). Porém, ele faz uso de apenas um motor, ou seja, o sistema apresentado não tem a capacidade de fazer uma varredura por todos os ângulos, precisando de um ajuste manual em sua inclinação e usando um motor comum, ao invés de um motor de passo. Esses aspectos serão estudados neste trabalho, visando dar uma contribuição para essa área do conhecimento.

Outro trabalho semelhante é o trabalho de conclusão de curso para engenharia elétrica da USP de São Carlos do Felipe Camargo Trevelin intitulada "Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos" (Trevelin, 2014). Onde ele mostra que o método com dois motores é melhor, porém faz o uso de resistores dependentes de luz (LDR). Nesse projeto será utilizado o método de varredura que procura a maior potência em uma área predefinida, a comparação desses métodos mostrará qual é mais eficiente.

1.1. Objetivo

O objetivo desse trabalho é comprovar a eficiência energética entre sistemas fotovoltaicos com e sem rastreamento, para isso é projetado, utilizando sistema embarcado, um painel fotovoltaico em pequena escala que se ajuste

automaticamente para estar sempre alinhado ao sol de modo a receber a maior incidência possível de luz para gerar uma maior quantidade de energia quando comparado a um painel estático, fazendo varreduras com uma base movida por motores de passo.

Foram testados dois métodos de varredura, no primeiro método o painel se reajusta caso a potência caia 1% e no segundo método o painel se reajusta caso a potência caia 5%. Com isso, será possível analisar também se essa diferença é relevante em relação à eficiência e consumo.

O projeto foi construído em pequena escala com o objetivo de se obter um baixo custo e para se fazer uma comparação preliminar entre as eficiências de um painel estático e de um ajustável.

1.2. Motivação

Um dos problemas para se utilizar painéis solares fotovoltaicos em larga escala é sua baixa eficiência de conversão de energia solar em elétrica.

Dessa maneira, um estudo de métodos para solucionar esse problema de modo a viabilizar cada vez mais a utilização da energia solar torna-se necessário. Diversas pesquisas já estão em andamento há anos para aumentar a eficiência dos painéis, melhorando e criando novos processos de fabricação com semicondutores.

Aumentando a eficiência dos painéis fotovoltaicos, eles poderão ser mais amplamente utilizados em usinas solares, em residências e até em indústrias. Com o constante aumento do consumo de energia no país e o aumento do seu custo, é importante melhorar a eficiência da energia solar para que essa também possa ser utilizada no Brasil, um país com boa incidência solar como foi apresentado na introdução.

Durante o programa de pesquisa "*Summer 2016 Applied Research Opportunity in Astronautical Engineering*" (Oportunidade de Pesquisa Aplicada em Engenharia Aeroespacial de Maio a Julho de 2016) na *Capitol Technology University* dos Estados Unidos da América foram realizados estudos sobre energia solar aplicada em microsatélites, que incentivaram a criação desse projeto.

2. Embasamento Teórico

Nesse Capítulo serão apresentados os componentes que compõe o sistema fotovoltaico com rastreamento solar bem como os conceitos técnicos para melhor compreensão do sistema proposto.

2.1. Células Fotovoltaicas

Uma célula solar ou célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico capaz de converter a luz proveniente do sol diretamente em energia elétrica por intermédio do efeito fotovoltaico. As células fotovoltaicas são utilizadas em conjunto para formar os painéis fotovoltaicos.

Células fotovoltaicas são fabricadas a partir de um material semicondutor, geralmente o silício, que se apresenta normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é mau condutor elétrico. A maioria das células solares comerciais é feita de silício monocristalino, que são tipicamente do tipo “n sobre p” ou “p sobre n”, dependendo do tipo de dopagem inicial do silício e a que se faz em seguida no processo de fabricação (de Paula, 2015 p.17).

Utilizando como exemplo o modelo “n sobre p”, onde um *wafer* de silício monocristalino dopado com boro (silício p) recebe uma difusão de fósforo, o que forma o silício n, formando assim uma junção p - n. Nessa junção, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício n que ocupam os vazios da estrutura do silício p. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção p - n, os elétrons são orientados e fluem da camada “p” para a camada “n”. Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica), esse processo pode ser visto na figura 2. Este fluxo será mantido enquanto a luz incidir sobre a célula. A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente (do Nascimento, 2004).

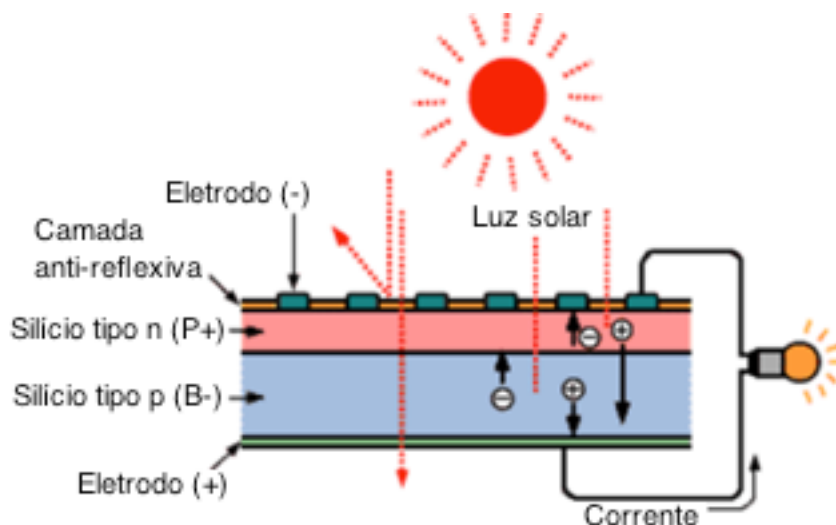


Figura 2 - Célula solar fotovoltaica conectada a uma carga
 Fonte: http://www.bls.gov/green/solar_power/ (adaptado)

Um painel solar é a junção de várias células solares em uma associação em série para atingir a tensão final desejada, posteriormente conectando essas mesmas associações séries em paralelo para atingir a corrente final desejada.

Para se manter o ponto de potência do painel solar máximo, é necessário que a carga conectada seja tal que faça sua tensão e corrente ficarem aproximadamente V_{\max} e I_{\max} , vistos na figura 3. Para que isso aconteça, é comum usar um controlador de carga externo, então se usa um inversor para obter corrente alternada que irá alimentar uma residência (de Paula, 2015 p. 22).

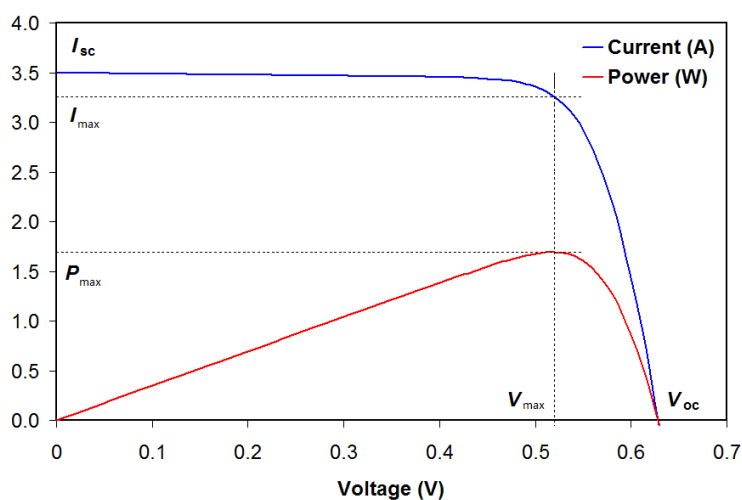


Figura 3 - Curva $I \times V$ de uma célula solar

2.2. Kit Arduino

O kit Arduino é uma plataforma baseada no microcontrolador ATmega328, criada com o intuito de ser uma opção barata e simples para o desenvolvimento de protótipos. Sua interface de desenvolvimento (IDE) é desenvolvida em linguagem Java, está disponível para os sistemas operacionais Windows, Linux e Mac OS e permite a programação por meio das linguagens C e C++ (Arduino, 2016). A placa utilizada no desenvolvimento desse projeto é uma versão da placa Arduino Uno.

C++ é uma linguagem de programação de médio nível, pois incorpora características de alto e baixo nível e que inclui suporte a objetos, além de ser uma das linguagens comerciais mais populares do mundo.

2.3. Posicionamento

O Sol nasce no leste, sobe inclinando-se ao Norte do Brasil e se põe no Oeste, como na figura 4, então a direção ideal para o painel solar produzir mais energia no hemisfério Sul é virado para o Norte (Portal Solar, 2016).

O melhor ângulo de inclinação para o sistema fotovoltaico fixo depende de onde ele está sendo instalado e é igual ao ângulo da Latitude desse local. Para São Carlos, SP, a latitude é 21°, ou seja, essa deve ser a inclinação para o norte do painel solar estático.

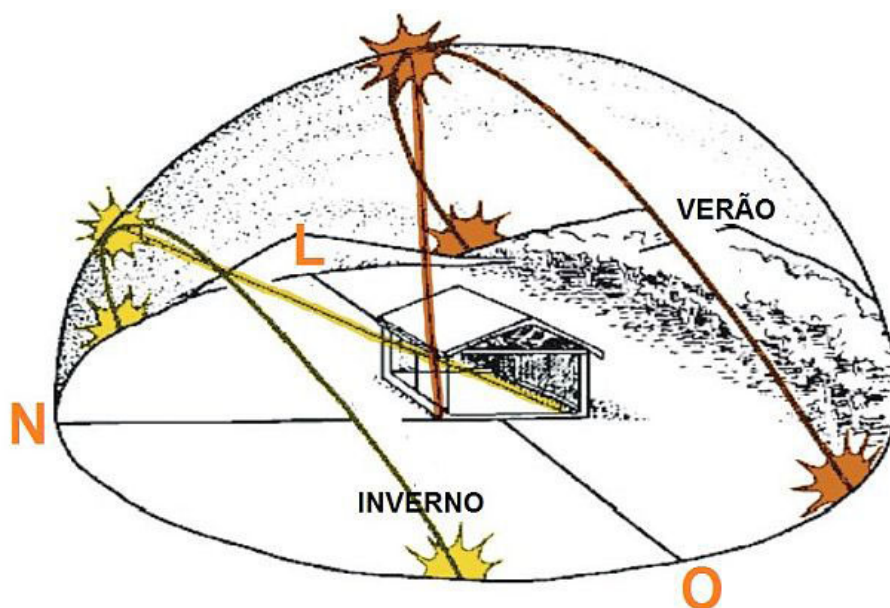


Figura 4 - Inclinação do sol no hemisfério Sul

Fonte: <http://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>

2.4. Energia gerada

Para se saber quanta energia o painel solar está gerando, é necessário multiplicar a tensão e a corrente geradas, resultando na potência instantânea.

$$E = P * t \quad (1)$$

Como a potência gerada não é a mesma em todo o período, é preciso integrar a curva da potência no tempo, obtendo-se assim a energia gerada naquele dia.

$$E = \int_a^b p(t)dt \quad (2)$$

Porém, não se sabe a função da curva, mas se sabe a potência instantânea a cada 10 minutos, então pode ser feita a somatória desses valores, pois intuitivamente a integral de $p(t)$ corresponde à soma dos retângulos de altura $p(t)$ e base dt , onde o produto desses valores corresponde à área de cada

retângulo (Silva, 2016). A soma das áreas fornecerá a área total da superfície sob a curva, que é a energia total gerada, como mostra a figura 5.

$$E = \sum_a^b (p(t) * dt) \quad (3)$$

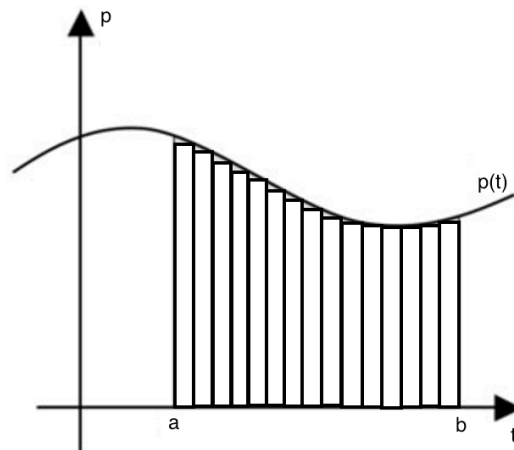


Figura 5 - Área da curva p(t)

Fonte: <http://brasilecola.uol.com.br/matematica/area-sob-uma-curva.htm> (adaptado)

Ou seja, a energia total gerada pelo painel é a somatória, no intervalo de funcionamento da placa, das potências instantâneas a cada medida tomada vezes o intervalo entre medidas.

2.5. Eficiência energética

Para calcular a eficiência energética do painel solar é necessário dividir a energia gerada pelo painel, pela energia entregue pelo sol:

$$\frac{E_{\text{fixo}}}{E_{\text{sol}}} = \eta_{\text{fixo}} \quad (4)$$

$$\frac{E_{\text{variável}}}{E_{\text{sol}}} = \eta_{\text{variável}} \quad (5)$$

Onde η é a eficiência, E é a energia, fixo se refere ao sistema estático e variável se refere ao sistema com varredura.

Porém, não se sabe a energia entregue pelo sol, mas como essa energia é a mesma no momento das medições do painel fixo e do variável elas podem ser igualadas, dessa forma pode se descobrir quão maior é uma eficiência em relação a outra:

$$\begin{aligned} E_{\text{sol}} &= E_{\text{sol}} \\ \frac{E_{\text{fixo}}}{\eta_{\text{fixo}}} &= \frac{E_{\text{variável}}}{\eta_{\text{variável}}} \\ \frac{\eta_{\text{variável}}}{\eta_{\text{fixo}}} &= \frac{E_{\text{variável}}}{E_{\text{fixo}}} \end{aligned} \quad (6)$$

E para se comparar os métodos com rastreamento basta igualar as eficiências do painel fixo, que será sempre a mesma, descobrindo, assim, qual é mais eficiente.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{fixo}} &= \eta_{\text{fixo}} \\ \frac{\eta_{1\%} * E_{\text{fixo}}}{E_{1\%}} &= \frac{\eta_{5\%} * E_{\text{fixo}}}{E_{5\%}} \\ \frac{\eta_{1\%}}{\eta_{5\%}} &= \frac{E_{1\%}}{E_{5\%}} \end{aligned} \quad (7)$$

2.6. Comparação entre os sistemas fixo e com rastreamento

Existem estudos no meio acadêmico sobre a comparação da geração de energia elétrica de um sistema de painéis fotovoltaicos fixos com a geração de energia com um sistema usando um método de rastreamento solar. Estes estudos se baseiam em um sistema estático, onde os painéis estão com uma angulação calculada para receber a maior incidência solar durante todo o período de um ano para uma determinada localização. Estes resultados são comparados aos resultados de um sistema com o mesmo dimensionamento, utilizando algum método de rastreamento solar (Trevelin, 2014).

Um sistema de rastreamento com eixo duplo, acompanhando o sol de leste a oeste e em torno do zênite, foi testado por um ano na Grécia, na Alemanha e no

Reino Unido, onde se obteve um ganho, respectivamente, de 34.8%, 28.7% e 30.4% na geração de energia elétrica (Axaopoulos, Fylladitakis, 2013).

Uma ressalva precisa ser feita em caráter governamental, uma vez que os gastos e ganhos do acréscimo do rastreamento solar podem se tornar mais ou menos vantajosos, dependendo das características do país onde o sistema será instalado, como a existência de incentivos fiscais ou o efeito do preço da energia no país em relação ao custo da implementação de um sistema com rastreamento solar.

As características da própria instalação devem ser levadas em consideração, já que um sistema com rastreamento necessita de um espaço consideravelmente maior que um sistema fixo, pois há a necessidade de um espaço entre os painéis para que não tenha sombra entre eles. Também deve ser considerada a vida útil do sistema, os painéis fotovoltaicos atuais têm uma vida útil de 25 anos, eventualmente necessitando de uma limpeza, e o sistema de rastreamento composto de motores e partes móveis teria uma vida útil menor e necessitaria manutenção mais recorrente (Trevelin, 2014).

Em relação à busca de meios que garantam a maior conversão de energia utilizando os painéis disponíveis no mercado, Appleyard (Appleyard, 2009) sugere que, para as células disponíveis atualmente, o uso de sistemas de rastreamento solar é a melhor forma de se ter uma maior conversão de energia, exceto em situações onde a área disponível é grande o suficiente para uma simples instalação de um maior número de painéis fixos, obtendo-se uma melhor relação entre custo e benefício.

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

Nesse item, serão mencionados todos os materiais necessários para a criação desse projeto, a descrição deles e como eles serão utilizados. Pode ser visto do diagrama de blocos da figura 6 a simplificação da conexão dos materiais utilizados.

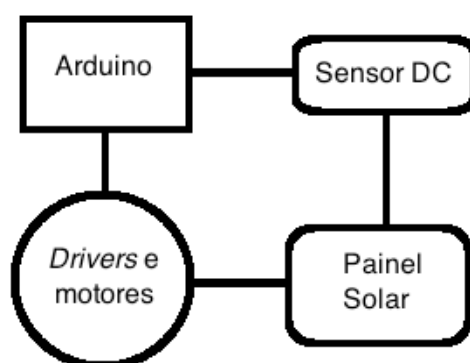


Figura 6 - Materiais representados em diagrama de blocos

3.1.1. Arduino Uno

Ele pode ser alimentado tanto pela conexão USB, enquanto habilita ser programado, como pelo pino próprio de alimentação. Esse kit possui 6 pinos de entrada e saída analógica com um conversor A/D e um D/A, ambos de 10 *bits*, para converter o valor analógico em digital, ou vice-versa, o que possibilita manipular esse número dentro do programa. O Arduino possui também 12 pinos digitais, livres, que podem ser utilizados. Esse kit tem saídas de 5 V, 3,3 V e dois pinos GND. A figura 7 é uma foto do Arduino uno utilizado.



Figura 7 - Arduino uno utilizado

3.1.2. Sensor de Tensão DC

Esse módulo, mostrado na figura 8, aceita entradas DC de até 25 volts. Ele é nada mais que um divisor de tensão onde sua saída envia uma tensão de até 5 volts para o Arduino, que então converte para um número binário de 0 a 1023. Esse número binário é facilmente convertido no programa para tensão de entrada pelas fórmulas:

$$\text{ValorSensor} = \text{EntradaAnalógica} * \frac{5}{1023}$$

$$\text{Tensão} = \text{ValorSensor} * \frac{R1+R2}{R2} \quad (8)$$

Onde EntradaAnalógica é o número de 0 à 1023 do pino analógico em que o sensor está conectado, ValorSensor é a tensão de 0 V a 5 V da saída do módulo e Tensão é o valor da tensão gerada pelo painel.

A primeira é a conversão do valor binário da entrada do Arduino multiplicando o valor binário pela sensibilidade do conversor, a segunda é o inverso de uma fórmula de divisor de tensão comum, onde se acha a tensão de entrada, não a de saída.

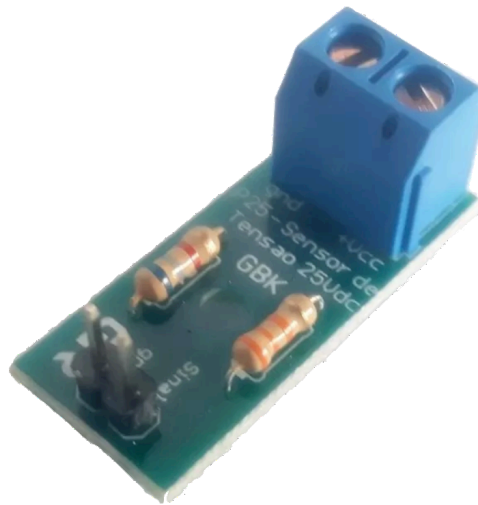


Figura 8 - Módulo sensor de tensão DC utilizado

3.1.3. Motor de Passo

Um motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte os impulsos elétricos em movimentos discretos mecânicos. O modelo do motor utilizado é o 28BYJ-48.

A maneira mais simples de fazer interface de um motor de passo com o Arduino é utilizar o *chip* ULN2003A, presente no *driver* ULN2003 (Nadiel, 2013), esse *driver* recebe os comandos do Arduino e controla o motor. Um dos motores de passo e dos *drivers* utilizados são apresentados na figura 9.

Para programar esse motor foi usado uma biblioteca especial para o Arduino onde se encontram comandos para girar no sentido horário ou anti-horário e quantos graus o motor girará.

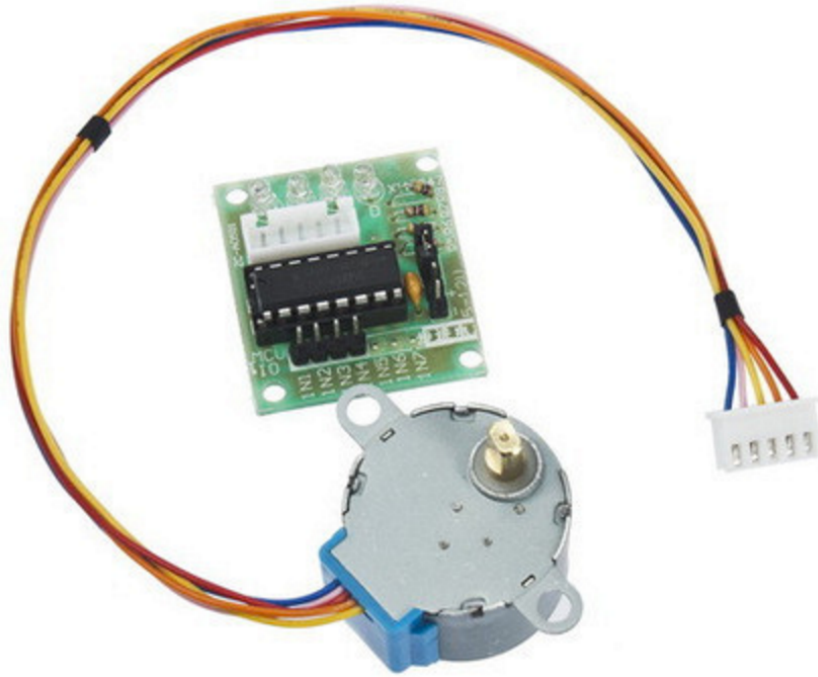


Figura 9 - Motor de passo 28BYJ-48 e *driver* ULN2003

3.1.4. Painel Solar

O painel solar escolhido para este projeto é mostrado na figura 10, medindo 80 x 55 milímetros. Ele é feito da junção de 24 células solares.



Figura 10 - Painel solar utilizado

A placa fotovoltaica fornecida não tinha suas especificações conhecidas. Assim antes de sua utilização determinou-se a relação tensão por corrente para encontrar a potência máxima da placa, parâmetro indispensável para o dimensionamento do sistema. As medidas realizadas para esta verificação podem ser encontradas na Tabela 1. A curva V_{xl} e a curva de potência máxima podem ser observadas na figura 11 e 12 respectivamente. Os parâmetros de potência máxima da placa fotovoltaica, obtidos através das curvas, estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 1 - Medições de tensão, corrente e potência da placa fotovoltaica

Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente(mA)	Potência(mW)
0	0	81,8	0
2,3	0,19	81,6	15,69
10,1	0,81	80,2	64,96
56,1	4,42	78,7	347,85
65,1	4,96	76,2	377,95
81,2	5,55	68,18	378,40
102,5	5,94	57,95	344,22
149,2	6,23	41,57	259,79
218,7	6,37	29,1	185,36
464	6,6	14,2	93,72
∞	6,82	0	0

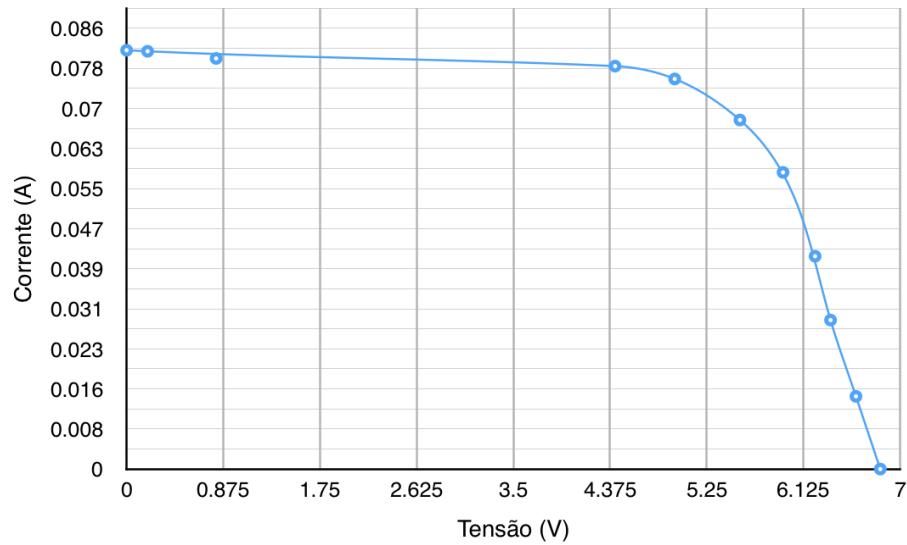


Figura 11 - Curva $V \times I$ do painel fotovoltaico

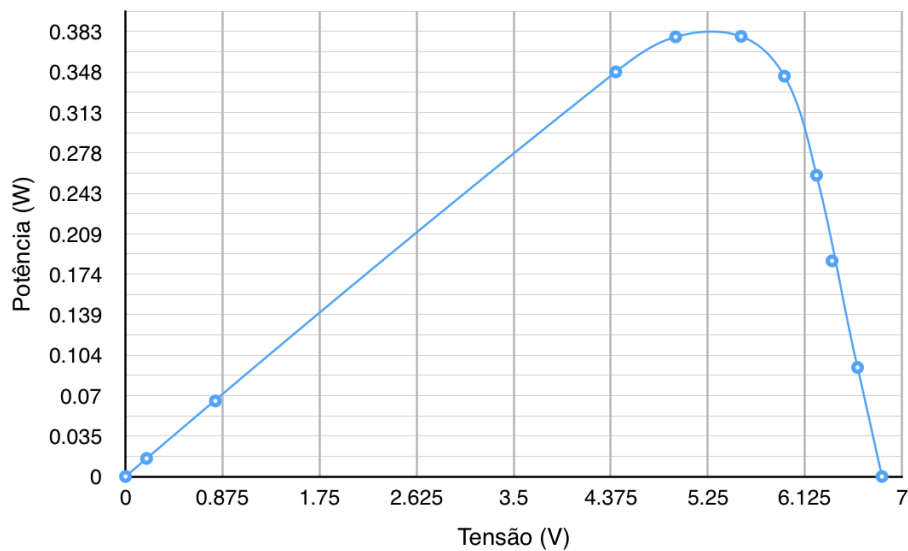


Figura 12 - Potência máxima do painel fotovoltaico

Tabela 2 - Parâmetros do painel fotovoltaico

Potência Máxima (P_{max})	0,383 W
Tensão Circuito Aberto (V_{oc})	6,82 V
Corrente Curto Circuito (I_{sc})	0,082 A
Tensão Potência Máxima (V_{mp})	5,25 V
Corrente Potência Máxima (I_{mp})	0,073 A

Os valores obtidos são exclusivos para o momento das medições, pois existem dois fatores principais que afetam a eficiência de conversão e eles são a temperatura ambiente e a intensidade da radiação solar incidente sobre a placa. A eficiência da conversão também se reduz ao longo da vida útil das células à taxa próxima de 1% ao ano (EPE, 2012). A Figura 13 mostra a característica de tensão e corrente de um painel fotovoltaico em diferentes temperaturas e níveis de radiação.

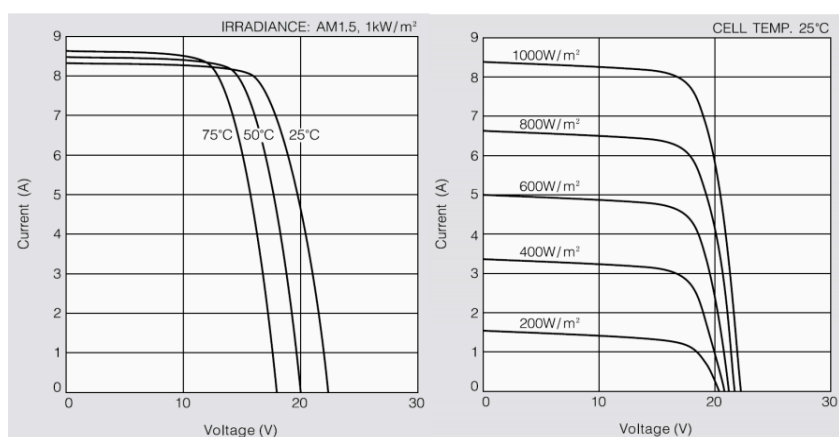


Figura 13 - Curvas características de um painel fotovoltaico em diferentes condições
 Fonte: http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf

Para realizar as medições neste projeto, a melhor resistência disponível é de $81,2 \, \Omega$, com a qual se encontrará a máxima potência, a fim de se gerar a maior quantidade de energia elétrica possível.

3.1.5. Impressão 3D

A impressão 3D pode ser utilizada para inúmeras finalidades. A principal vantagem é a rapidez e o custo relativamente baixo dos modelos desenvolvidos. Maiores esclarecimentos sobre sua utilização e materiais estão no *Apêndice C*.

A base impressa e montada pode ser vista na figura 14. Todas as partes impressas e suas medidas podem ser vistas no *Apêndice D*.



Figura 14 - Estrutura em PLA com os motores e o painel solar

3.1.6. Engrenagens

O motor de passo não seria capaz de girar o braço do painel solar sem auxílio, já que seu maior torque é de 34,3 mN.m, dado em seu *datasheet* (Kiatronics, 2016), e o torque necessário é 39,1 mN.m. Para se chegar nesse valor, foi pesado o braço com o painel, que é 57 g, e medido seu comprimento, que é 7 cm.

$$F = m \cdot a \quad (9)$$

Onde F é a força no eixo do braço, m é a massa e a é a aceleração da gravidade.

$$F = 57 \text{ g} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F = 558,6 \text{ mN} \quad (10)$$

$$T = F \cdot c \quad (11)$$

Onde T é o torque, F é a força e c é comprimento no eixo do braço.

$$T = 558.6 \text{ mN} \cdot 7\text{cm} \quad (12)$$

$$T = 39,1 \text{ mN.m}$$

Foram acrescentadas engrenagens aos motores visando a transmissão de um maior torque para girar a base e o braço que segura o painel solar. A engrenagem menor, conectada no motor, tem 9 mm de raio primitivo e a engrenagem maior, conectada no braço, tem 24,5 mm, foram escolhidas essas medidas para que o dimensionamento da base ficasse com uma distancia adequada entre o eixo do motor e o eixo do braço. Com esse novo valor de torque encontrado ficou garantido o movimento do braço e da base.

$$T = F \cdot r \quad (13)$$

Onde T é o torque, F é a força tangencial nas engrenagens e r é o raio primitivo.

$$F_{\text{motor}} = F_{\text{saída}}$$

$$\frac{T_{\text{saída}}}{T_{\text{motor}}} = \frac{r_{\text{saída}}}{r_{\text{motor}}}$$

$$\frac{T_{\text{saída}}}{34,3} = \frac{24,5}{9} \quad (14)$$

$$T_{\text{saída}} = 93,37 \text{ mN.m}$$

Ao usar engrenagens, o ângulo que o braço gira em relação ao eixo do motor também muda. Esse novo valor foi calculado para programar corretamente quantos graus são necessários girar o eixo do motor para efetivamente girar o braço do equipamento. Analisando a relação entre os raios das engrenagens e a relação entre os ângulos de rotação dos eixos de saída e do motor, chega-se nos cálculos a seguir.

$$\frac{\alpha_{\text{motor}}}{\alpha_{\text{saída}}} = \frac{r_{\text{saída}}}{r_{\text{motor}}} \quad (15)$$

Onde α é o ângulo de rotação do eixo.

$$\frac{\alpha_{\text{motor}}}{\alpha_{\text{saída}}} = \frac{24,5}{9} \quad (16)$$

$$\frac{\alpha_{\text{motor}}}{5^\circ} = \frac{24,5}{9}$$

$$\alpha_{\text{motor}} = 13,6^\circ$$

Com esse valor para se girar a placa solar 5 graus por passo será necessário girar aproximadamente 13 graus o eixo do motor, já que o programa só aceita números inteiros como ângulos.

3.1.7. Demais Materiais

Também são necessários os seguintes materiais:

- Um mini *proto board* para ligar os resistores e os *jumpers*;
- Três resistores em paralelo para se obter 81.2 ohms que suportam 2W para serem usados como carga;
- Uma Fonte de alimentação de 5V e 2A para a entrada USB do Arduino;
- Alguns *Jumpers*.

3.2. Métodos

Nesse item, serão descritos os métodos de medição do painel solar, como o *hardware* é conectado e como o programa do Arduino funciona para gerar os gráficos e o método para fazer o rastreamento que procura o ponto de melhor incidência de luz solar.

3.2.1. Rastreamento

O kit Arduino mede a tensão com a resistência de 81,2 Ω para encontrar a corrente e a potência máxima do painel fotovoltaico. Essa medida é feita em cada ponto do rastreamento.

O fluxograma da figura 15 mostra o funcionamento do rastreamento realizado a cada dia.

O primeiro rastreamento é feito de maneira que o painel gire por pontos de 5° em 5° na vertical até completar 180° e gire de 10° em 10° na horizontal até completar 180° também. Dessa forma, ele passa por todas as possíveis posições em uma volta de 360° do horizonte. Assim, não é necessário saber onde é o norte, onde se está instalando o painel e nem qual é a estação do ano. Após esse rastreamento, o Arduino direciona o painel solar para o ponto de máxima potência e salva os dados desse ponto na memória EEPROM.

Variações de 5° e 10° não afetam consideravelmente o rendimento, sendo 1% o máximo de eficiência perdida com essas inclinações (Braxin Soluções Sustentáveis, 2016).

Depois do primeiro rastreamento, a cada 10 minutos, é feita uma nova leitura para comparar com a anterior e analisar se a potência se alterou em 1% ou 5%, dependendo do método de varredura, e, se sim, fazer uma nova varredura numa área de 50 pontos ao redor do ponto anterior para encontrar um novo ponto com maior potência. Após cada leitura, salva-se os valores na memória.

As medidas do sistema fixo e do com rastreamento devem ser adquiridas em um mesmo dia e com as mesmas condições meteorológicas e o mesmo painel é usado para fazer a comparação entre sistemas. Para isso a cada 10 minutos, após a etapa de medição do sistema com varredura, o sistema irá se direcionar ao Norte com uma inclinação de 21° para fazer a medida no que seria o sistema fixo. O painel deve começar ajustado apontado para o norte a fim de que essa correção possa ser atingida.

Ao final das 10 horas de funcionamento o painel volta automaticamente à posição inicial e espera para ser desligado e conectado ao computador para que se possa coletar os dados da memória.

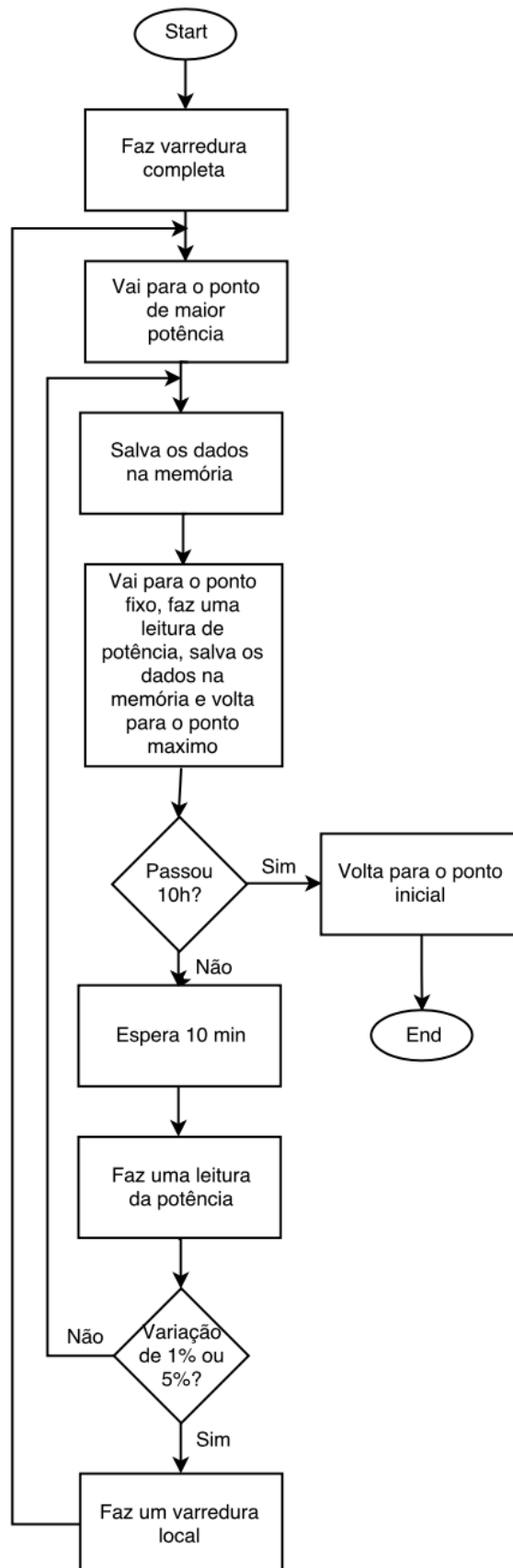


Figura 15 - Fluxograma do método de varredura

3.2.2. Hardware

Conecta-se os motores de passo nos drivers ULN2003, esses *drivers* são conectados nos pinos digitais do Arduino e o sensor de tensão no pino analógicos do Arduino. O painel solar tem dois conectores o VCC e o GND e conecta-se o sensor de tensão e a carga em paralelo ao painel. O esquemático completo pode ser visto na figura 16.

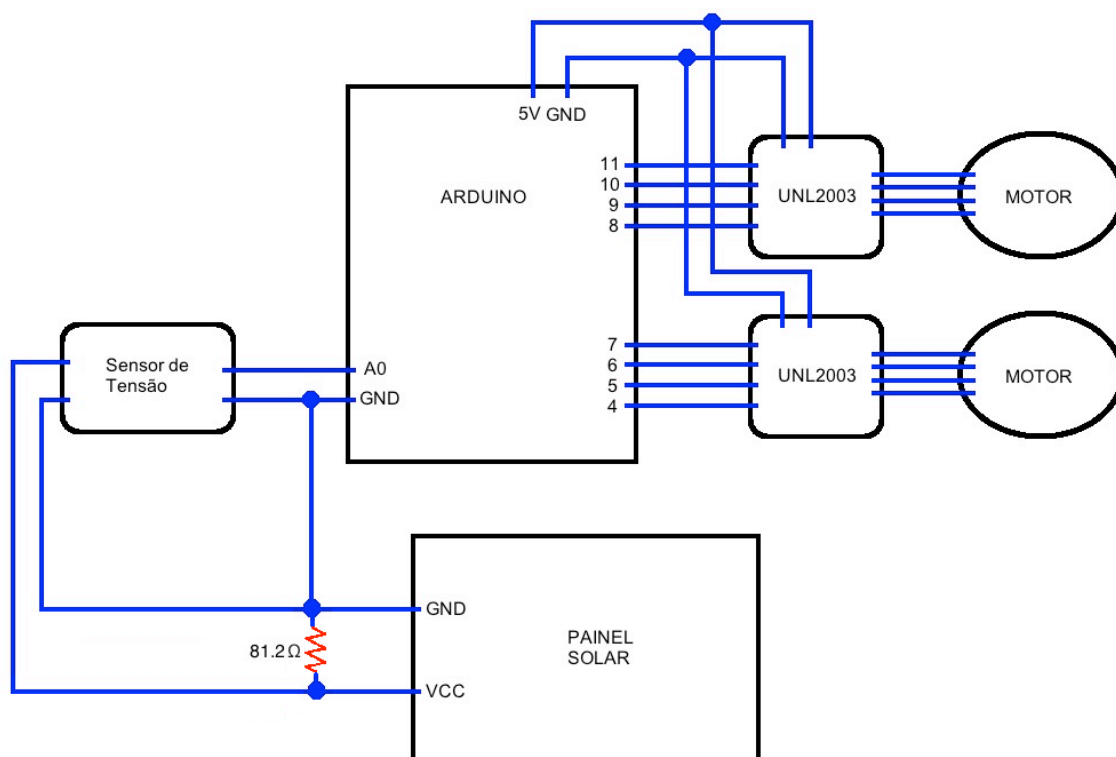


Figura 16 - Esquemático das conexões

3.2.3. Software

O programa tem duas principais funções: a *setup* e a *loop*. No *setup*, é onde se coloca o que é necessário para fazer o projeto funcionar e no *loop* fica o programa em si que fica rodando até passar 10 horas, pois o programa irá parar e

esperar para ser desligado. O programa também possui diversas subfunções para se ter um código mais limpo, de fácil entendimento e onde possam ser feitas alterações eficientemente.

No *setup* foi definida a configuração da comunicação serial, a definição do pino analógico como entrada e a inicialização dos motores, como velocidade e a definição de um passo do motor ser igual a 1°.

No *loop* o programa chama a função de leitura da potência e analisa se esse valor é maior que a leitura anterior e, se for, armazena como ponto de máxima potência e armazena o ponto em que os motores estão. A cada *loop*, o motor que ajusta a altura dá um passo, porém, se esse motor já tiver dado 41 passos, que é igual a uma meia volta ou 180°, ele volta para a posição inicial e o motor da base dá um passo. Esse ciclo continua até o motor da base completar 20 passos que são 180° também. Depois de fazer toda a varredura, totalizando 820 passos e 882 pontos medidos, visto que o programa também mede a potência dos pontos antes do primeiro passo, os motores voltam para o ponto com maior potência. A cada 10 minutos o programa faz uma nova leitura desse ponto para ver se ainda é um ponto aceitável e, se a potência cair ou aumentar mais de 1% ou 5%, dependendo do método de rastreamento utilizado, o programa irá fazer uma nova varredura numa área de 50 pontos, 10 na vertical e 5 na horizontal, próxima ao ponto máximo anterior.

Foram criadas as seguintes funções para dar suporte ao programa:

- *passoB* e *passoL*: recebe o sentido de rotação e o ângulo, para rodar o motor até completar a rotação e voltando para o programa principal.
- *leitura*: faz a leitura da tensão usando as fórmulas especificadas anteriormente no item 3.1.2., calcula a corrente e a potência, mostra as leituras para acompanhamento pelo terminal e retorna a potência ao programa principal para que possa ser usado a fim de achar o ponto de maior incidência solar.
- *nova_varredura*: faz a varredura próxima ao ponto máximo anterior, para fazer a compreensão e a alteração do código mais eficiente.
- *envio*: salva os dados obtidos na memória EEPROM, para serem lidos no final do dia por um outro programa.
- *estatico*: move o painel para uma posição fixa, apontada para o norte com uma inclinação de 21°, para ler a potência do painel na posição estática.

- termina: faz o painel voltar para a posição inicial e espera para ser desligado.

O código completo do programa está presente no *Apêndice A*.

Outro programa foi criado para ler os dados salvos na memória do Arduino, como os dados são salvos em ordem intercalada, potência com rastreamento depois potência estática e assim por diante, serão lidos os dados do método com varredura, pulando os do método estático, e mostra no terminal todos os pontos em uma tabela. Então o programa volta e lê somente os dados do método estático, pulando os do método com varredura e monta outra tabela. Essas tabelas serão mostradas posteriormente nesse trabalho.

O código completo desse segundo programa está presente no *Apêndice B*.

3.2.4. Aquisição de dados

Para observar qual método com rastreamento é melhor, foram realizadas varias medidas de corrente e de tensão em diversos momentos do dia, de 10 em 10 minutos por exemplo, e comparados esses valores com o painel em uma posição estática e fazer uma comparação entre eles também.

A melhor maneira de se medir a potência máxima de um painel solar é usando um controlador de carga, mas como esse trabalho está fazendo uma análise preliminar das eficiências pode ser usada a carga encontrada no item 3.1.4. desse trabalho.

O programa faz a medição da queda de tensão na resistência que está conectada e, assim, calcula a corrente e potência, então salva os valores de potência na memória EEPROM para que possam ser criados duas tabelas e dois gráficos para cada dia testado. Na posse dessas informações, foi possível analisar qual método é melhor.

As tabelas dos métodos com rastreamento solar devem apresentar potências aproximadamente constantes, mas no método sem rastreamento solar as tabelas devem ter um pico de potência por volta do meio dia.

Os gráficos de potência servem para mostrar o que é apresentado nas tabelas com pontos de 10 em 10 minutos, para se poder chegar visualmente à conclusão de qual método é melhor.

4. Resultados

Foram feitos dois dias de testes, um com o método de varredura que se reajusta caso a potência caia 1% e outro com queda de 5% da potência. Em ambos os dias, também foram feitas medições para o painel estático.

Optou-se por fazer a coleta dos dados a cada 10 minutos, entre as 8h e as 18h, por terem sido realizadas durante o horário de verão. Todas as medidas foram executadas na cidade de São Carlos, SP, em um local aberto e com poucos pontos de bloqueio dos raios solares durante o dia.

4.1. Painel fixo

4.1.1. Sistema fixo do dia do sistema com rastreamento de 1%

Nesse dia, foi realizada a análise utilizando o método que refaz o rastreamento quando a potência cai 1%. A figura 17 mostra os valores da placa estática, a cada 10 minutos, com inclinação de 21° e direcionada para o norte, como seria um painel solar estático comum, a fim de se comparar os resultados com o método variável. A tabela com os valores de todos os pontos desse gráfico encontra-se na tabela 3 do *Apêndice E*.

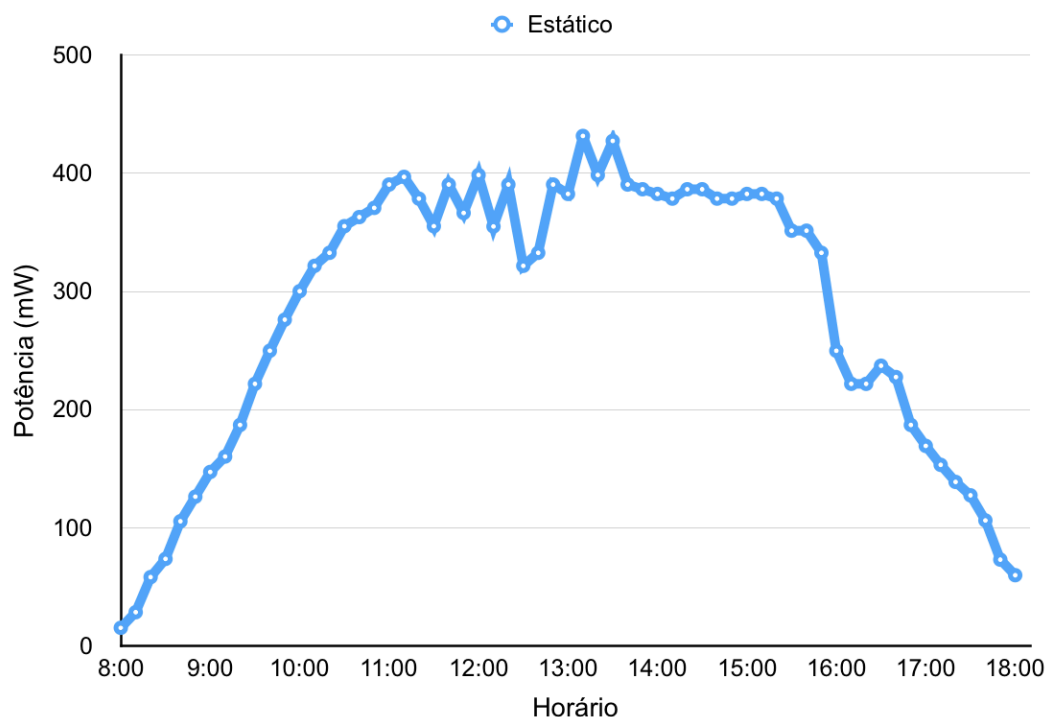


Figura 17 - Gráfico de potência do método estático no primeiro teste

Foi produzida uma energia total de 2,87 W nesse dia, com uma média de geração de energia de 287,12 mWh. Para se chegar nesse valor de energia total foi utilizado o cálculo do item 2.4., ou seja, a somatória, das 8:00 às 18:00, das potências instantâneas a cada 10 minutos vezes 10 minutos. O gráfico da figura 17 mostra como os valores de manhã e no fim da tarde são bem menores. Usando esses valores, será possível descobrir o quão mais eficiente é o painel variável de 1%.

Como esses dados foram coletados no verão, a potência se mantém bem elevada durante boa parte do dia, já que o verão é a estação com maior irradiação solar global do ano, na região Sudeste do Brasil (INPE, 2006 p.35).

4.1.2. Sistema fixo do dia do sistema com rastreamento de 5%

Nesse dia, foi realizada a análise utilizando o método que refaz o rastreamento quando a potência cai 5%. A figura 18 mostra os valores da placa estática, a cada 10 minutos, com inclinação de 21° e direcionada para o norte, como seria um painel solar fixo comum, a fim de se comparar os resultados com o método

variável. A tabela com os valores de todos os pontos desse gráfico encontra-se na tabela 4 do *Apêndice E*.

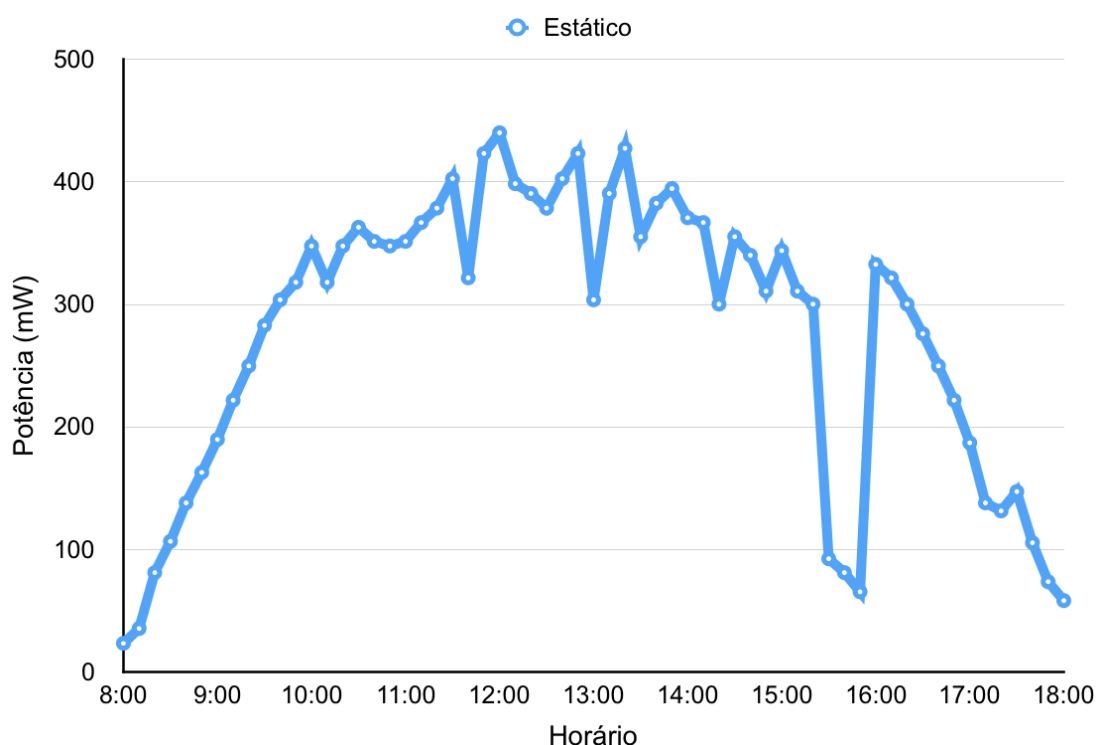


Figura 18 - Gráfico de potência do método estático no segundo teste

Foi produzida uma energia total de 2,82 W nesse dia, com uma média de geração de energia de 281,82 mWh. O gráfico da figura 18 mostra como os valores de manhã e no fim da tarde são bem menores do que ao longo do dia. Usando esses valores, será possível descobrir o quão mais eficiente é o painel variável de 5%.

4.2. Painel com rastreamento

4.2.1. Rastreamento com queda de potência de 1%

Nesse dia, foi realizada a análise utilizando o método que refaz o rastreamento quando a potência cai 1%. A figura 19 mostra a potência gerada por esse método a cada 10 minutos, a fim de se comparar os resultados com o painel

estático. A tabela com os valores de todos os pontos desse gráfico encontra-se na tabela 5 do *Apêndice E*.

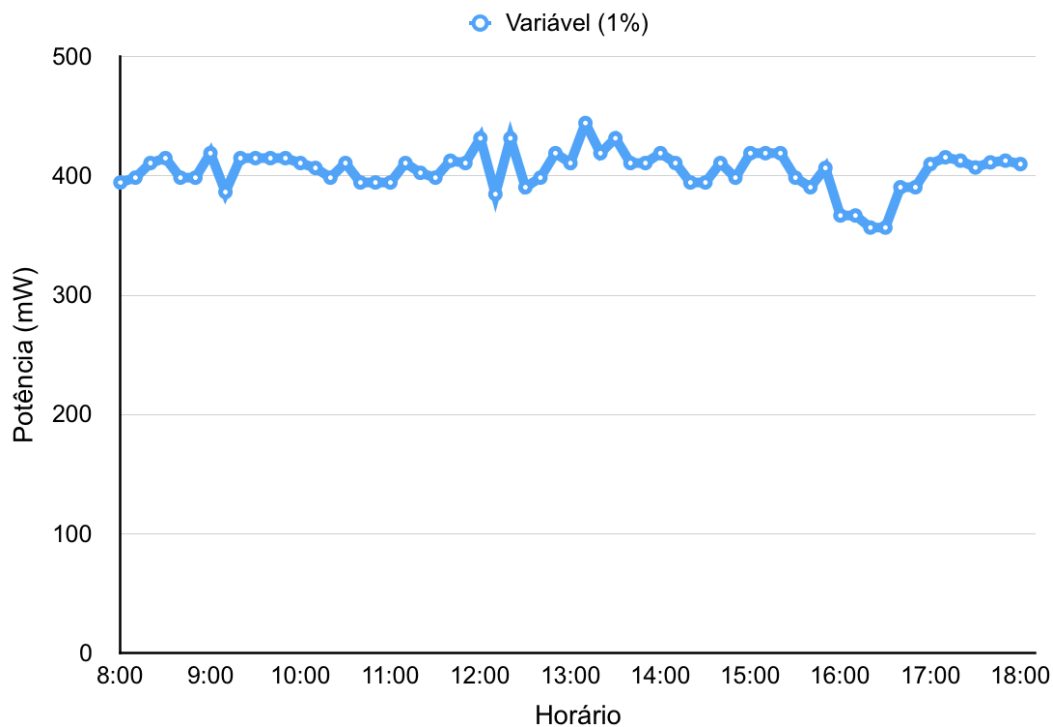


Figura 19 - Gráfico de potência do método de 1%

Foi produzida uma energia total de 4,12 W nesse dia, com uma média de geração de energia de 411,68 mWh. Pode ser observado que a potência se mantém elevada durante todo o dia no gráfico da figura 19, fazendo com que a energia total gerada nesse método seja maior que a do painel estático durante todo o período analisado.

4.2.2. Rastreamento com queda de potência de 5%

Nesse dia, foi realizada a análise utilizando o método que refaz o rastreamento quando a potência cai 5%. A figura 20 mostra a potência gerada por esse método a cada 10 minutos, a fim de se comparar os resultados com o painel estático. A tabela com os valores de todos os pontos desse gráfico encontra-se na tabela 6 do *Apêndice E*.

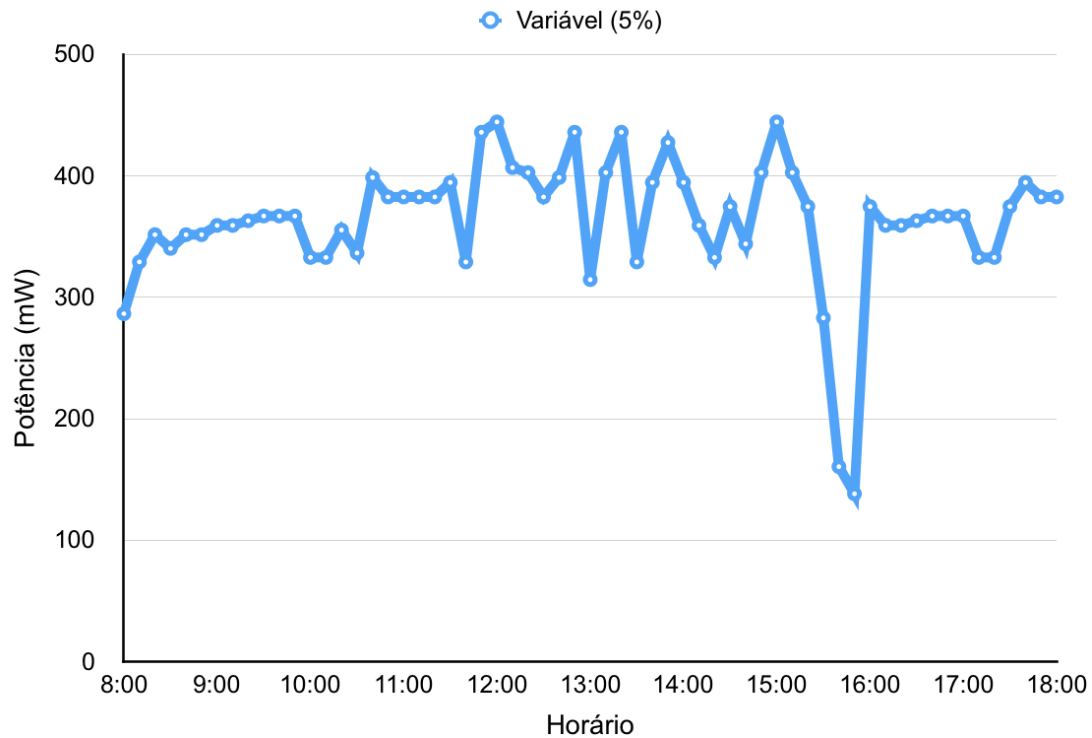


Figura 20 - Gráfico de potência do método de 5%

Foi produzida uma energia total de 3,70 W nesse dia, com uma média de geração de energia de 369,67 mWh. Pode ser observado que a potência se mantém elevada durante todo o dia no gráfico da figura 20 e potência desse dia também foi maior do que a do painel estático.

4.3. Comparação

4.3.1. Comparação entre métodos com rastreamento e estático

A razão entre a energia elétrica gerada com rastreamento de 1% de queda, que é de 4,12 W em 10 horas, e a energia gerada sem rastreamento naquele dia, que é de 2,87 W, mostra quanto a mais de energia é produzido por esse método. Como descrito no item 2.5. desse trabalho.

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{\text{fixo}}} = \frac{4,12 \text{ W}}{2,87 \text{ W}} \quad (17)$$

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{\text{fixo}}} = 1,4355$$

O método com varredura de 1% de queda produz 43,55% mais energia do que o método estático.

A razão entre a energia elétrica gerada com rastreamento de 5% de queda, que é de 3,70 W, e a energia gerada sem rastreamento naquele dia, que é de 2,82 W, mostra quanto a mais de energia é produzido pelo segundo método proposto.

$$\begin{aligned} \frac{\eta_{5\%}}{\eta_{\text{fixo}}} &= \frac{3,70 \text{ W}}{2,82 \text{ W}} \\ \frac{\eta_{5\%}}{\eta_{\text{fixo}}} &= 1,3120 \end{aligned} \quad (18)$$

O método com varredura de 5% de queda produz 31,20% mais energia do que o método estático.

O desempenho do sistema foi comparado sobrepondo os gráficos da potência entregue pelo painel fotovoltaico em cada dia, resultando nos gráficos das figuras 21 e 22, como cada método de varredura foi realizado em um dia diferente seus gráficos não podem ser comparados diretamente. Observa-se como a presença do rastreador solar estende o período de máxima incidência solar sobre o painel. Pode ser observado, nos gráficos, como há um pico na potência entregue pelo sistema fixo e este é um patamar quando se utiliza o sistema com rastreador.

Nota-se também que em ambos os gráficos os métodos apresentam picos e vales nos mesmos momentos, o que significa a passagem de nuvens e diminuição da luminosidade. Mostrando, também, que a maneira de fazer as leituras dos dois métodos no mesmo painel solar ocorreu de forma efetiva.

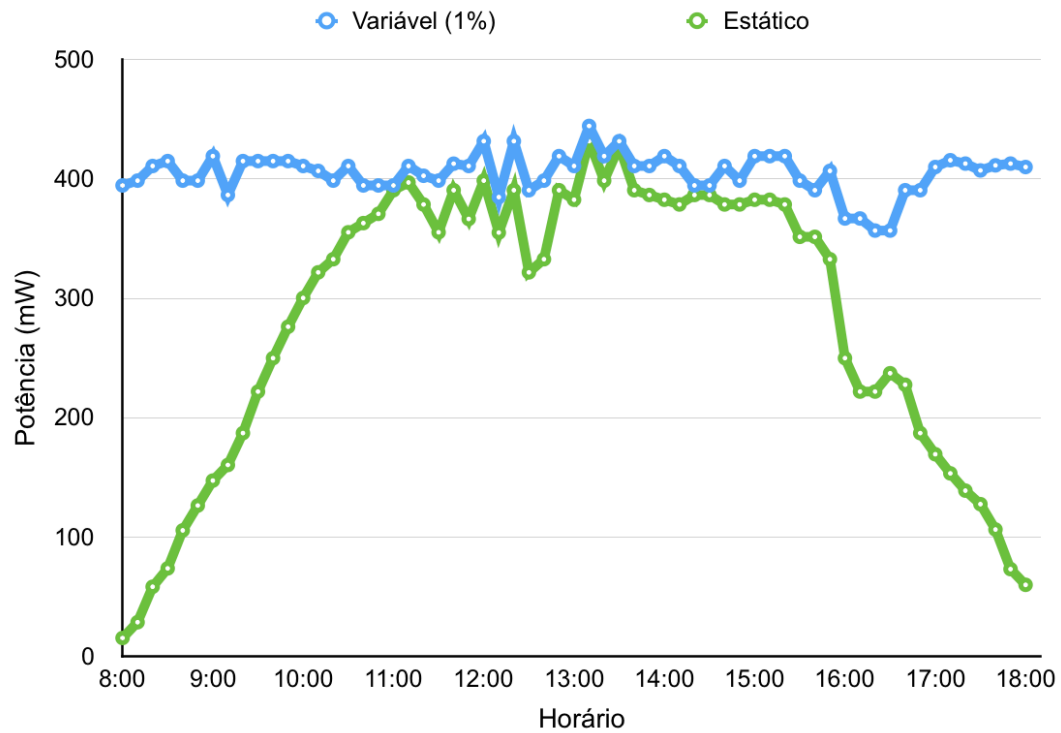


Figura 21 - Comparação do método variável de 1% e do método estático

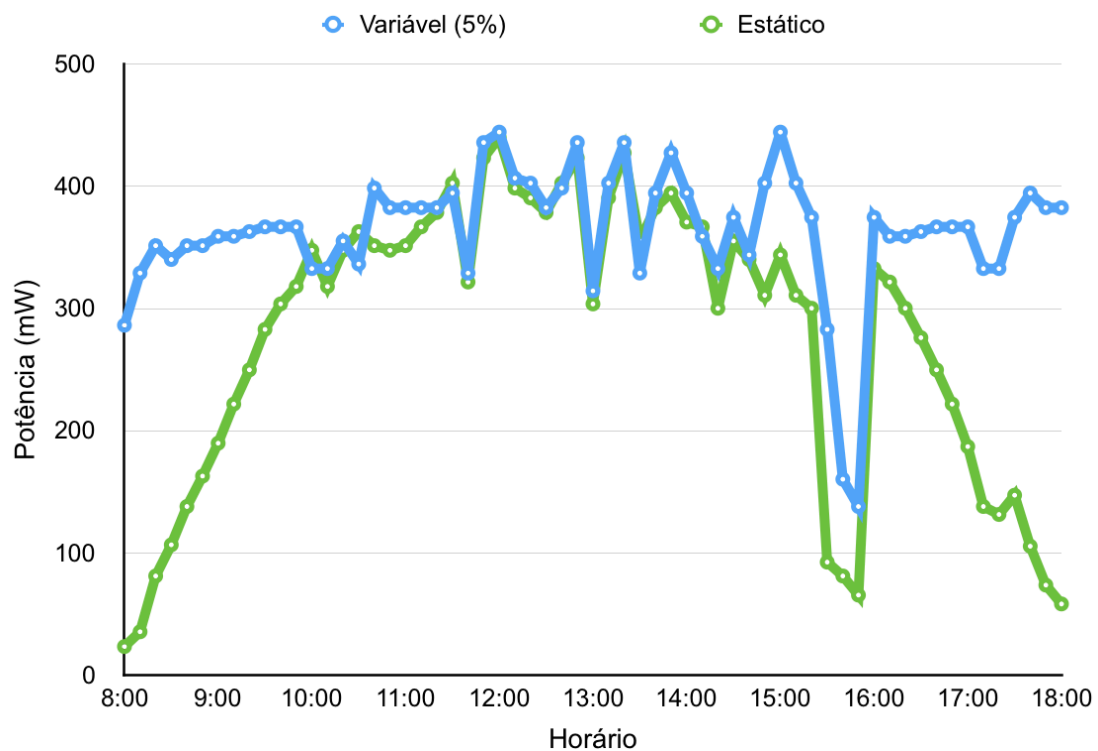


Figura 22 - Comparação do método variável de 5% e do método estático

4.3.2. Comparação entre métodos com rastreamento

A razão dos valores de ganho de energia fornecida pelo rastreamento com 1% de queda e do rastreamento com 5% de queda, revela um valor para comparação entre os métodos de rastreamento.

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{5\%}} = \frac{1,4355}{1,3120} \quad (19)$$

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{5\%}} = 1,0941$$

O método mais eficiente entre os propostos nesse trabalho é o com queda de 1%, ele é 9,41% mais eficiente.

4.3.3. Comparação entre os métodos por queda de potência e por LDR

A razão dos valores de ganho de energia fornecida pelo rastreamento caso caísse a potência em 1% e 5% e do rastreamento usando LDRs do trabalho do Trevelin, que é 39.2% mais eficiente que o fixo (Trevelin, 2014), resulta em um valor para comparação entre os métodos de rastreamento.

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{LDR}} = \frac{1,4355}{1,3920} \quad (20)$$

$$\frac{\eta_{1\%}}{\eta_{LDR}} = 1,0312$$

$$\frac{\eta_{5\%}}{\eta_{LDR}} = \frac{1,3120}{1,3920} \quad (21)$$

$$\frac{\eta_{5\%}}{\eta_{LDR}} = 0,9425$$

O método mais eficiente entre os propostos nesse trabalho é o LDR é o com rastreamento por queda de potência de 1% e ele é 3,12% mais eficiente, mas o método de rastreamentos de 5% é 5,75% menos eficiente.

4.4. Energia consumida

Sabendo que o Arduino consome 46,5mAh (Igor, 2013) funciona com 5V e que um motor, ligado à ele, consome 90mAh (Matthew, 2013), funciona com 5V também. O primeiro ajuste dura 18 minutos, os reajustes duram 45 segundos cada, os dois motores não funcionam ao mesmo tempo e o número máximo verificado de reajustes no sistema foi de 30 vezes por período de 10 horas, é possível fazer uma estimativa de quanta energia elétrica o sistema fotovoltaico com rastreamento irá consumir.

$$\begin{aligned} \text{Arduino: } 5 \text{ V} \cdot 46,5 \text{ mAh} &= 232,5 \text{ mWh} \quad (22) \\ 232,5 \text{ mWh} \cdot 10 \text{ h} &= 2,32 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Motor: } 5 \text{ V} \cdot 90 \text{ mAh} &= 450 \text{ mWh} \\ 18 \text{ min} + 30 \cdot 45 \text{ s} &= 0,675 \text{ h} \quad (23) \\ 450 \text{ mWh} \cdot 0,675 \text{ h} &= 303,75 \text{ mW} \end{aligned}$$

$$2,32 \text{ W} + 303,75 \text{ mW} = 2,63 \text{ W} \quad (24)$$

O Arduino consome 2,32 W e os motores consomem 303,75 mW em um dia de funcionamento, consumindo um total de 2,63 W por dia, ou seja, consumindo 262,87 mWh.

5. Conclusão

Pelos resultados obtidos nota-se que a geração de energia no método com rastreamento solar é maior do que a do método estático, como esperado. O método de varredura que se reajustava com quedas de potência de 1% gerou 43,55% mais energia elétrica que o método estático e foi 9,41% mais eficiente que o método com queda de 5%. O método de dois eixos com reajuste usando LDRs gerou 39,2% mais energia que o fixo (Trevelin, 2014), então esse método é 3,12% mais eficiente que o proposto no trabalho do Trevelin.

Neste trabalho, foi usado um painel solar de dimensões reduzidas que não produz muita energia elétrica, mesmo seu sistema sendo autossustentável. Em um painel solar residencial comercial, onde somente um módulo pode produzir 260 Wh (WEG, 2016), o consumo de energia pelo rastreamento seria proporcionalmente menor.

Para economizar energia, ao utilizar esse trabalho em maior escala, pode ser designado somente um painel como mestre, fazendo o rastreamento do sol, e os outros com escravos, recebendo a posição ideal para então se ajustar.

Também foi cumprido o objetivo do trabalho, aplicar em uma situação real os conhecimentos adquiridos no curso de engenharia elétrica, aplicando conceitos como construção de circuitos eletrônicos, programação de microcontroladores, e também aprofundando em áreas mais específicas como o uso da energia fotovoltaica e criação de peças para impressão 3D. Outra experiência obtida foi a de redigir um trabalho seguindo normas especificadas por um órgão competente, pode parecer uma experiência básica, mas é indispensável para o profissional no mercado de trabalho.

6. Sequência do Trabalho

Um possível avanço no trabalho é a aplicação desse rastreador solar em um sistema fotovoltaico de tamanho real, com painéis gerando centenas de watts, atentando as maiores dificuldades de instalação e manutenção por causa do uso de motores e partes móveis mais complexos. Assim, seria comprovado o aumento da eficiência desse projeto em relação a painéis estáticos em uma maior escala, caso o consumo seja realmente proporcionalmente menor. Um outro estudo seria sobre os gastos a mais com o material, a instalação e a manutenção do sistema com rastreamento.

Pode ser criado também um banco de dados para armazenar as melhores posições do dia e a cada dia aperfeiçoar esse banco para que o sistema, já sabendo a região do próximo melhor ponto, gaste menos energia fazendo varreduras. Esses dados podem ser gravados para o ano todo. Com esse banco de dados uma residência pode não precisar mais de varreduras, pois o sistema já saberá em quais pontos deve estar a cada hora e a cada dia do ano.

Referências Bibliográficas

ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil/ Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. - Brasília, 2005.

Appleyard, David. Solar Trackers: Facing the Sun. 2009. Disponível em: < <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html> > Acesso em: 10 de Novembro de 2016.

Arduino. Disponível em: <<http://arduino.cc>> Acesso em: 15 de Setembro de 2016.

Axaopoulos, P. J.; Fylladitakis, E. D. Energy and economic comparative study of a tracking vs. a fixed photovoltaic system. *European Scientific Journal*, v. 9, n. 12, 2013.

Braxin Soluções Sustentáveis. Disponível em: <<http://www.braxin.com.br/seu-telhado-serve-para-paineis-solares/>> Acesso em: 19 de Outubro de 2016.

de Paula, Sérgio Eduardo Alves. Estudo do Ganho de Energia Elétrica em Painéis Fotovoltaicos Usando Rastreamento Solar Baseado em Sistemas Embarcados / S. E. A. de Paula -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

do Nascimento, Cássio Araújo. Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica. Lavras, 2004. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf> Acesso em: 19 de Outubro de 2016.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

Igor. 02 de Setembro de 2013. Disponível em: <<http://gadgetmakersblog.com/arduino-power-consumption/>> Acesso em: 29 de Outubro de 2016.

INPE. Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Rüther. – São José dos Campos, 2006.

Karasinski, Vinicius. 13 de Maio de 2013. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/impressora-3d/39647-20-perguntas-e-respostas-sobre-impressoras-3d.htm>> Acesso em: 26 de Setembro de 2016.

Kiatronics. Disponível em: <<http://robocraft.ru/files/datasheet/28BYJ-48.pdf>> Acesso em: 19 de Outubro de 2016

Levitan, Dave. The Solar Efficiency Gap. 25 de Maio de 2012. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/the-solar-efficiency-gap>>. Acesso em: 10 de Novembro de 2016.

Matthew. 30 de Maio de 2013. Disponível em: <<http://projectsfromtech.blogspot.com.br/2013/05/stepper-motors-and-arduino-28byj-48.html>> Acesso em: 29 de Outubro de 2016

Nadiel Comércio. 13 de Maio de 2014. Disponível em: <<http://www.nadielcomercio.com.br/blog/2014/05/13/controlando-um-motor-de-passo-5v-com-arduino/>> Acesso em: 21 de Setembro de 2016.

Portal Energia. 05 de Janeiro de 2016. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>> Acesso em: 30 de Novembro de 2016.

Portal Solar. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em: 27 de Outubro de 2016

SILVA, Marcos Noé Pedro da. "Área sob uma Curva "; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/matematica/area-sob-uma-curva.htm>>. Acesso em: 13 de Novembro de 2016.

Trevelin, Felipe Camargo. Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos / Felipe Camargo Trevelin; orientador Edson Gesualdo. São Carlos, 2014.

WEG. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-solucoes-em-energia-solar-50038865-catalogo-portugues-br.pdf>> Acesso em: 01 de Novembro de 2016.

Apêndice A – Programa para rastreamento

```
#include <stdlib.h>
#include <CustomStepper.h>
#include <EEPROM.h>

//Define os parâmetros iniciais de ligação do motor
de passo
CustomStepper stepperl(8, 9, 10, 11, (byte[]){8,
B1000, B1100, B0100,
B0110, B0010, B0011, B0001, B1001},
4075.7728395, 12, CW);

CustomStepper stepperb(4, 5, 6, 7, (byte[]){8,
B1000, B1100, B0100,
B0110, B0010, B0011, B0001, B1001},
4075.7728395, 12, CW);

void setup() {

    //Abre comunicação serial
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(5000);
    Serial.println("TCC do Henrique");

    //Define a velocidade do motor
    stepperl.setRPM(12);
    //Define o numero de passos por rotacao
    stepperl.setSPR(4075.7728395);

    stepperb.setRPM(12);
    stepperb.setSPR(4075.7728395);

    pinMode(A0, INPUT);
    pinMode(13, OUTPUT);
}

int b = 0, l = 0, j = 0, MPSI = 0, MPSb = 0;
int x = 0, y = 0, c = 0, n = 0, resto = 0, addr = 0;
double tensao_a = 0, tensao_n = 0, r1 = 33280, r2 =
6780;
double corrente_a = 0, corrente_n = 0;
double potencia_a = 0, potencia_n = 0;

bool pontoMaximo = false;
double amostragem = 400;

void loop() {

    //Inicia a aquisição de potência do painel solar
    potencia_n = leitura();

    //registra o ponto máximo
    if(potencia_n > potencia_a){
        potencia_a = potencia_n;
        MPSI = l;
        y = l;
        MPSb = b;
        x = b;
        /*Serial.print("Ponto máximo: ");
        Serial.print(l);
        Serial.print(" x ");
        Serial.println(b);*/
    }

    //A cada 41 passadas reseta a direção do lado
    if(l==41){
        //volta para o ponto do lado inicial
        passoL(CCW, 533);
        l=0;

        passoB(CW, 26);
        b++;
    }

    //Depois de concluir as 20 passadas na base
    if(b==20){
        //Volta para o ponto da base inicial
        passoB(CCW, 520);
        b=0;
        pontoMaximo = true;
    }

    if(pontoMaximo){
        //vai para o ponto do lado com máxima tensão
        for(j=MPSI; j > 0; j--){
            passoL(CW, 13);
            delay(100);
        }
    }
}
```

```

        //Envia os valores lidos para a memória
EEPROM
    //Serial.println("enviando ");
    envio();
    estatico();

    //Caso a tensão diminua mais que 1% ou 5%,
    refaz a varredura completa
    //se não, continua em loop.
    double desvio = (potencia_a * .05);
    while(pontoMaximo){
        //Espera 10 minutos entre cada nova análise
        delay(540000);
        //Serial.println("Ponto máximo! ");
        potencia_n = leitura();

        if(potencia_n < potencia_a - desvio ||
        potencia_n > potencia_a + desvio){
            //começa uma varredura local para encontrar o
            novo melhor ponto
            passoL(CCW, 65);
            delay(100);
            passoB(CCW, 52);
            delay(100);
            l = 0;
            b = 0;
            potencia_a = 0;
            y -= 5;
            x -= 2;

            potencia_a = nova_varredura();
            desvio = potencia_a - (potencia_a * .05);
            // contador de quantas vezes o sistema
            reajustou
            c++;
        }
        //Envia os valores lidos para a memória a cada
        10 min
        //Salva valor com rastreamento
        envio();
        //Salva valor estético
        estatico();
        //Depois de 10 horas volta para a posição inicial
        e espera para ser desligado
        n++;
        resto = n % 63;
        if(resto == 0){

```

```

            termina();
        }
    }
}

passoL(CW, 13);
l++;
//Intervalo entre acionamentos
delay(200);
}

//Função para ativar o motor da base
void passoB(byte d, int a){
    delay(200);
    //Define o sentido de rotação (CW = Horário, CCW
    = Anti-Horário)
    stepperb.setDirection(d);
    //Define o angulo de rotação
    stepperb.rotateDegrees(a);

    while(!stepperb.isDone()){
        stepperb.run();
    }
    return;
}

//Função para ativar o motor do lado
void passoL(byte d, int a){
    delay(200);
    //Define o sentido de rotação (CW = Horário, CCW
    = Anti-Horário)
    stepperl.setDirection(d);
    //Define o angulo de rotação
    stepperl.rotateDegrees(a);

    while(!stepperl.isDone()){
        stepperl.run();
    }
    return;
}

//Função para leitura da tensão e corrente do painel
double leitura(){
    corrente_n = 0;
    tensao_n = 0;
    potencia_n = 0;
    for(int i=0; i < amostragem ; i++){

```

```

//Le o sensor no pino A0 e calcula a divisão da
tensão
double tensao_aux = analogRead(A0);
tensao_n += (tensao_aux * ((r1+r2) / r2));

delay(1);
}

//Calculo da tensão media considerando
sensibilidade de 5/1023
tensao_n = (tensao_n / amostragem) *
0.004887586;

//Calculo da corrente passando pelo resistor de
carga de 81.2 ohms
corrente_n = tensao_n / 0.0812;

//Calculo da potência
potencia_n = tensao_n * corrente_n;

//Mostra a leitura
/*Serial.print("Potência: ");
Serial.print(potencia_n);
Serial.println(" mW");
*/
return potencia_n;
}

//Função para varredura próxima ao ponto máximo
anterior
double nova_varredura(){

//Reinicia as variáveis
potencia_a = 0;
pontoMaximo = false;

//Faz a nova varredura
while(!pontoMaximo){

potencia_n = leitura();

//Registra o ponto máximo
if(potencia_n > potencia_a){
potencia_a = potencia_n;
MPSI = l;
MPSb = b;
}
}

```

```

//A cada 10 passadas reseta a direção do lado
if(l==10){
//Volta para o ponto do lado inicial
passoL(CCW, 130);
delay(100);
l=0;

passoB(CW, 26);
b++;
}

//Depois de concluir as 5 passadas na base
if(b==5){
//Volta para o ponto da base inicial
passoB(CCW, 130);
delay(100);
pontoMaximo = true;
}
passoL(CW, 13);
l++;
delay(100);
}
passoL(CCW, 13);
//Vai para o ponto do lado com máxima tensão
for(j=MPSI; j > 0; j--){
passoL(CW, 13);
delay(100);
}

//Volta para o ponto da base com máxima tensão
for(j=MPSb; j > 0; j--){
passoB(CW, 26);
delay(100);
}
y += MPSI;
x += MPSb;

return potencia_a;
}

//Função para armazenar dados na memória
EEPROM
void envio(){

delay(900);

//Lê o valor na entrada analógica e guarda em val
int val = analogRead(A0);

```

```
//Divide val que é um inteiro de 16 bits em dois
bytes
byte hiByte = highByte(val);
byte loByte = lowByte(val);
```

```
//Escreve o byte mais significativo de val na
EEPROM no endereço selecionado em addr
EEPROM.write(addr, hiByte);
```

```
//Escreve o byte menos significativo de val na
EEPROM no endereço selecionado em addr+1.
EEPROM.write(addr+1, loByte);
```

```
//Avança para o próximo endereço pulando de 2
em 2, pois estamos armazenando valores com dois
bytes cada
addr += 2;
```

```
}
```

```
void estatico(){
```

```
//Vai para o ponto do lado inicial
for(j=y; j > 0; j--){
    passoL(CCW, 13);
    delay(100);
}
```

```
//Vai para o ponto da base inicial
for(j=x; j > 0; j--){
    passoB(CCW, 26);
    delay(100);
}
```

```
//Vai para o ponto do lado com 21 graus
passoL(CW, 209);
```

```
//Envia os valores lidos para a memória EEPROM
//Serial.println("enviando 2 ");
envio();
delay(100);
```

```
//Vai para o ponto do lado inicial
```

```
passoL(CCW, 209);
delay(100);
```

```
//Volta para o ponto do lado máximo
for(j=y; j > 0; j--){
    passoL(CW, 13);
    delay(100);
}
```

```
//Volta para o ponto da base máximo
for(j=x; j > 0; j--){
    passoB(CW, 26);
    delay(100);
}
}
```

```
//Função para voltar ao ponto inicial e terminar o
programa
void termina(){
```

```
//Vai para o ponto do lado inicial
for(j=y; j > 0; j--){
    passoL(CCW, 13);
    delay(100);
}
//Vai para o ponto da base inicial
for(j=x; j > 0; j--){
    passoB(CCW, 26);
    delay(100);
}
```

```
//Deixa o LED do Arduino aceso
digitalWrite(13, HIGH);
```

```
//Salva o valor da contagem de reajustes na
posição 400 da memória
EEPROM.write(400, c);
```

```
while(1){
}
}
```

```

#include <EEPROM.h> // incluir a biblioteca

//Inicia lendo a partir do primeiro byte (endereço 0)
da EEPROM
int addr = 0; //Endereço de escrita na memória
byte value; //Valor lido da EEPROM
double r1 = 33280, r2 = 6780; //Resistências do
divisor
int n = 0, c = 0;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Inicializa o canal de
    comunicação serial
    Serial.println("variável:");
}

void loop(){

    //Lê o byte no endereço atual da EEPROM
    byte hiByte = EEPROM.read(addr);
    byte lowByte = EEPROM.read(addr + 1);
    value = word(hiByte, lowByte);

    //Calculo da tensao media considerando
    sensibilidade de 5/1023
    double tensao_n = (value * ((r1+r2) / r2)) *
    0.004887586;

    //Calculo da corrente passando pelo resistor de
    carga
    double corrente_n = tensao_n / 0.0812;

    //Calculo da potência
    double potencia_n = tensao_n * corrente_n;

    //Mostra a leitura
    //Serial.print("Tensão: ");

    Serial.print(tensao_n);
    //Serial.print(" V");
    Serial.print("\t");
    //Serial.print("Corrente: ");
    Serial.print(corrente_n);
    //Serial.print(" mA");
    Serial.print("\t");
    //Serial.print("Potência: ");
    Serial.println(potencia_n);
    //Serial.println(" mW");

    //Avança para o próximo endereço da EEPROM
    addr = addr + 4;

    //Quando ler todos os valores de um método
    retorna para o endereço 2, para ler os valores do
    outro método
    if (addr >= 270){
        addr = 2;
        Serial.println("estático:");
        n++;
    }

    if(n == 2){
        //Lê a quantidade de reajustes do sistema
        c = EEPROM.read(400);

        Serial.print("contagem: ");
        Serial.println(c);
        while(1){

        }
    }

    delay(5);
}

```

Apêndice C - Informações sobre impressão 3D

Para a impressão de um objeto, é preciso que ele tenha sido, primeiramente, construído em um software de edição 3D no computador, um exemplo é o *SOLIDWORKS*.

Existem dois materiais mais utilizados na impressão 3D, embora não sejam os únicos. O ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) é o material mais comumente utilizado, ele é bastante rígido e leve, apresentando um bom equilíbrio entre resistência e flexibilidade. O PLA (ácido polilático) é um polímero biodegradável feito de ácido láctico fermentado, ele é mais eficiente que o ABS em determinadas moldagens, pois tende a deformar menos depois da aplicação e libera menos fumaça ao atingir o seu ponto de fusão (Karasinski, 2013).

Como PLA é mais resistente, mais fácil de ser encontrado, mais barato e o objetivo desse trabalho não é o cálculo dos desgastes, ele foi usado para a impressão da base desse projeto.

Apêndice D - Peças impressas e suas medidas

Base:

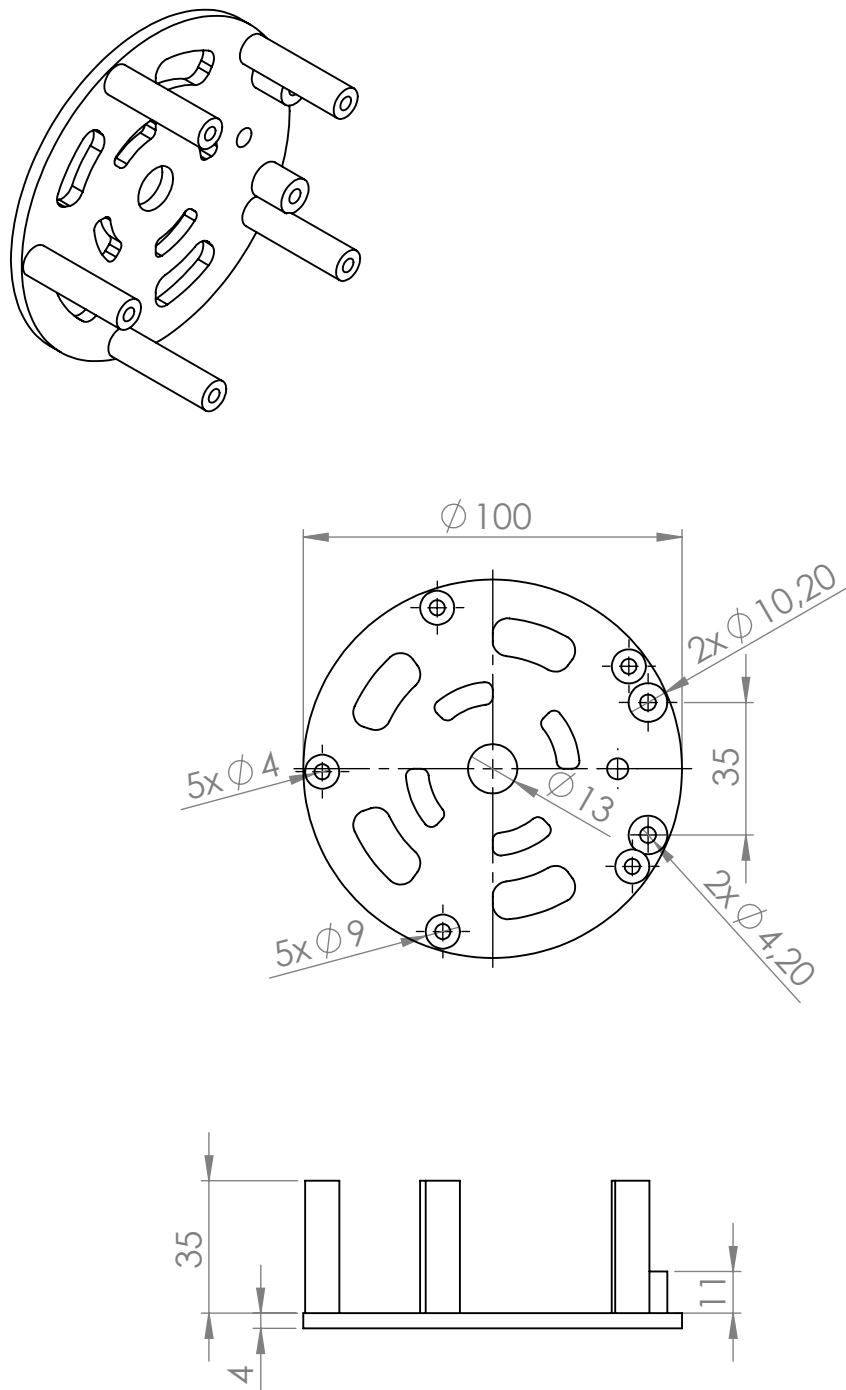


Figura 23 - Medidas da base

Bandeja:

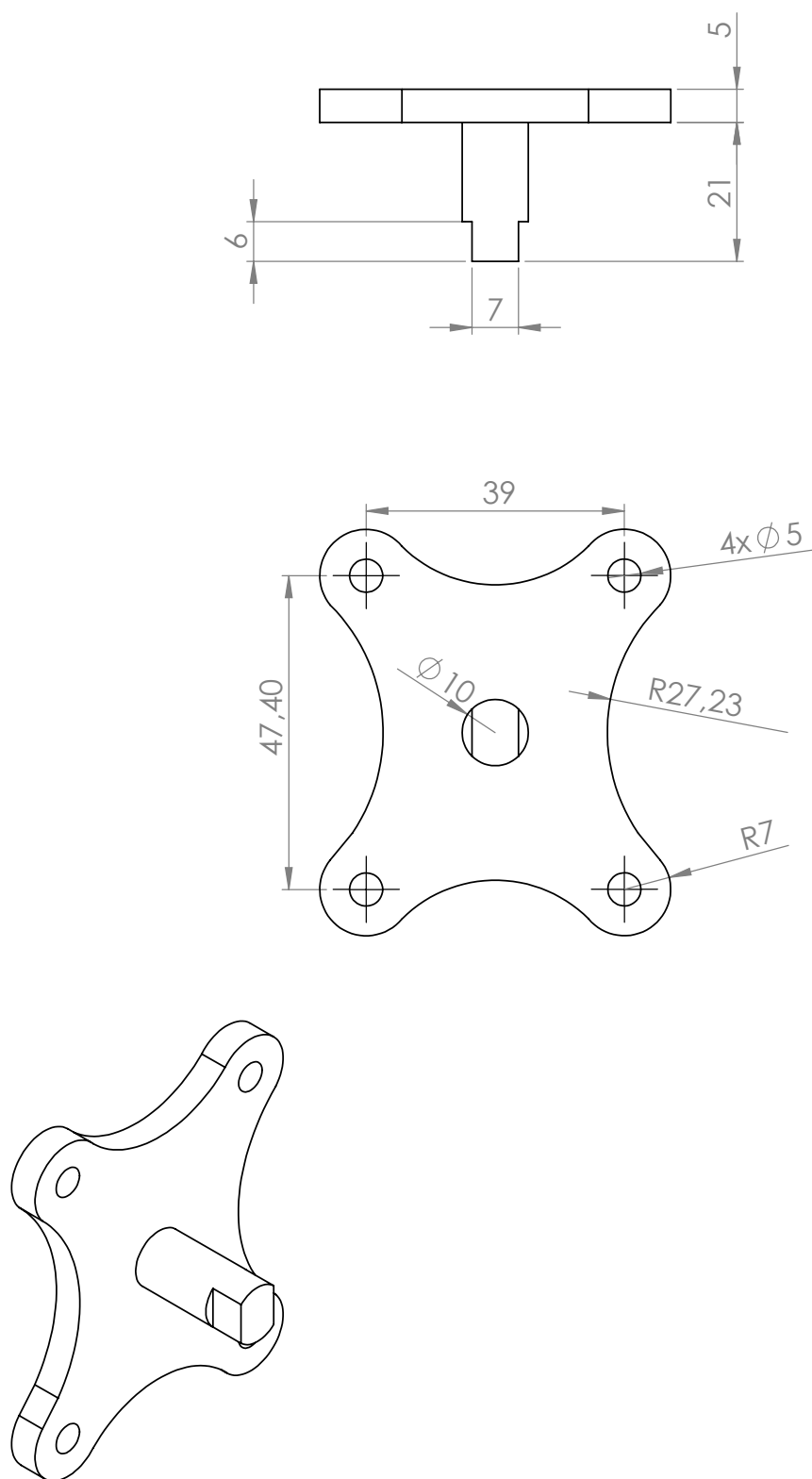


Figura 24 - Medidas da bandeja

Braço inferior esquerdo:

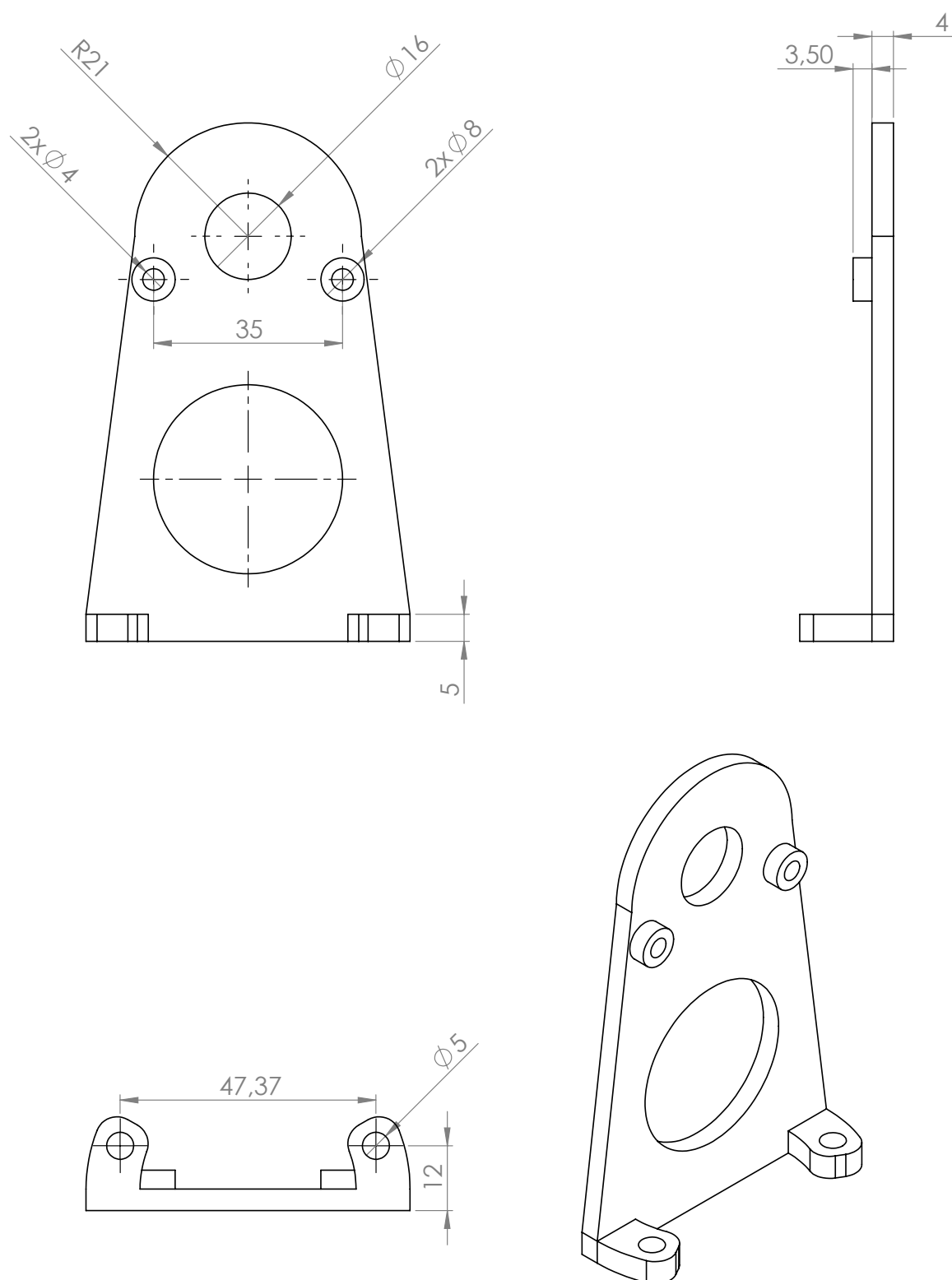


Figura 25 - Medidas do braço inferior esquerdo

Braço inferior direito:

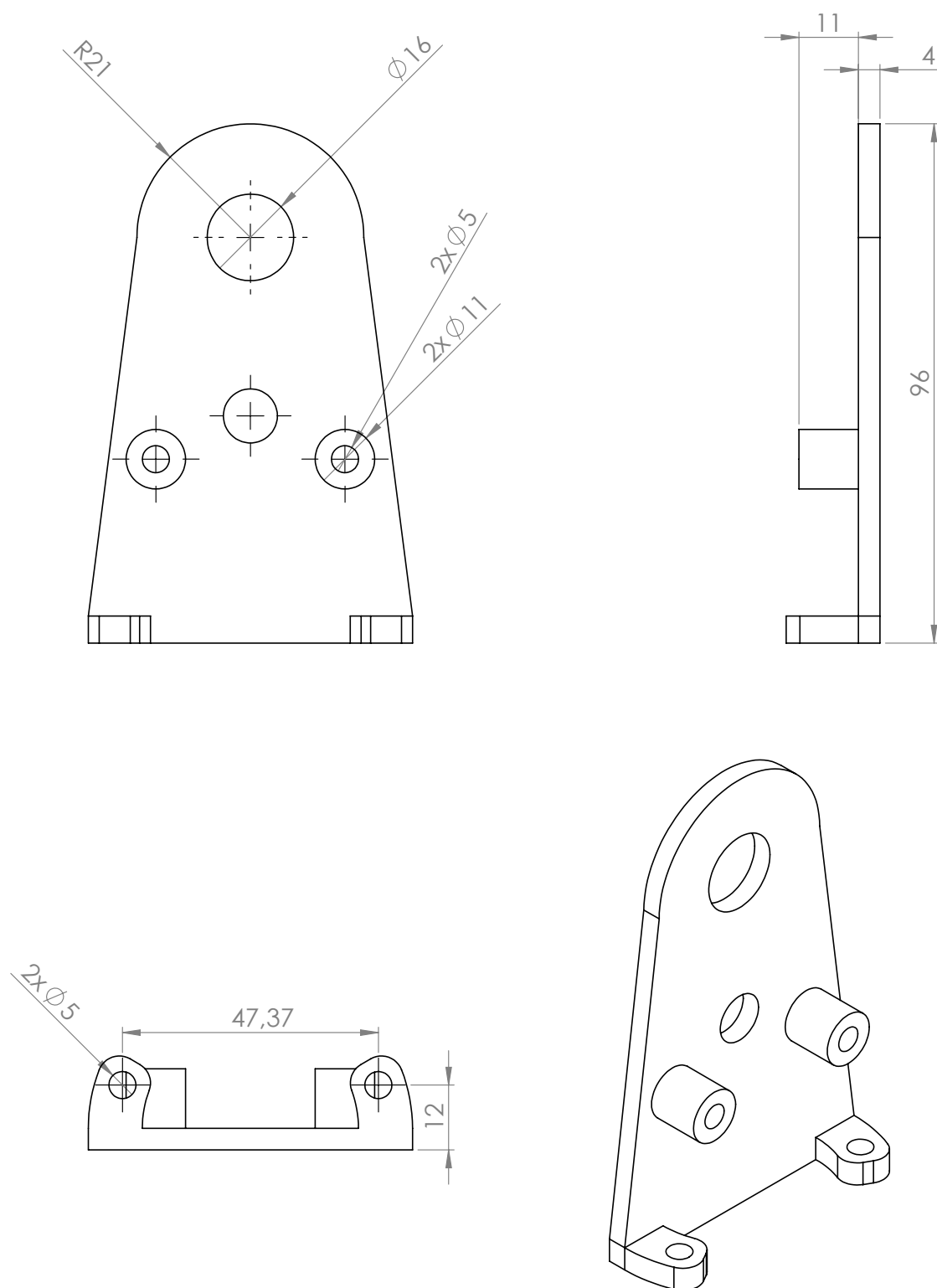
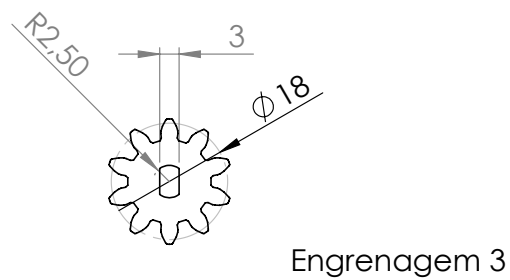
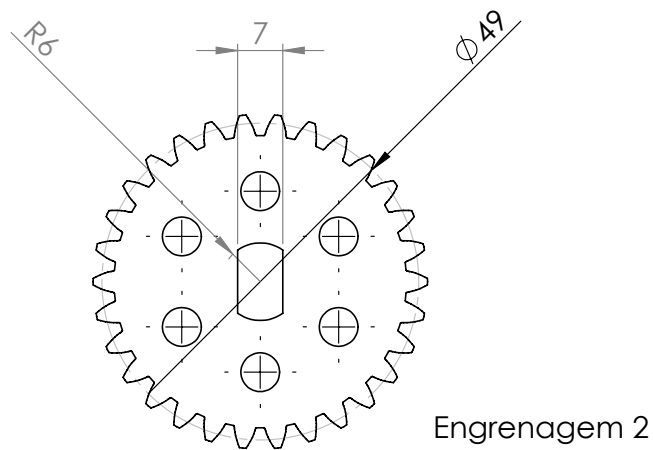
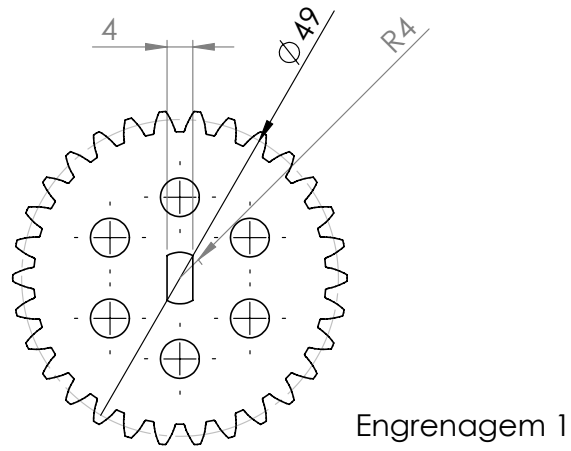


Figura 26 - Medidas do braço inferior direito

Engrenagens:



Engrenagens com espessura de 5mm

Figura 27 - Medidas das engrenagens

Braço superior:

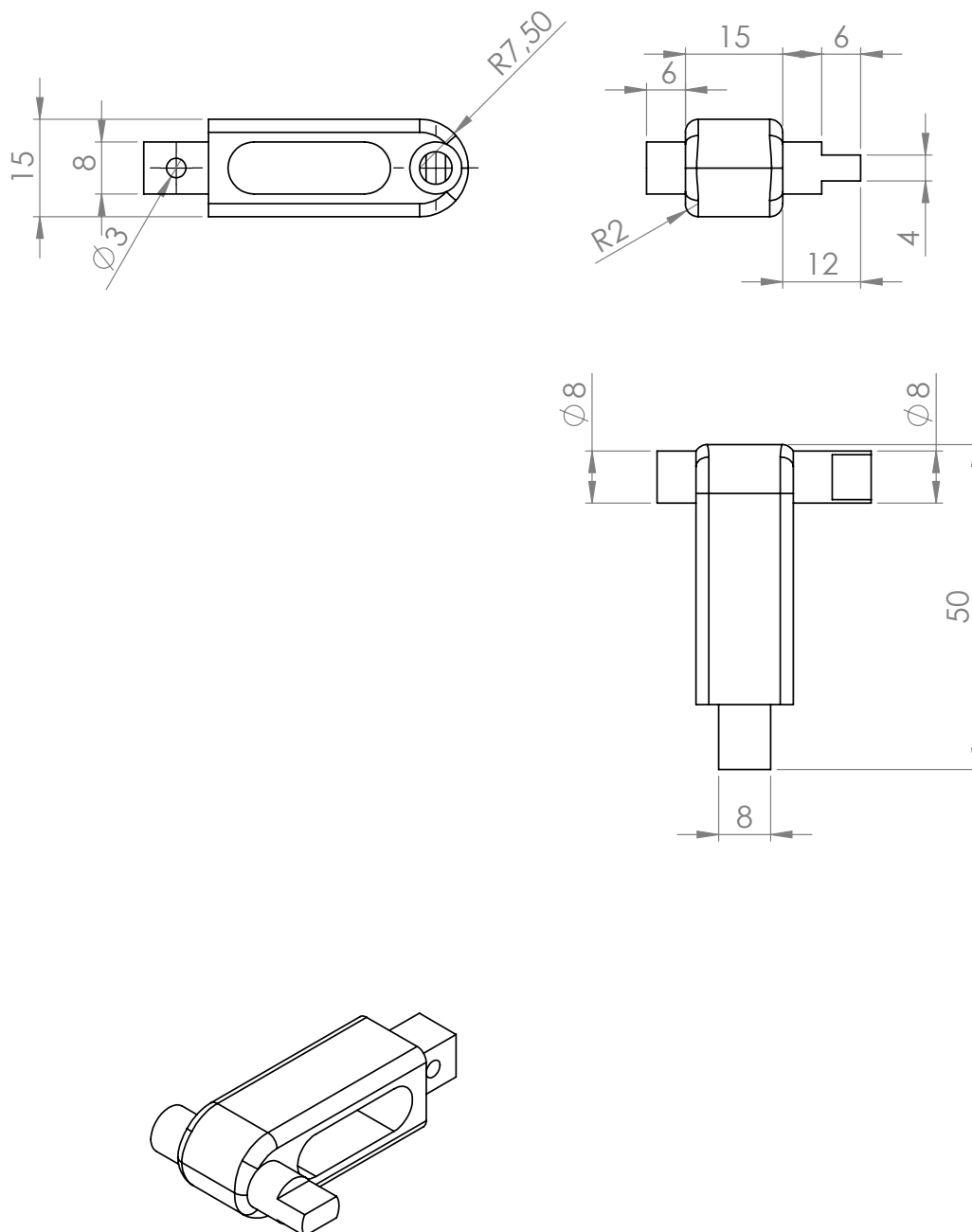


Figura 28 - Medidas do braço superior

Suporte da placa:

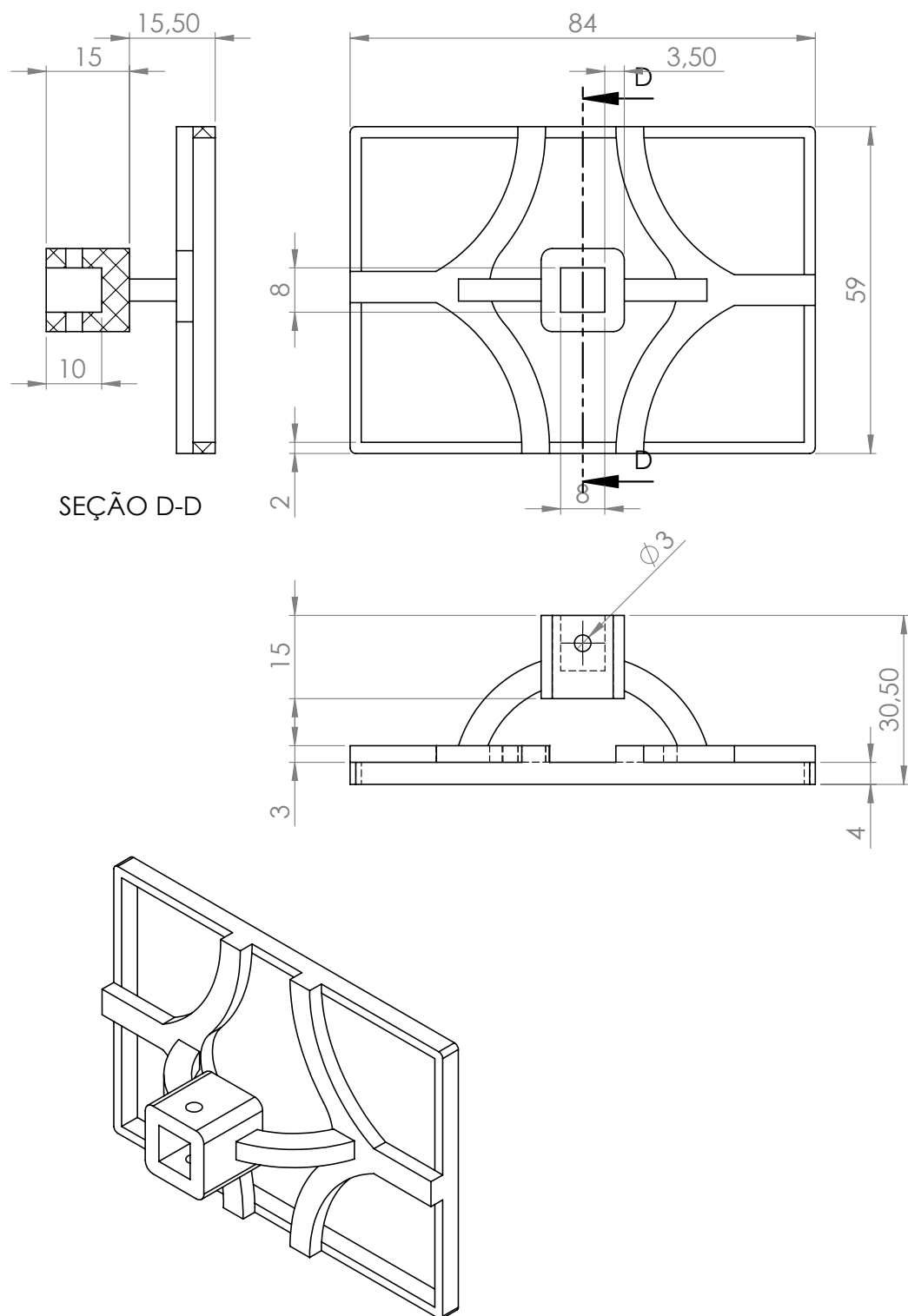


Figura 29 - Medidas do suporte da placa

Apêndice E - Tabelas com os valores de cada método

Tabela 3 - Dados do método estático no primeiro teste:

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8:00	1,13	13,87	15,62
8:10	1,53	18,84	28,82
8:20	2,18	26,84	58,51
8:30	2,45	30,17	73,91
8:40	2,93	36,08	105,71
8:50	3,21	39,48	126,54
9:00	3,46	42,60	147,41
9:10	3,61	44,46	160,48
9:20	3,90	48,01	187,18
9:30	4,25	52,28	221,94
9:40	4,51	55,48	249,94
9:50	4,74	58,33	276,24
10:00	4,94	60,82	300,32
10:10	5,11	62,95	321,77
10:20	5,20	64,02	332,77
10:30	5,37	66,15	355,32
10:40	5,43	66,86	363,00
10:50	5,49	67,57	370,77
11:00	5,63	69,35	390,54
11:10	5,68	69,89	397,02
11:20	5,54	68,28	378,61
11:30	5,37	66,15	355,32
11:40	5,63	69,35	390,54
11:50	5,45	67,24	366,49
12:00	5,69	70,06	398,59

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
12:10	5,37	66,12	355,08
12:20	5,63	69,35	390,54
12:30	5,11	62,95	321,77
12:40	5,20	64,02	332,77
12:50	5,63	69,35	390,54
13:00	5,57	68,64	382,57
13:10	5,92	72,91	431,62
13:20	5,69	70,06	398,59
13:30	5,89	72,55	427,42
13:40	5,63	69,35	390,54
13:50	5,60	69,00	386,54
14:00	5,57	68,64	382,57
14:10	5,54	68,28	378,61
14:20	5,60	69,00	386,54
14:30	5,60	69,00	386,54
14:40	5,54	68,28	378,61
14:50	5,54	68,28	378,61
15:00	5,57	68,64	382,57
15:10	5,57	68,64	382,57
15:20	5,54	68,28	378,61
15:30	5,34	65,79	351,51
15:40	5,34	65,79	351,51
15:50	5,20	64,02	332,77
16:00	4,51	55,48	249,94
16:10	4,25	52,28	221,94
16:20	4,25	52,28	221,94
16:30	4,39	54,06	237,29
16:40	4,30	52,94	227,68
16:50	3,90	48,01	187,18
17:00	3,71	45,68	169,47

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
17:10	3,53	43,47	153,45
17:20	3,36	41,37	139,00
17:30	3,22	39,65	127,67
17:40	2,94	36,20	106,43
17:50	2,44	30,03	73,23
18:00	2,21	27,21	60,13

Tabela 3 - Dados do método estático no primeiro teste

Tabela 4 - Dados do método estático no segundo teste:

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8:00	1,39	17,07	23,66
8:10	1,70	20,98	35,75
8:20	2,57	31,65	81,35
8:30	2,95	36,28	106,86
8:40	3,35	41,26	138,20
8:50	3,64	44,81	163,06
9:00	3,93	48,37	189,96
9:10	4,25	52,28	221,94
9:20	4,51	55,48	249,94
9:30	4,79	59,04	283,02
9:40	4,97	61,17	303,85
9:50	5,08	62,59	318,14
10:00	5,31	65,44	347,72
10:10	5,08	62,59	318,14
10:20	5,31	65,44	347,72
10:30	5,43	66,86	363,00
10:40	5,34	65,79	351,51
10:50	5,31	65,44	347,72
11:00	5,34	65,79	351,51
11:10	5,46	67,22	366,88

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
11:20	5,54	68,28	378,61
11:30	5,72	70,42	402,65
11:40	5,11	62,95	321,77
11:50	5,86	72,20	423,24
12:00	5,98	73,62	440,08
12:10	5,69	70,06	398,59
12:20	5,63	69,35	390,54
12:30	5,54	68,28	378,61
12:40	5,72	70,42	402,65
12:50	5,86	72,20	423,24
13:00	4,97	61,17	303,85
13:10	5,63	69,35	390,54
13:20	5,89	72,55	427,42
13:30	5,37	66,15	355,32
13:40	5,57	68,64	382,57
13:50	5,66	69,71	394,55
14:00	5,49	67,57	370,77
14:10	5,46	67,22	366,88
14:20	4,94	60,82	300,32
14:30	5,37	66,15	355,32
14:40	5,26	64,73	340,20
14:50	5,02	61,88	310,95
15:00	5,28	65,08	343,95
15:10	5,02	61,88	310,95
15:20	4,94	60,82	300,32
15:30	2,74	33,79	92,69
15:40	2,57	31,65	81,35
15:50	2,31	28,45	65,73
16:00	5,20	64,02	332,77
16:10	5,11	62,95	321,77

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
16:20	4,94	60,82	300,32
16:30	4,74	58,33	276,24
16:40	4,51	55,48	249,94
16:50	4,25	52,28	221,94
17:00	3,90	48,01	187,18
17:10	3,35	41,26	138,20
17:20	3,27	40,27	131,68
17:30	3,46	42,60	147,41
17:40	2,93	36,08	105,71
17:50	2,45	30,17	73,91
18:00	2,18	26,84	58,51

Tabela 4 - Dados do método estático no segundo teste

Tabela 5 - Dados do método de 1%:

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8:00	5,66	69,71	394,55
8:10	5,69	70,06	398,59
8:20	5,78	71,13	410,82
8:30	5,80	71,49	414,94
8:40	5,69	70,06	398,59
8:50	5,69	70,06	398,59
9:00	5,83	71,84	419,08
9:10	5,60	69,00	386,54
9:20	5,80	71,49	414,94
9:30	5,80	71,49	414,94
9:40	5,80	71,49	414,94
9:50	5,80	71,49	414,94
10:00	5,78	71,13	410,82
10:10	5,75	70,77	406,73

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
10:20	5,69	70,06	398,59
10:30	5,78	71,13	410,82
10:40	5,66	69,71	394,55
10:50	5,66	69,71	394,55
11:00	5,66	69,71	394,55
11:10	5,78	71,13	410,82
11:20	5,72	70,42	402,65
11:30	5,69	70,06	398,59
11:40	5,79	71,29	412,77
11:50	5,78	71,13	410,82
12:00	5,92	72,91	431,62
12:10	5,59	68,83	384,78
12:20	5,92	72,91	431,62
12:30	5,63	69,35	390,54
12:40	5,69	70,06	398,59
12:50	5,83	71,84	419,08
13:00	5,78	71,13	410,82
13:10	6,01	73,97	444,35
13:20	5,83	71,84	419,08
13:30	5,92	72,91	431,62
13:40	5,78	71,13	410,82
13:50	5,78	71,13	410,82
14:00	5,83	71,84	419,08
14:10	5,78	71,13	410,82
14:20	5,66	69,71	394,55
14:30	5,66	69,71	394,55
14:40	5,78	71,13	410,82
14:50	5,69	70,06	398,59
15:00	5,83	71,84	419,08
15:10	5,83	71,84	419,08

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
15:20	5,83	71,84	419,08
15:30	5,69	70,06	398,59
15:40	5,63	69,35	390,54
15:50	5,75	70,77	406,73
16:00	5,46	67,22	366,88
16:10	5,46	67,22	366,88
16:20	5,38	66,31	356,76
16:30	5,38	66,31	356,76
16:40	5,63	69,35	390,54
16:50	5,63	69,35	390,54
17:00	5,77	71,05	409,96
17:10	5,81	71,54	415,65
17:20	5,79	71,30	412,83
17:30	5,75	70,80	407,10
17:40	5,78	71,17	411,36
17:50	5,79	71,30	412,83
18:00	5,77	71,05	409,96

Tabela 5 - Dados do método de 1%

Tabela 6 - Dados do método de 5%:

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8:00	4,82	59,39	286,44
8:10	5,17	63,66	329,08
8:20	5,34	65,79	351,51
8:30	5,26	64,73	340,20
8:40	5,34	65,79	351,51
8:50	5,34	65,79	351,51
9:00	5,40	66,51	359,15
9:10	5,40	66,51	359,15

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
9:20	5,43	66,86	363,00
9:30	5,46	67,22	366,88
9:40	5,46	67,22	366,88
9:50	5,46	67,22	366,88
10:00	5,20	64,02	332,77
10:10	5,20	64,02	332,77
10:20	5,37	66,15	355,32
10:30	5,23	64,37	336,47
10:40	5,69	70,06	398,59
10:50	5,57	68,64	382,57
11:00	5,57	68,64	382,57
11:10	5,57	68,64	382,57
11:20	5,57	68,64	382,57
11:30	5,66	69,71	394,55
11:40	5,17	63,66	329,08
11:50	5,95	73,26	435,84
12:00	6,01	73,97	444,35
12:10	5,75	70,77	406,73
12:20	5,72	70,42	402,65
12:30	5,57	68,64	382,57
12:40	5,69	70,06	398,59
12:50	5,95	73,26	435,84
13:00	5,05	62,24	314,54
13:10	5,72	70,42	402,65
13:20	5,95	73,26	435,84
13:30	5,17	63,66	329,08
13:40	5,66	69,71	394,55
13:50	5,89	72,55	427,42
14:00	5,66	69,71	394,55
14:10	5,40	66,51	359,15

Hora	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
14:20	5,20	64,02	332,77
14:30	5,52	67,93	374,68
14:40	5,28	65,08	343,95
14:50	5,72	70,42	402,65
15:00	6,01	73,97	444,35
15:10	5,72	70,42	402,65
15:20	5,52	67,93	374,68
15:30	4,79	59,04	283,02
15:40	3,61	44,46	160,48
15:50	3,35	41,26	138,20
16:00	5,52	67,93	374,68
16:10	5,40	66,51	359,15
16:20	5,40	66,51	359,15
16:30	5,43	66,86	363,00
16:40	5,46	67,22	366,88
16:50	5,46	67,22	366,88
17:00	5,46	67,22	366,88
17:10	5,20	64,02	332,77
17:20	5,20	64,02	332,77
17:30	5,52	67,93	374,68
17:40	5,66	69,71	394,55
17:50	5,57	68,64	382,57
18:00	5,57	68,64	382,57

Tabela 6 - Dados do método de 5%