



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM
SEGUIDOR SOLAR AUTOMATIZADO**

**Autor: Vítor Umpierre Marinho
Orientador: Gerardo Antonio Idrobo Pizo**

**Brasília, DF
2021**



VITOR UMPIERRE MARINHO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SEGUIDOR SOLAR
AUTOMATIZADO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

**Brasília, DF
2021**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Marinho, Vitor Umpierre.

Análise de viabilidade econômica de um seguidor solar automatizado / Vitor Umpierre Marinho. Brasília: UnB, 2021. 65 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2021. Orientação: Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo.

1. Energia solar. 2. Seguidores solares. 3. Estudo de viabilidade I. Pizo, Gerardo Antonio Idrobo. II. Doutor em Sistemas Mecatrônicos.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



Vítor Umpierre Marinho

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 27/05/2021 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Marcelino Monteiro de Andrade, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr. Leandro Xavier Cardoso, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2021

AGRADECIMENTOS

Dedico e agradeço a minha esposa Livia Cristina de Souza Viol que tornou possível não só a produção deste trabalho mas também foi fundamental a minha formação como engenheiro. Agradeço minha mãe e minhas irmãs pelo apoio durante minha formação e em especial meu pai que sempre investiu na minha formação e acreditou que este trabalho fosse possível. Agradeço ao meu primo Murilo Marques Marinho pelos conselhos valiosos ao longo da minha formação. Por fim, ao prestativo professor Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo que me orientou e esteve sempre disponível.

RESUMO

A crescente demanda mundial por energia elétrica juntamente com o apelo ao uso de fontes renováveis têm estimulado a utilização da energia solar como uma das alternativas mais promissoras. O desenvolvimento de painéis com seguidores solares tem proporcionado incrementos na eficiência dos mesmos através da utilização de sistemas que sejam capazes de absorver a quantidade máxima possível de energia solar. Contudo, poucos estudos abordam o custo-benefício envolvido no incremento destes seguidores nestes sistemas. Deste modo, este estudo vislumbra desenvolver dois protótipos de suporte para painéis solares: um fixo e um móvel. Para isso, pretende-se analisar diferentes tipos de cenários (chuva, nuvens, neblina, sol intenso) e verificar quando o ajuste de ângulo é viável. Será feita uma projeção de retorno do investimento dos diferentes tipos seguidores em relação a uma eventual economia gerada com o aumento da eficiência e o custo de instalação e manutenção através da aplicação das metodologias TIR, VPL e Payback. Assim, este estudo poderá contribuir para uma tomada de decisão para a escolha de um sistema de painel solar mais adequado para cada situação.

Palavras-chave: Energia solar. Fontes renováveis. Painel solar. Estudo de viabilidade. Seguidores solares. Seguidor de dois eixos.

ABSTRACT

The growing demand for electric power along with the appeal for the use of renewable energy have been stimulating the usage of solar energy as one of the most promising alternatives. The development of solar panels with solar trackers has improved their efficiency by using the maximum possible quantity of solar energy. However, few studies approach the cost-benefit involved in implementing these trackers in these systems. This study aims to develop four prototypes of supports for solar panels: one stationary and one with a tracker. In order to do that, different scenarios will be analyzed (rain, clouds, fog, intense sunlight) and the viability of the angle adjustment will be verified. There will be a projection of the return of investment of different types of trackers in relation to an eventual economy generated with the rise of efficiency and the cost of installation and maintenance through the application of the methodologies IRR, NPV and Payback. Thereby, this study will be able to contribute with the decision-making regarding the choice of a solar panel system most adequate for each situation.

Keywords: Solar energy. Renewable energy. Solar panel. Feasibility Study. Solar tracker. Dual-axis tracker.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 ENERGIA SOLAR	7
1.1.1 Aspectos Globais	7
1.1.2 Aspectos Nacionais – Brasil	9
1.2. FUNCIONAMENTO DE UM PAINEL SOLAR	12
1.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA EFICIÊNCIA DE UM PAINEL SOLAR	13
1.3.1 Ângulo de incidência solar	13
1.3.2 Clima	17
1.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	19
1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO	19
2 OBJETIVOS	20
2.1 GERAIS	20
2.2 ESPECÍFICOS	21
3 METODOLOGIA	21
3.1 TIPOS DE PROTÓTIPOS.....	22
3.1.1 Fixo	22
3.1.2 Móvel	23
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.3 ANÁLISE DE DADOS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 CONSTRUÇÃO DO SEGUIDOR	27
4.1.1 Estrutura do Seguidor	27
4.1.2 Parte Eletrônica	33
4.1.3 Geração de Energia Fotovoltaica	37
4.2 PROGRAMAÇÃO DO SEGUIDOR	38
4.3 OBTENÇÃO DOS DADOS	41
4.4 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA	45
4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	46
4.5.1 VPL, TIR e Payback	47
4.5.2 Análise da inviabilidade	47
5. CONCLUSÕES	48
6. PROPOSTAS DE MELHORIA	49
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
9. APÊNDICE	55
APÊNDICE A - Código do Arduino	55
APÊNDICE B - Fotos	63

1. INTRODUÇÃO

A energia é necessária à vida e contribui fortemente para o desenvolvimento econômico e social de todo país (ISLAM et al., 2018). Neste sentido, o crescimento demográfico juntamente com o aumento de demanda por energia e avanços tecnológicos têm estimulado o desenvolvimento de sistemas que atendam a estas mudanças e que, ao mesmo tempo, sejam menos nocivas ao meio ambiente (NAGARAJA & PRASHANTH. , 2018;KANNAN & VAKEESAN, 2016).

A crescente demanda por recursos energéticos juntamente com o apelo ao uso de recursos renováveis e menos nocivos ao meio ambiente têm impulsionado o desenvolvimento de alternativas que sejam capazes de suprir tais necessidades. No entanto, para que tais alternativas sejam viáveis, estas devem satisfazer a relação custo-benefício quando comparados com os tipos de recursos energéticos tradicionais (RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT, 2018).

Nas últimas duas décadas, muitos países têm adotado políticas públicas para incentivar a população a utilizar recursos renováveis para a geração de energia. Especificamente para a energia solar, tais políticas visam, além de aumentar a produção energética, reduzir a dependência de combustíveis fósseis bem como os impactos ambientais negativos causados pelo uso desses (AZEVEDO et al., 2018). A redução de custo de produção dos módulos fotovoltaicos e dos inversores juntamente com os avanços tecnológicos também têm contribuído para o aumento significativo de instalação de sistemas fotovoltaicos no mundo (ARAUJO et al., 2018).

1.1 ENERGIA SOLAR

1.1.1 Aspectos Globais

O sol é a principal fonte de energia responsável pela vida na Terra. Apesar do planeta estar a 90 milhões de quilômetros de distância, leva menos de 9 minutos para que a energia do sol alcance a Terra (10 INSANE SOLAR ENERGY STATS, 2018).

A indústria espacial foi uma das primeiras a adotar a tecnologia solar, que ocorreu na década de 1960. A tecnologia solar era utilizada para fornecer energia a bordo de espaçonaves. O Vanguard 1, por exemplo, foi o primeiro satélite artificial da

Terra alimentado por células solares e continua sendo o mais antigo satélite artificial em órbita, registrando mais de 6 bilhões de quilômetros (10 INSANE SOLAR ENERGY STATS, 2018). Principalmente nas últimas duas décadas estudos envolvendo células solares têm sido crescentes devido à sua renovabilidade e natureza limpa (ISLAM et al., 2018; HAFEZ et al., 2017).

A tecnologia fotovoltaica é um meio importante para produzir energia elétrica a partir de um painel solar submetido à exposição da luz do sol incidida durante a parte do dia. Porém, os principais limitantes da utilização de painéis solares fotovoltaicos são a eficiência considerada baixa (cerca de 23,8% em laboratório), custo de fabricação ainda elevado e dependência de fatores ambientais, tais como localização, clima, ventos e etc (GREEN et al., 2020).

Nas últimas décadas, a utilização de células solares como fonte de energia tem apresentado um elevado crescimento mundial devido ao aumento na sua eficiência de conversão bem como sua acessibilidade. A quantidade de material utilizado para células de silício foi reduzida significativamente, cerca de 4 vezes menos, durante os últimos 13 anos devido ao aumento da eficiência na produção (PHOTOVOLTAICS REPORT, 2018).

Com relação ao custo benefício, o preço de um painel solar em 1975 era cerca de 227 vezes maior do que o de 2018, o que correspondia a 101,5 dólares/ watt e, mais recentemente a 0,447 dólares/watt. Vale ressaltar que um kW de energia gerada a partir de painéis solares evita que 68 kg de carvão sejam extraídos, 136 kg de CO₂ sejam emitidos e 400 litros de água sejam consumidos (10 INSANE SOLAR ENERGY STATS, 2018).

Outro fator favorável é que o aumento da demanda por células solares tem contribuído para a geração de empregos. A indústria de energia solar dos EUA, por exemplo, gerou mais empregos em 2015 do que as indústrias extração de gás e de oleoduto de petróleo. Além disso, ela cresceu 12 vezes mais rápido que a economia dos EUA como um todo (10 INSANE SOLAR ENERGY STATS, 2018). Em 2020, o número de americanos atuantes na área de energia solar foi de cerca de 230.000 trabalhadores (SOLAR INDUSTRY RESEARCH DATA, 2021.).

Assim, a energia fotovoltaica é um mercado em rápido crescimento. De acordo com The Compound Annual Growth Rate (CAGR), as instalações de células PV no mundo cresceram 35% entre o ano de 2010 a 2019 (PHOTOVOLTAICS REPORT, 2018).

Com relação à eficiência das células PV testadas em laboratório, atualmente, essas são de até:

- 26,7% para silício mono-cristalino
- 22,3% para tecnologia baseada em Si-wafer multi-cristalino.
- 23,4% para tecnologia de filme fino (CIGS) e de e 21,0% para CdTe (PHOTOVOLTAICS REPORT, 2018).

Quanto ao tempo de retorno do investimento feito para a utilização da energia dos sistemas fotovoltaicos, esta depende de vários fatores, dentre eles a localização geográfica. Os sistemas fotovoltaicos no norte da Europa necessitam de cerca de 1,5 anos para equilibrar a energia de entrada, enquanto o tempo de retorno de energia para sistemas de CPV no Sul da Europa pode ser inferior a 1 ano dependendo da tecnologia utilizada. Para se ter uma ideia do potencial desse tipo de energia, um sistema fotovoltaico localizado na Sicília com módulos multi-Si possui tempo de retorno de cerca de um ano. Assumindo 20 anos de vida útil, esse tipo de sistema pode produzir vinte vezes a energia necessária para produzi-lo (PHOTOVOLTAICS REPORT, 2018).

1.1.2. Aspectos Nacionais - Brasil

O Brasil, devido a sua vasta região territorial e localização privilegiada recebe energia solar durante todos os dias do ano. Além disso, algumas regiões do país apresentam características geográficas e climáticas favoráveis para o desenvolvimento deste tipo de energia.

De acordo com dados disponíveis no Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), as principais fontes energéticas utilizadas no país são

a hídrica, seguido por eólica e biomassa, conforme mostra o gráfico da **Figura 1**. (ABSOLAR, PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO, 2021).

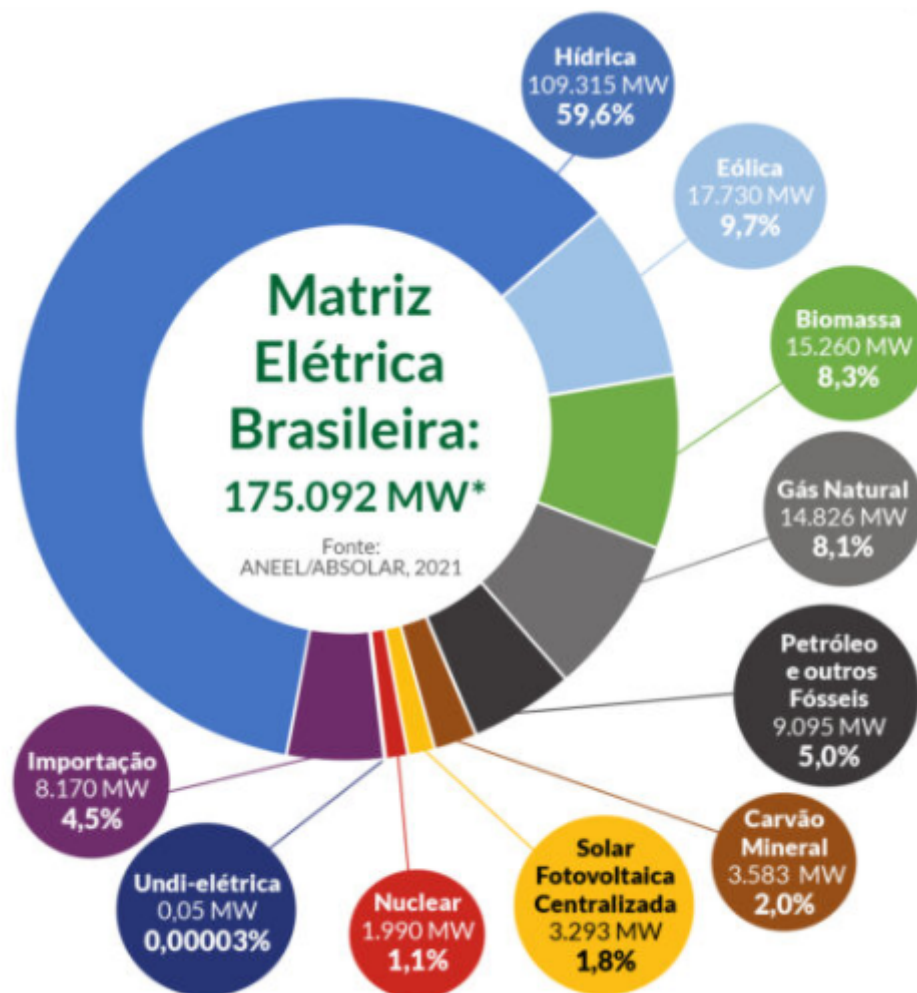


Figura 1. Matriz elétrica brasileira em abril de 2021.

Fonte: (PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO, 2021)

Conforme mostra a **Figura 1**, apesar da geração de energia no Brasil a partir de painéis solares ser ainda inexpressiva (1,8%), tem havido um expressivo aumento por sua utilização principalmente a partir de 2016, conforme apresenta a **Figura 2**. Tal crescimento está relacionado à maior acessibilidade aos componentes fotovoltaicos e incentivos fiscais (ARAUJO et al., 2018; GASPARIN & KRENZINGER, 2017).

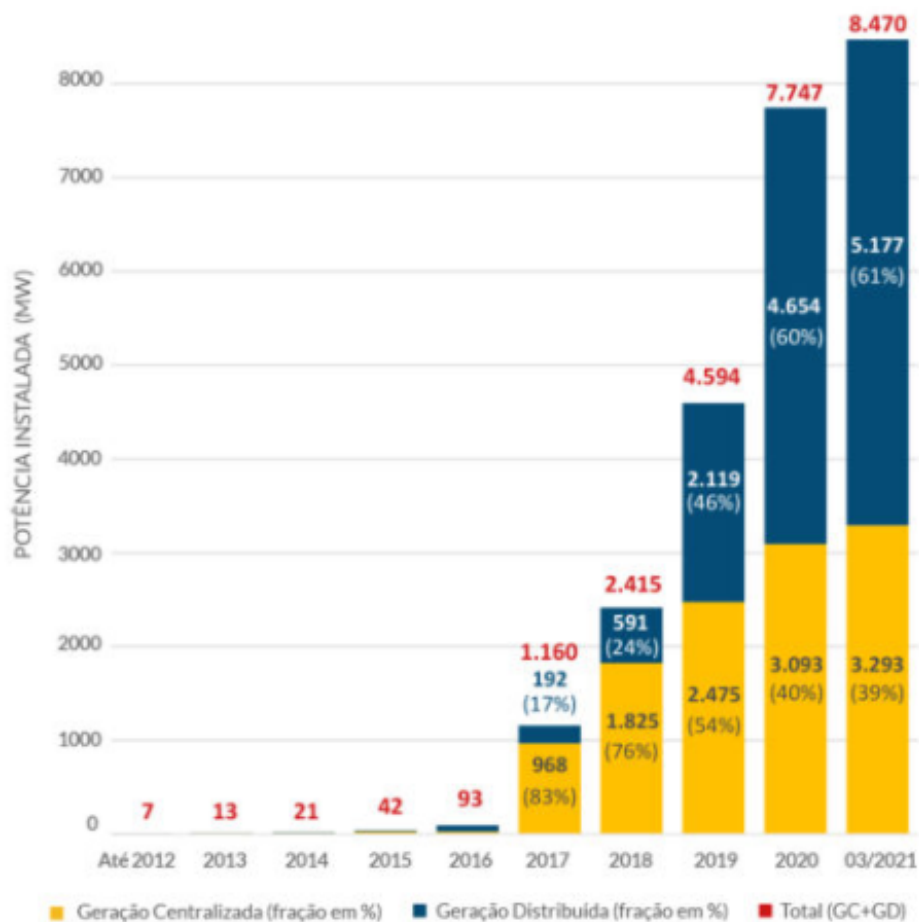


Figura 2. Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil. Fonte: (PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO, 2021).

A mesma fonte afirma que o Brasil tem 5.177,0 megawatts (MW) de geração solar distribuída no total em todo o país em 438.035 sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede e distribuídos em 546.927 unidades consumidoras. Desde 2012, já foram alcançados mais de 8,4 GW operacionais. (PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO, 2021).

No Brasil, a microgeração e a minigeração de energia solar fotovoltaica distribuídas foram regulamentadas pela resolução 482/2012 e 687/2015 da ANEEL (GASPARIN & KRENZINGER, 2017). No entanto, ainda há uma barreira à inserção dessa tecnologia no mercado brasileiro principalmente devido à falta de incentivo e metas para o seu desenvolvimento e custos associados (AZEVEDO et al., 2018).

Uma das medidas para o incentivo ao uso de sistemas PV no Brasil foi publicada em Julho de 2020 nas Resoluções Nº 69 e Nº 70, da Câmara de Comércio

Exterior (Camex), (RESOLUÇÃO Nº 69, DE 16 DE JULHO DE 2020). Tal medida incluiu uma lista contendo mais de 110 componentes, tais como inversores fotovoltaicos, conversores estáticos para sistemas solares, amortecedores de trackers, que passariam a estar isentos de impostos de importação até o final de 2021. Vale destacar que na referida lista inclui os rastreadores solares, o que ressalta sua importância e potencial aplicabilidade. Quanto à cadeia produtiva, de acordo com a quantidade de fabricantes do setor solar fotovoltaico cadastrado na Agência Especial de Financiamento Industrial (FINAME) do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), 10 desses estão dedicados à fabricação de rastreadores solares, o que também é um indicativo da importância de seu uso (PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO, 2021).

1.2 FUNCIONAMENTO DE UM PAINEL SOLAR

A conversão de luz solar em eletricidade ocorre pela utilização de uma célula fotovoltaica composta basicamente por três camadas, conforme representado na Figura 3.

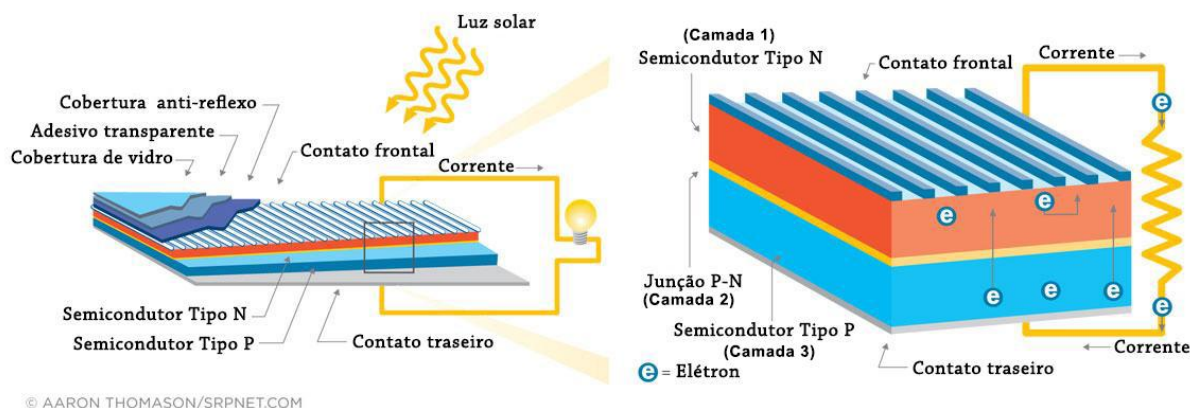


Figura 3. Funcionamento de um painel solar.

Fonte: Adaptação de HOW SOLAR PANELS WORK, 2019

- Camada 1 (P): camada inferior composta basicamente por um semicondutor tipo N como silício dopado com boro. Esta camada é denominada de "P" pois é a que ficará positivamente carregada e apresenta lacunas em excesso.
- Camada 2 (central ou junção P-N): Região em que um campo elétrico é produzido e que permite somente a passagem de elétrons da camada P para a camada N.

- Camada 3 (N): camada superior composta basicamente por um semiconductor tipo N como silício dopado com fósforo. Esta camada é chamada de "N" pois é negativamente carregada e apresenta elétrons em excesso.

Quando os fótons presentes na luz solar atingem a camada N de uma célula solar, parte da energia que é absorvida por alguns elétrons presentes nessa camada faz com que ele saia do átomo semiconductor e passe a fazer parte de uma corrente elétrica que flui na junção P-N, em um circuito elétrico. A saída desse elétron resulta na formação de uma "lacuna" para que outro elétron a ocupe. Assim, quando as camadas P e N são intercaladas, ocorre a formação de um campo elétrico induzido na junção P-N a partir da passagem dos elétrons presentes na camada tipo N para a camada tipo P. Portanto, o campo elétrico induzido permite que os elétrons saltem para a superfície e os tornem disponíveis para o circuito elétrico. Simultaneamente, as lacunas geradas se movem na direção oposta (positiva) e ficam disponíveis para serem ocupadas por elétrons livres. (COMO A CÉLULA FOTOVOLTAICA FUNCIONA, 2018).

1.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA EFICIÊNCIA DE UM PAINEL SOLAR

A eficiência de um painel solar depende de diversos fatores como a orientação do painel solar e os fatores climáticos da região são as variáveis que mais influenciam na obtenção máxima da energia dos painéis solares, uma vez que os raios solares variam conforme o movimento do sol durante o dia (TAN & CHUA, 2018).

1.3.1. Ângulo de incidência solar

O sol nasce do lado Leste e se põe do lado Oeste, porém nem sempre na mesma posição, além disso, o sol nem sempre faz o mesmo ângulo com o horizonte ao longo do ano devido a inclinação da órbita terrestre e os movimentos de rotação e translação. Por isso a escolha da inclinação de um painel solar não é algo trivial.

Para localizar o sol em qualquer ponto da terra utiliza-se 2 ângulos, inclinação (*Zenith*) e direção (*Azimuth*). De maneira simples, a inclinação representa a altura e o

Azimuth a direção do sol, utilizando o mesmo princípio das coordenadas esféricas como representado na **Figura 4**.

Os painéis solares têm sua maior eficiência quando o ângulo de inclinação (*Zenith*) é de 90° em relação ao Sol (DUFFIE & BECKMAN,1991).

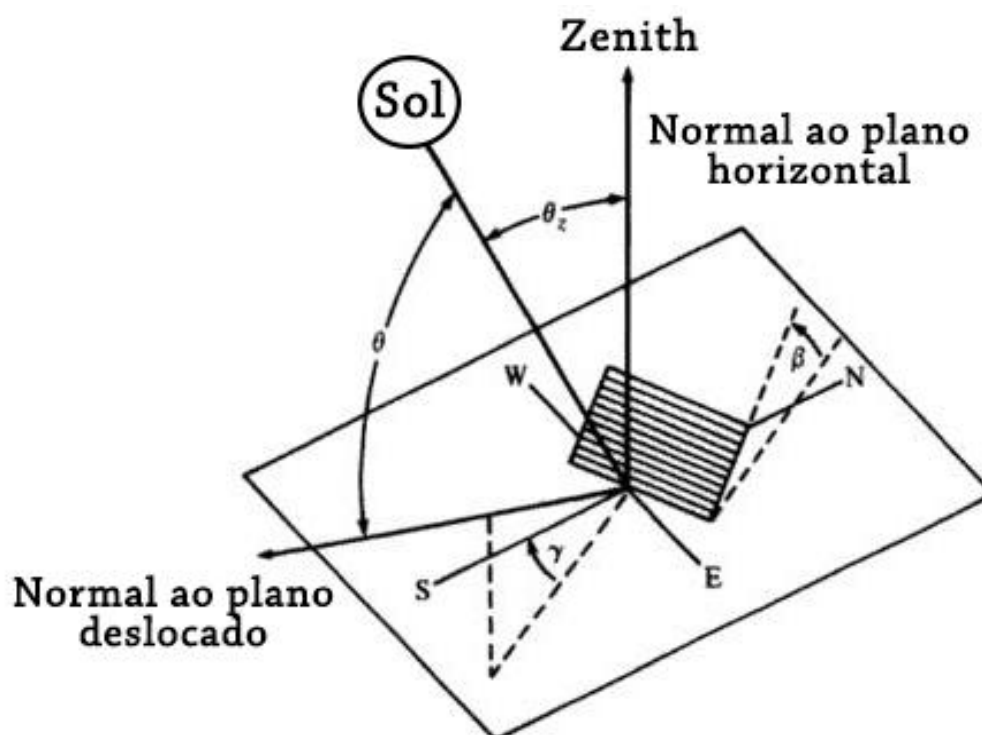


Figura 4. Orientação solar (Ângulo Zenith θ_z , ângulo de incidência θ , inclinação ϕ e Azimuth γ). Fonte: (TWIDELL & WEIR, 2005).

Geralmente quando um painel é instalado, a indicação é que a inclinação seja aproximadamente 15° maior que a latitude do local durante o inverno e 15° menor no verão para um maior aproveitamento durante o ano mas para o instalações pessoais o ângulo é fixo o ano inteiro por conta de dificuldade de alteração do ângulo (DUFFIE & BECKMAN,1991).

Estudos mostram que, dependendo da latitude em que os painéis se encontram, a mudança de ângulo pode ter uma diferença significativa. O cálculo realizado em OPTIMUM TILT OF SOLAR PANELS (2018) para uma latitude de 40° ao norte (Espanha, Portugal, EUA, Japão e China) representado na **Tabela 1**, mostra uma diferença de 28,9% em relação ao seguidor solar de 2 eixos e 4,1% em relação a dois ajustes por ano. Pode-se perceber que a diferença entre 2 ajustes e 4 ajustes é de

apenas 0,5%, não justificando o possível gasto e transtorno (OPTIMUM TILT OF SOLAR PANELS, 2018).

Tabela 1. Eficiência dos painéis em relação ao seguidor de dois eixos.

	Fixo	2 Ajustes anuais	4 Ajustes anuais	Seguidor de 2 eixos
Porcentagem em relação à maior otimização	71.1%	75.2%	75.7%	100%

Fonte: (OPTIMUM TILT OF SOLAR PANELS, 2018)

Tal diferença pode ser melhor representada de acordo com o gráfico da **Figura 5**. A linha vermelha representa 4 ajustes anuais, a linha verde com um seguidor de 2 eixos, a linha azul se o painel ficar fixo o ano inteiro e a linha roxa caso ele fique o ano inteiro na posição de inverno.

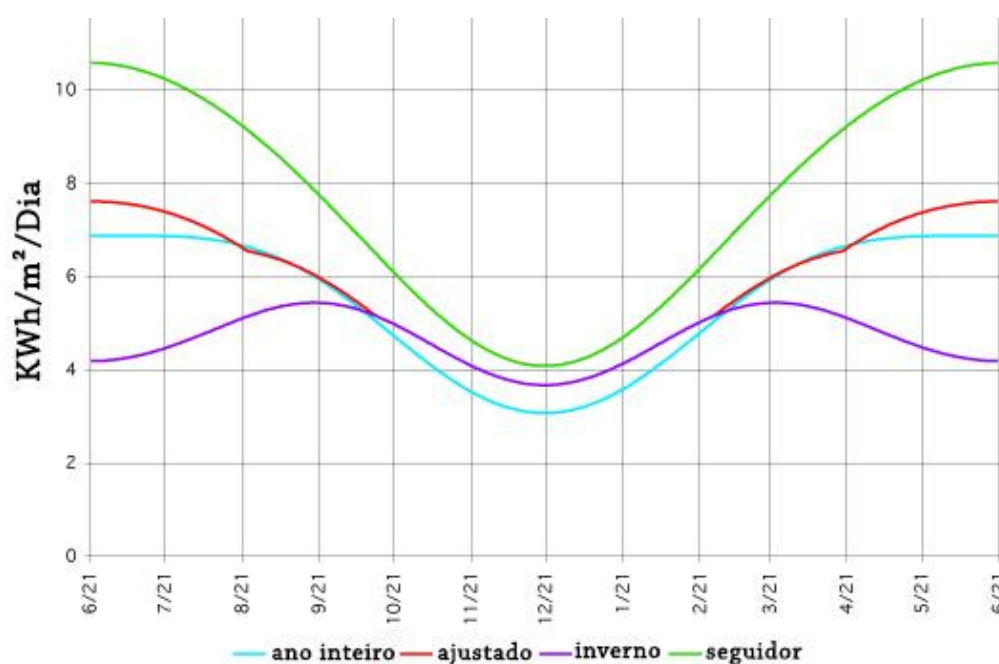


Figura 5. Geração de energia solar ao longo do ano.
Fonte: (OPTIMUM TILT OF SOLAR PANELS, 2018).

De acordo com o gráfico da **Figura 5**, a diferença de geração de energia entre os painéis fixos e o painel com seguidor é menor no centro (inverno) e maior nas laterais. Tal diferença pode ser explicada por conta da variação de altitude do sol ao longo do ano (**Figura 6**), de modo que, quanto menor a variação de altitude maior será a captação de energia solar com os painéis fixos (STINE & GEYER, 2018).

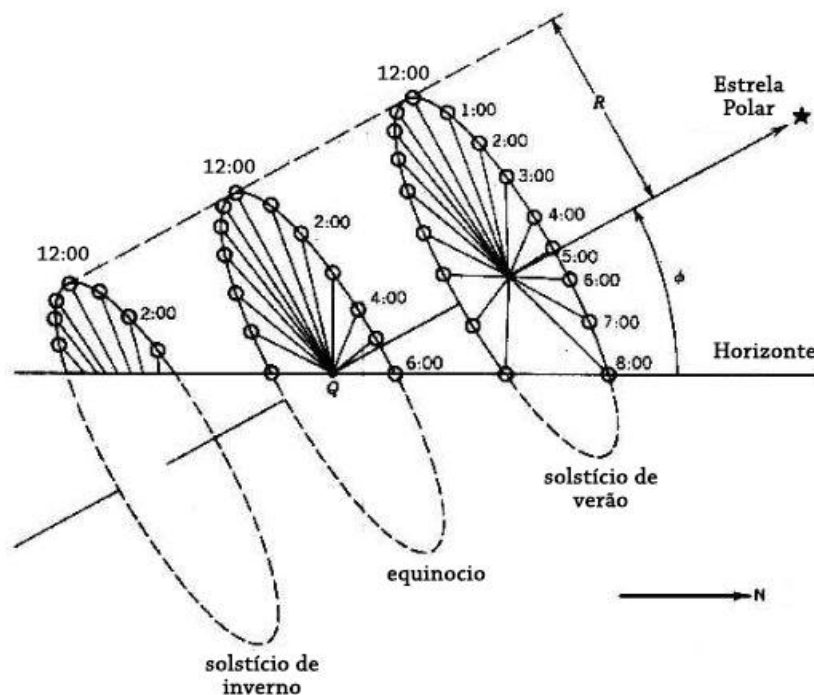


Figura 6 Variação da altitude do sol ao longo do ano. Fonte:(STINE & GEYER, 2018).

O gráfico a seguir (**Figura 7**) mais uma vez demonstra que mesmo com o posicionamento do *Azimuth* adequado a eficiência ainda é muito inferior ao seguidor de dois eixos. Desta vez em um comparativo durante um dia, o painel virado para o sul sem seguidor (azul escuro) representa 75,36% do seguidor de dois eixos (SOLAR PHOTOVOLTAIC OUTPUT DEPENDS ON ORIENTATION, TILT, AND TRACKING, 2018).

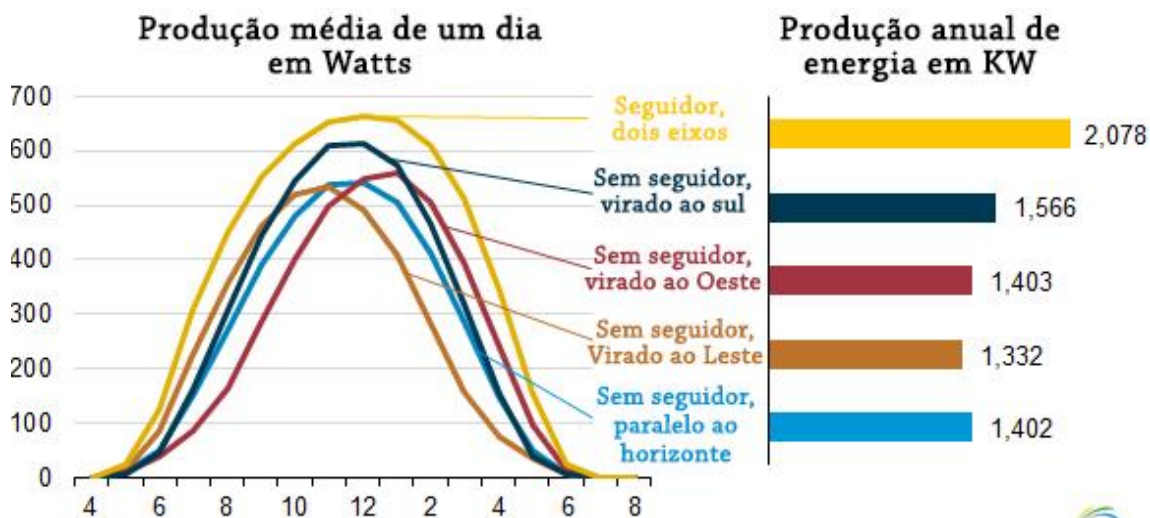


Figura 7. Simulação da produção de energia de um painel com 1 KW de capacidade em Los Angeles, EUA. Fonte: (SOLAR PHOTOVOLTAIC OUTPUT DEPENDS ON ORIENTATION, TILT, AND TRACKING, 2018).

Tais estudos mostrados nos dois gráficos anteriores (**Figuras 6 e 7**) foram baseados em simulações de situações ideais, não levando em consideração as condições climáticas e suas influências, além de não terem sido contabilizados os gastos energéticos na mudança de inclinação. Porém pode-se observar um aumento na geração de energia solar tanto na mudança do *Zenith* quanto do *Azimuth*. Por isso a importância de um seguidor de dois eixos, capaz de acompanhar o sol no plano vertical e horizontal.

No caso da utilização de painéis fixos, a receptividade da energia luminosa fica limitada ao ângulo de incidência. Devido a esta variação, nem sempre toda a energia incidida é recebida por um painel fixo. Uma das estratégias para aumentar a eficiência de uma placa solar é a utilização de seguidores solares. Tais sistemas são capazes de movimentar as placas de modo a aumentar a quantidade de luz recebida (NAGARAJA & PRASHANTH, 2018).

No estudo realizado por Nagaraja & Prashanth (2018), quando comparado a um painel solar fixo, foi verificado um incremento de 17,72% de energia quando utilizado um sistema contendo um seguidor solar (NAGARAJA & PRASHANTH, 2018). Outros estudos indicam que ajustes em tempos determinados (mensais, quadrimestrais, semestrais etc) nos ângulos de inclinação podem aumentar o ganho energético (TAN & CHUA, 2018).

De acordo com Khorasanizadeh e colaboradores (2014), foi observado um aumento de eficiência de até 23,15% quando utilizado o ângulo de incidência ajustado e otimizado no estudo quando comparado à placa mantida na horizontal (KHORASANIZADEH et al., 2014).

1.3.2. Clima

As condições climáticas e intemperismos também são fatores que alteram a eficiência dos painéis solares, dentre elas nuvens, neblina, neve, chuva, granizo, raios, ventos e temperatura (ARAUJO et al., 2018; GASPARIN & KRENZINGER, 2017; ISLAM et al., 2018).

Nuvens e neblinas causam a diminuição da incidência dos raios solares nos painéis, esta diminuição felizmente não é suficiente para deixar os painéis inviáveis, visto que boa parte da luz atravessa as nuvens e que a luz pode chegar até os painéis de forma indireta, como por difusão. As chuvas estão sempre acompanhadas de nuvens, porém a chuva é de certa forma benéfica aos painéis solares, visto que, ajudam a limpar a superfície retirando poeira e resíduos que diminuem a transparência da superfície (HOW DOES THE WEATHER AFFECT SOLAR PANEL EFFICIENCY, 2018).

Os raios podem gerar um problema gravíssimo aos sistemas de painéis solares devido aos picos de tensão, ao mesmo são facilmente evitáveis, através de um bom sistema de aterramento e dispositivos anti-surto baseados em varistores (DPS) um raio ou surto pode ser atenuado evitando danos. O International Electrotechnical Commission dita que os painéis devem aguentar o impacto de uma pedra de granizo de 1 polegada com velocidade de 50 mph porém a maioria dos painéis tem resistência a velocidade superiores a 260 mph (HOW DOES THE WEATHER AFFECT SOLAR PANEL EFFICIENCY, 2018).

As altas temperaturas, apesar de quase sempre estarem associadas com dias ensolarados, podem ser prejudiciais à eficiência dos painéis, pois a tensão gerada é devido a diferença de potencial entre as camadas P-N. Se a camada N estiver muito quente, a diferença diminui e, por consequência, a tensão. Porém, essa diminuição só é perceptível se a temperatura local for muito alta, acima dos 40°C (ARAUJO et al., 2018, ISLAM et al., 2018;). Os ventos podem danificar os painéis solares somente em casos extremos. Quando bem instalados não causam problemas e podem servir para diminuir a temperatura com a circulação de ar (HOW DOES THE WEATHER AFFECT SOLAR PANEL EFFICIENCY, 2018).

Na teoria, a neve pode cobrir os painéis, diminuir ou cortar por inteiro a produção de energia. Se a quantidade for muito grande, o peso pode danificar a estrutura. Na prática, a neve não é tão prejudicial. O pouco de luz que incide sobre a placa faz com que ela aqueça e derreta a neve. Além disso, por conta da inclinação,

boa parte da neve desliza na placa e não se fixa (HOW DOES THE WEATHER AFFECT SOLAR PANEL EFFICIENCY, 2018).

O desempenho do módulo fotovoltaico também pode ser afetado negativamente pela sujeira (que causa uma perda de energia de 2 a 50%) devido aos efeitos de dispersão e/ou bloqueio da luz irradiada (ISLAM et al., 2018).

1.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Um estudo de viabilidade econômica pode ser realizado utilizando metodologias diferentes. As principais são: 1) taxa interna de retorno (TIR), que traz os valores de despesa para o valor presente a fim de serem comparados de forma correta, levando em consideração as correções monetárias ao longo do período; 2) o valor presente líquido (VPL) é calculado utilizando os pagamentos futuros e o investimento inicial no valor presente, ou seja, com a correção de juros e inflação; 3) o período de recuperação do investimento (Payback) é o período necessário para recuperar o investimento inicial, ou seja, a partir de qual ano o investimento passa a realizar lucro (WILLIAMS et al., 2011).

1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Diante da necessidade de aprimorar fontes renováveis de energia juntamente com o crescimento da popularização de células solares no Brasil e no mundo, faz-se necessário validar a eficiência desse sistema em relação ao seu potencial. Neste sentido, um eventual incremento na taxa de eficiência pode ser proporcionada pela movimentação das placas de modo a favorecer a receptividade de luz solar nestas. Contudo, apesar de alguns estudos indicarem tal incremento, não foi encontrada uma avaliação que o associe ao gasto energético necessário para proporcionar sua movimentação, nem mesmo o aumento da eficiência em condições não ideais como clima nublado e chuvas (OLIVEIRA & GÓMEZ-MALAGÓN, 2018).

Além disso, é de suma importância que seja feita uma avaliação quali e quantitativamente do custo-benefício envolvido neste tipo de sistema energético para que o investimento na sua implementação seja viável. Consequentemente, tais fontes

possam vir a ser mais atraentes para a iniciativa pública e privada, além de uma maior aceitação da população (OLIVEIRA & GÓMEZ-MALAGÓN, 2018).

De acordo com a National Renewable Energy Laboratory, o custo de implementação de seguidores solares nos EUA em 2010 era em média 17% do total gasto em um sistema fotovoltaico residencial. Já em 2017 o custo caiu para apenas 7%. Porém os custos no Brasil não são os mesmos e como as condições climáticas são bem diferentes, pode ser que a diferença de eficiência mude (FU et al., 2017).

Desta forma, neste estudo pretende-se desenvolver dois sistemas de porte médio, para determinar a viabilidade de um seguidor solar no Brasil contabilizando os custos e o tempo de retorno do investimento para cada protótipo.

Os artigos e estudos de caso realizados no Brasil nos últimos anos geralmente levam em consideração simulações ou realizam aquisição de dados com protótipos de pequeno porte por um período curto de tempo (CANTONI, 2017; MARINHO, 2018; MASSON et al., 2017). Com a utilização de painéis de médio porte, geralmente utilizados em casa para aplicações simples, este estudo visa fazer uma análise mais completa da viabilidade, visto que os seguidores solares de pequeno porte podem não representar os reais valores e desafios na aplicação residencial e comercial (CANTONI, 2017). Além disso, a avaliação de retorno financeiro utilizando os valores de eficiência fornecidos pelos fabricantes de seguidores podem estar inflacionados.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAIS

Desenvolver um suporte com seguidor solar de dois eixos e realizar a análise de viabilidade econômica do seguidor em relação a um suporte fixo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Montar um suporte com seguidor solar de dois eixos e um fixo.
- Analisar diferentes tipos de cenários (nuvens, neblina, sol intenso).
- Verificar quando o ajuste de ângulo é viável e qual a diferença de eficiência.

Vale ressaltar que os dois sistemas representam as principais estruturas usadas atualmente tanto na indústria quanto em residências (PRINSLOO & DOBSON, 2015).

- Fazer uma coleta de dados para a análise final como potência gerada, potência gasta, condição climática e horário.
- Analisar a viabilidade e retorno financeiro levando em consideração o aumento de eficiência do seguidor solar, através da aplicação das metodologias TIR, VPL e Payback.

3. METODOLOGIA

Na realização deste estudo, foram utilizadas duas placas solares médias, em que uma foi mantida fixa como nas instalações comuns e outra foi instalada em um seguidor solar para maior aproveitamento da energia durante o dia. Depois do período de quinze dias foi realizado um estudo de viabilidade econômica para verificar se o suporte criado apresentou uma vantagem real sobre o suporte tradicional. Para alcançar esses objetivos foram criadas as 6 etapas a seguir.

- **Etapa 1.** Criar um suporte capaz de sustentar e movimentar um painel com 11 kg em condições adversas
- **Etapa 2.** Desenvolver um sensor capaz de perceber a direção do sol e um programa capaz de controlar os motores.
- **Etapa 3.** Realizar a aquisição dos dados de geração energética.
- **Etapa 4.** Comparar os dados para criar um sistema mais eficiente.
- **Etapa 5.** Realizar a aquisição final de dados.
- **Etapa 6.** Realizar o estudo de viabilidade econômica.

O fluxograma do trabalho realizado pode ser visto na **Figura 8** abaixo.

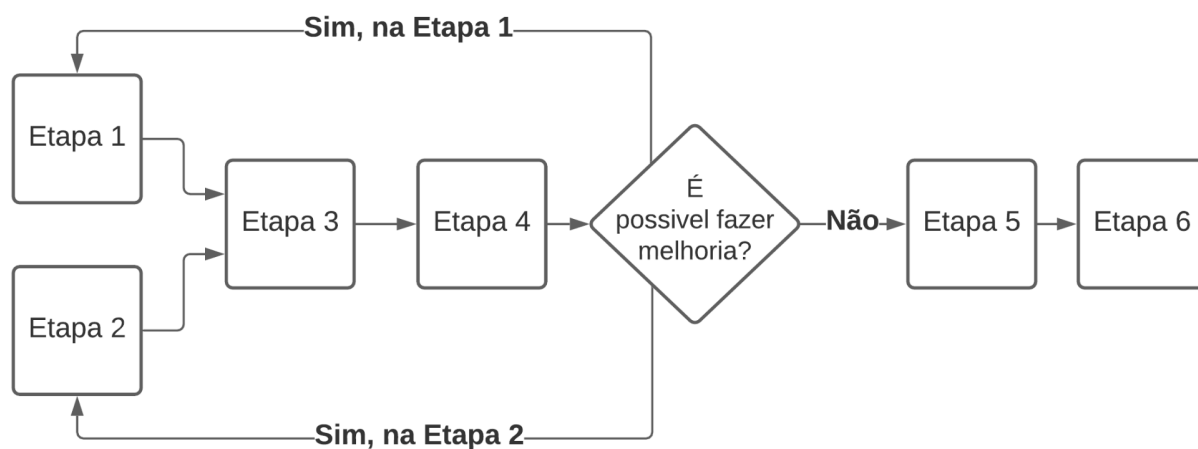


Figura 8. Fluxograma das etapas. (Autoria própria).

3.1. TIPOS DE PROTÓTIPOS

3.1.1 Fixo

Para o painel fixo, foi feita uma base para ajustá-lo manualmente na angulação mais indicada, seguindo o padrão de ângulo entre o horizonte e a placa, que deve ser igual a latitude onde ela se encontra, no caso $15,8^\circ$, conforme mostra a **Figura 9**.

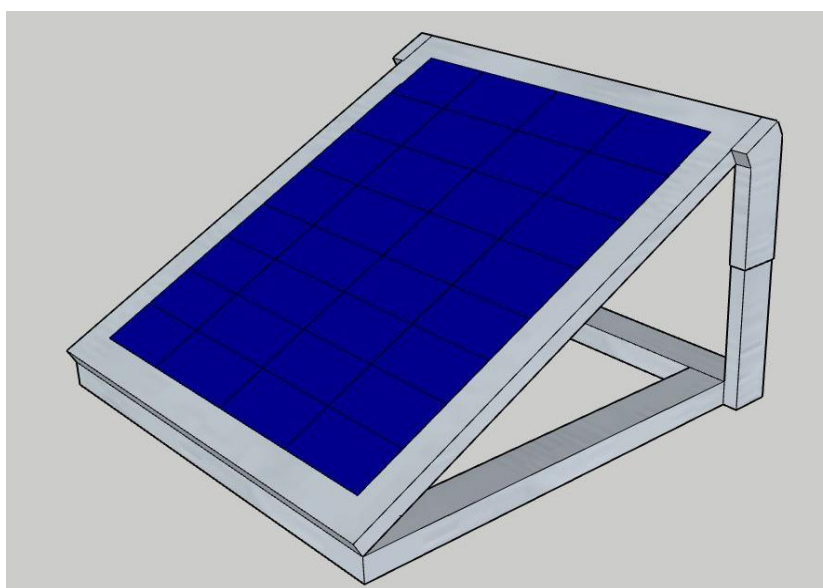


Figura 9. Painel solar de base fixa, o painel tem dimensões de 148 cm por 66 cm.

(Autoria própria).

3.1.2 Móvel

O seguidor móvel (**Figura 10**) foi construído de modo a conter um sensor que utiliza Resistores Dependentes de Luz (LDR) (mostrado na **Figura 11**) para detectar a direção dos raios solares, que, através de motores de passo, controlados por um Arduino NANO, proporcionou direcioná-lo para fazer um ângulo de 85° entre a placa solar e os raios solares.

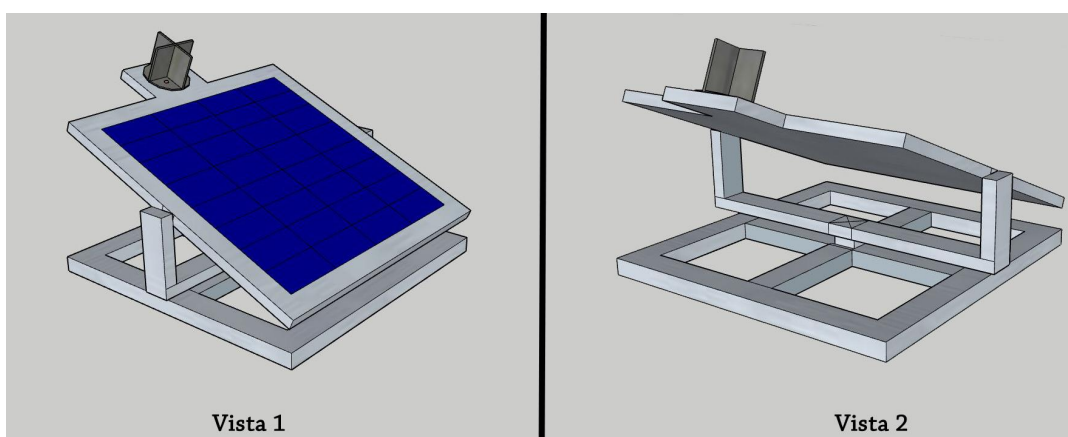


Figura 10. Seguidor de dois eixos. (Autoria própria).

O dispositivo mostrado na **Figura 11** contém quatro sensores LDR divididos por paredes dispostas com uma diferença de 90° . Quando o sol incide de forma não perpendicular à placa solar, ocorre uma diferença nas medições de resistência entre os LDRs. Assim, o seguidor movimentou a placa a fim de igualar os valores obtidos pelos resistores. Quando isso ocorreu, a placa passou a estar perpendicular aos raios solares.

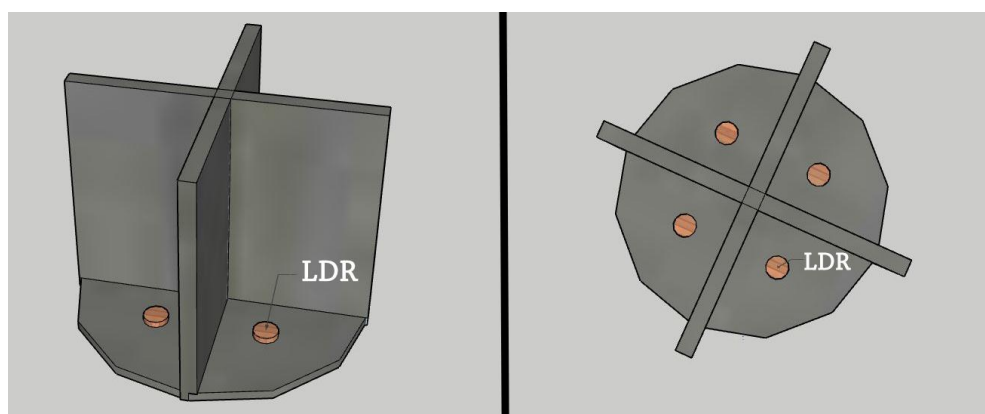


Figura 11. Dispositivo de direção dos raios solares. (Autoria própria).

O esquemático do seguidor pode ser visto na **Figura 12** a seguir:

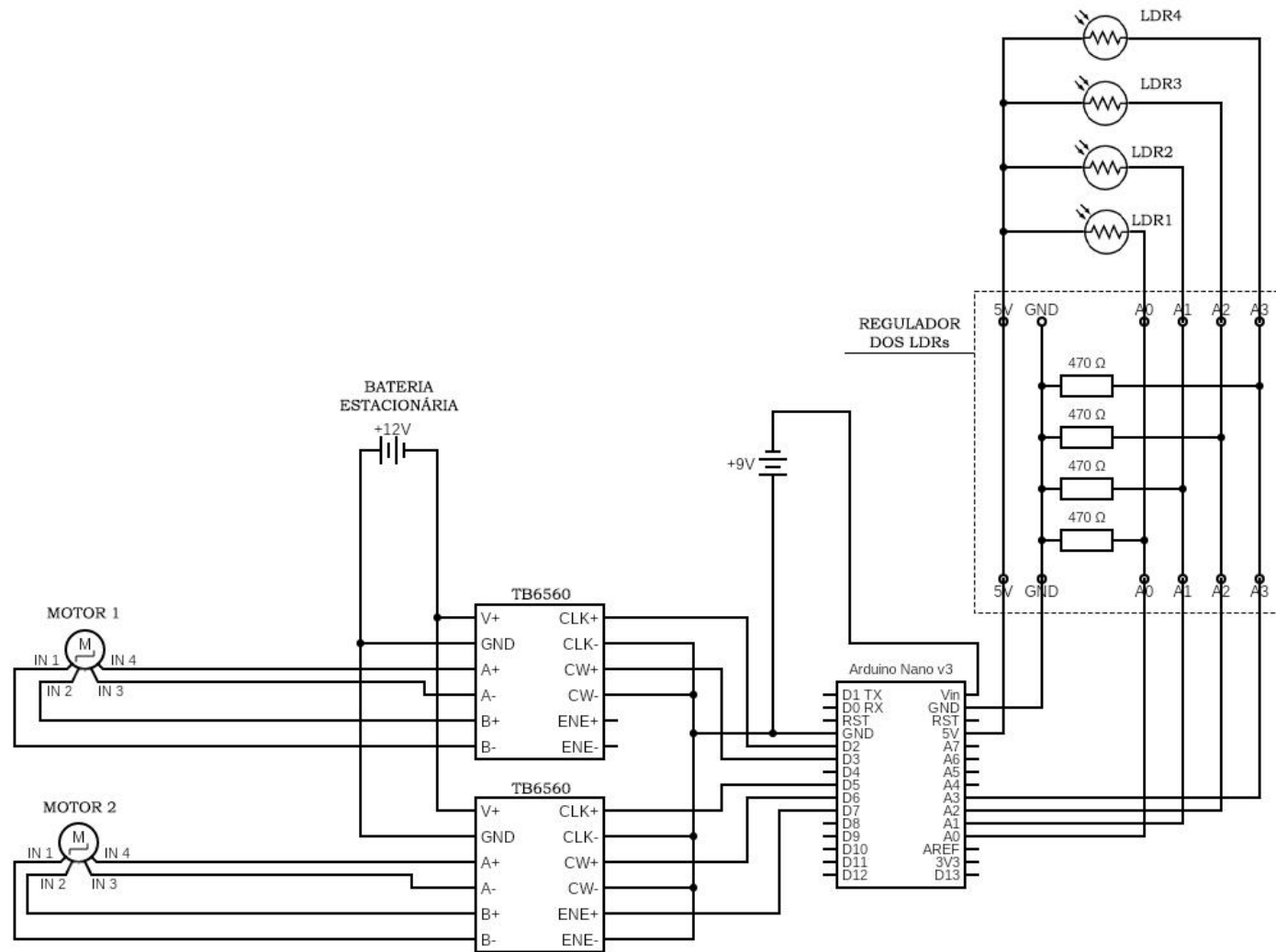


Figura 12. Esquemático completo de ligação da parte eletrônica. (Autoria própria).

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção do seguidor, foram utilizados os materiais para as partes solar, eletrônica e estrutural, conforme apresentados nas **Tabelas 2, 3 e 4**, respectivamente.

Tabela 2. Itens e seus respectivos custos da parte solar do sistema fixo e móvel (valores obtidos em Fevereiro de 2021).

Item	Preço Unitário [R\$]	Quantidade	Preço Total [R\$]	Preço Total [US\$]*
Bateria Estacionaria 12v 115ah	722	2	1500	272,73
Cabos 4mm	12	8	96	17,45
Controlador Solar Carga Pwm Lcd 30a	70	1	70	12,73
Parte estrutural (metalon e parafusos)	35	4	140	25,45
Painel Solar 150w 18V	480	4	1920	349,09
Conectores MC4	7	8	56	10,18
Total			3726	677,45

*A cotação do dólar utilizada foi de R\$5,50.

Tabela 3. Itens e seus respectivos custos da parte eletrônica do sistema móvel (valores obtidos em Fevereiro de 2021).

Item	Preço Unitário [R\$]	Quantidade	Preço Total [R\$]	Preço Total [US\$]*
Arduino Nano R3	30	1	30	5,45
Cabo Sem Blindagem 26 AWG (4 VIAS)	3,45	24	82,8	15,71
Cabo Sem Blindagem 26 AWG (6 VIAS)	4,15	12	49,8	9,05
Caixa Plástica	35	1	35	6,36
Driver Controlador Tb6560 3a	55	8	440	80
Fotocélula LDR (5mm)	0,44	4	1,76	0,32
Motor De Passo Nema 23 22 kgf.cm 3A	229	8	1832	218,18
Resistores 470R	0,05	4	0,2	0,04
Shield bornes Arduino NANO	16	1	16	2,91
Placa De Fenolite 5x7cm	3,75	1	3,75	0,68
Total			2491,16	452,93

*A cotação do dólar utilizada foi de R\$5,50.

Tabela 4. Itens e seus respectivos custos da parte estrutural do sistema móvel (valores obtidos em Fevereiro de 2021).

Item	Preço Unitário [R\$]	Quantidade	Preço Total [R\$]	Preço Total [US\$]*
Correia 10mm Fechada Gt2 400mm	25	4	100	18,18
Correia 10mm Fechada Gt2 600mm	30	4	120	21,82
Eixo Linear Temperado 20mm X 200mm	36	4	144	26,18
Eixo Retificado 12mm X 1000mm	38	4	152	27,64
Mancal Com Rolamento Eixo 12mm	26	8	208	37,82
Mancal Oval Flange 20mm	31	4	124	22,55
Metalon 25 x 25 mm	11	22	242	44,00
Metalon 40 x 25 mm	13	3,2	41,6	7,56
Parafusos	0,2	80	16	2,91
Peso 3 Kg	31	4	124	22,55
Polia Gt2 20 Dentes Furo 8mm P/ Correia 10mm	18	8	144	26,18
Polia Gt2 60 Dentes Furo 12mm P/ Correia 10mm	30	4	120	21,82
Polia Gt2 80 Dentes Furo 20mm P/ Correia 10mm	65	4	260	47,27
Rolamento 30204 Cone Capa 20x47x15,25	19	4	76	13,82
Suporte Eixo Guia Linear Shf20 Para Eixo 20mm	26	4	104	18,91
Suporte Eixo Guia Linear Sk12 Para Eixo 12mm	18	8	144	26,18
Tinta 900 ml	18	1,5	27	4,91
Total			2146,6	390,29

*A cotação do dólar utilizada foi de R\$5,50.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Para uma melhor comparação, os dois painéis funcionaram ao mesmo tempo e por um período de quinze dias (22/04/2021 a 06/05/2021), evitando que as diferenças climáticas entre um dia e outro influenciassem nos resultados. Vale destacar que dentro do intervalo de tempo, ocorreram dias ensolarados, nublados e chuvosos, o que permitiu o entendimento dos cenários na eficiência (CLIMATOLOGIA DE BRASÍLIA-DF, 2018). Durante esse período, foi aferida a energia fornecida pelo painel solar e a potência utilizada nos componentes do seguidor para testar a viabilidade.

Depois de obtidos os dados para os dois sistemas, foi feito um comparativo final da geração de energia elétrica e uma projeção de retorno financeiro utilizando o

TIR, VPL e Payback e para cada um, levando em consideração o custo dos materiais e o preço da energia elétrica fornecida pela companhia local de geração e distribuição de Brasília-DF.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONSTRUÇÃO DO SEGUIDOR

A construção do seguidor solar foi dividida em três partes: estrutural, geração fotovoltaica e eletrônica, conforme detalhado a seguir.

4.1.1 Estrutura do Seguidor

A estrutura do seguidor solar deve suportar um painel de 150 W, com dimensões aproximadas de 150 cm por 65 cm e com o peso de 11 kg de forma confiável, até mesmo em situações de ventos fortes, conforme mostra a **Figura 13**.

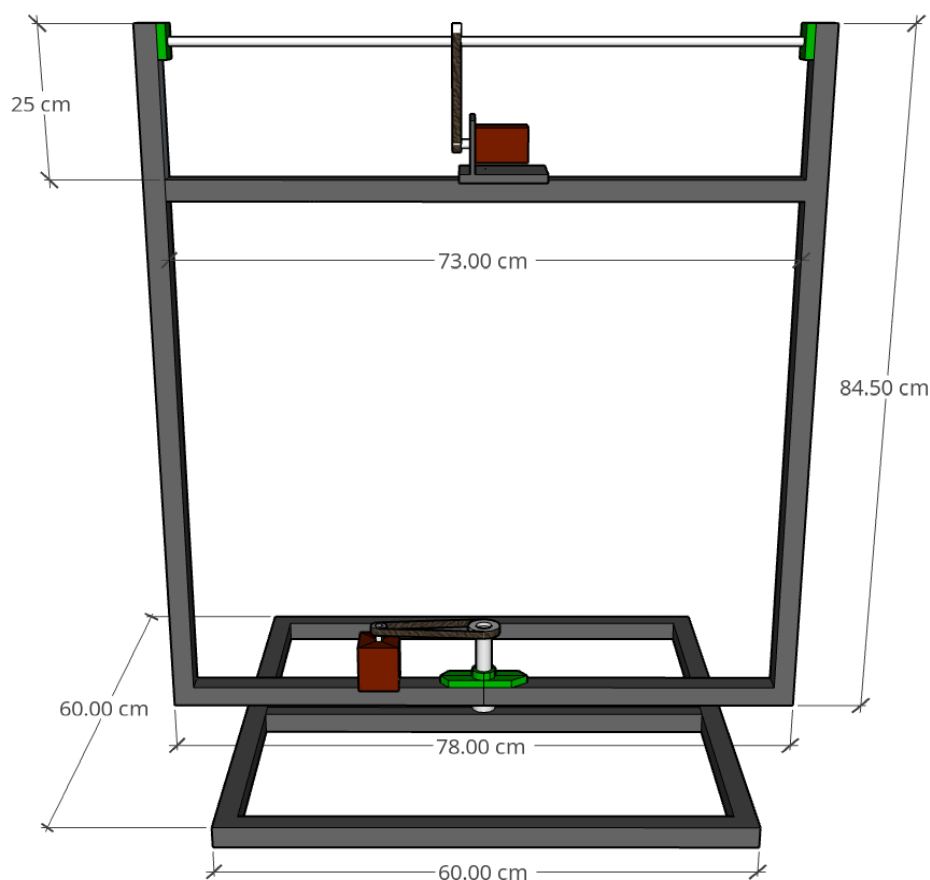


Figura 13. Modelo 3D da parte estrutural do seguidor. Em cinza escuro a parte de Metalon, em vermelho os motores, em verde os mancais e em branco os eixos.(Autoria própria).

Para a confecção da base, foi utilizado o metalon de chapa 18 com solda MIG. As dimensões foram escolhidas para que não houvesse possibilidade do suporte tombar com ventos fortes e, ao mesmo tempo, que fosse de baixo custo e de fácil instalação, sem ocupar uma grande área. No centro da base foi utilizado um tubo de 40 x 25 mm para que pudesse ser colocado o eixo, o rolamento e o mancal.

Para o eixo vertical, foi utilizado um barra de de aço temperado 1045 de 200 mm de comprimento com 20 mm de diâmetro, com dureza de 55 HRC e limite de escoamento de 487 MPa, para garantir que não ocorresse uma deformação do suporte e que seu movimento fosse fluido.

Entre a base e o "U" de aço, foi utilizado um rolamento cônico para cargas axiais e radiais, visto que o painel realizaria um esforço tanto no eixo Y quanto no eixo X. Assim, o rolamento escolhido continha 20 mm de diâmetro interno, 47mm de diâmetro externo e 15,25 mm de altura, com limite de carga de fadiga de 3 kN.

Logo acima do tubo foi utilizado um mancal oval para ajudar na sustentação e alinhamento do eixo vertical. Nesse caso, poderia ter sido usado um rolamento tradicional soldado ao tubo. Apesar do maior custo, foi escolhido o mancal por motivos de praticidade.

Para a movimentação no eixo vertical foi utilizado uma polia de 80 dentes no eixo do painel e uma polia com 20 dentes no eixo do motor, com uma relação de 4:1. Dessa forma, foi aumentado em 4 vezes o torque do motor de passo. A correia de 10 mm foi escolhida para que não houvesse escorregamento nem deformação da correia.

O motor de passo foi utilizado para o movimento no eixo vertical, pois apresenta um ótimo torque e precisão pelo preço. Vale ressaltar que foi realizado um teste previamente utilizando um motor de 12 Kgf.cm que se mostrou insuficiente para movimentar o painel. Por isso foi utilizado o motor com um torque de 22 kgf.cm, no padrão NEMA 23. O sistema descrito acima pode ser observado na **Figura 14** a seguir:

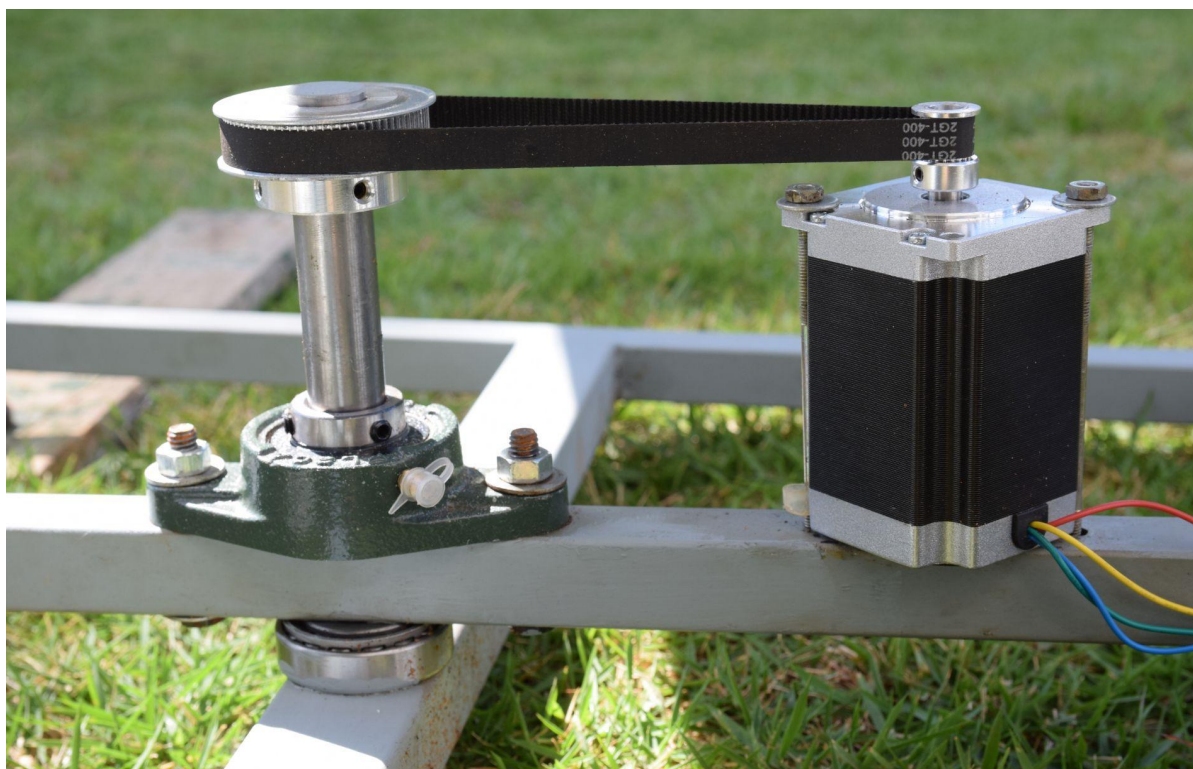


Figura 14. Foto do motor que rotaciona o eixo vertical.(Autoria própria).

Para a sustentação do painel e movimentação no eixo horizontal foi feito uma estrutura com formato de “U” utilizando o mesmo material da base. Sua dimensão foi escolhida para permitir que o painel pudesse se movimentar com uma inclinação de até 85° para ambos os lados, pudesse resistir às cargas axiais e longitudinais e que gastasse a menor quantidade possível de material.

Na junção do painel ao suporte foi utilizado um mancal de cada lado, um eixo de aço temperado 1045 de 12 mm de diâmetro e 800 mm de comprimento, com limite de escoamento de 651 MPa e limite de resistência de 830 MPa, para que não houvesse flexão com o peso do painel nem com a tensão entre as polias pela correia. Também foi utilizado um suporte fixo para eixo parafusado ao painel. Para garantir que não houvesse deformação da base de alumínio do painel, foi fixada uma chapa de 3 mm de aço entre o suporte e o painel conforme **Figura 15**.



Figura 15. Foto do eixo horizontal, mancal e suporte.(Autoria própria).

Para a movimentação do eixo vertical foi utilizado um sistema com polia de 60 dentes no eixo e uma polia de 20 dentes no motor, com uma relação de 3:1, nesse caso, acoplados com uma correia de 10 mm conforme a **Figura 16**.

O mesmo modelo de motor de passo foi utilizado nessa seção, com 22 kgf.cm e com a relação de polias ele é capaz de realizar um torque de 66 kgf.cm, o que se mostrou suficiente para a movimentação do painel mesmo em condições mais difíceis, como ventos e chuva.



Figura 16. Foto do eixo horizontal, motor, correia e polias.(Autoria própria).

Foi acrescentado ao painel um contrapeso para equilibrar o torque realizado pelo peso do painel ao eixo horizontal conforme apresentado na **Figura 17**.

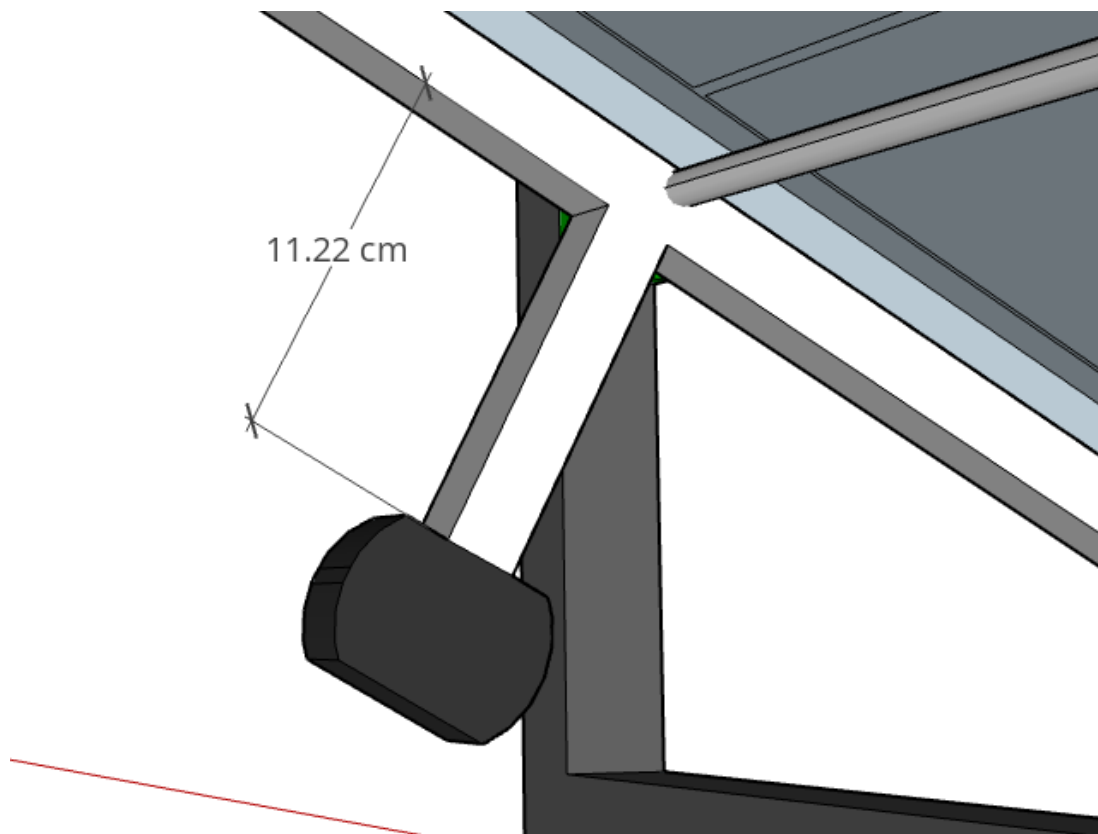


Figura 17. Imagem do contrapeso do painel. (Autoria própria).

Foi escolhido um contrapeso de 2 kg e sua distância foi escolhida de acordo com a equação de equilíbrio de forças, Equação (1).

$$P_p \cdot d_1 = P_c \cdot d_2 + P_b \cdot \frac{d_2}{2} \quad (1)$$

Sendo P_p o peso do painel; d_1 a distância entre o centro de massa do painel e o centro do eixo; P_c o peso do contrapeso; d_2 a distância entre o contrapeso e o centro do eixo e o P_b o peso do braço de alavanca de metalon 25 x 25 mm, que, de acordo com o fabricante tem densidade linear de 0,9 kg/m.

Sendo assim:

$$11 \text{ kg} \cdot 0,025 \text{ m} = 2 \text{ kg} \cdot d_2 + 0,90 \cdot \frac{d_2}{2} \quad (2)$$

Logo, tem-se que a distância entre o contrapeso e o eixo é de 11,22 cm.

4.1.2 Parte Eletrônica

O desafio na parte eletrônica foi o de escolher um microcontrolador capaz de controlar os motores de passo, receber 4 sinais analógicos dos LDRs e realizar uma lógica simples e de baixo custo. Então, foi escolhido o Arduino Nano.

De acordo com testes preliminares, seriam necessários motores de passo de pelo menos 18 kgf.cm. Assim, foram escolhidos motores NEMA 23 bifásicos com 22 kgf.cm de torque e com corrente de operação de até 3 A por fase. Os drivers escolhidos para controlar os motores foram os TB6560, uma vez que esses são capazes de operar em até 3 A por fase, controlar o máximo de corrente e realizar subdivisões dos passos.

As entradas dos drives que alimentam os motores foram ligadas à bateria estacionária que estava conectada ao controlador de carga do painel solar. Os drives foram configurados para que os motores utilizassem a menor quantidade de energia possível para conseguir movimentar o sistema, mesmo em situações de ventos e chuva. Através de alguns testes, os dois motores ficaram configurados com 2,2 A por fase, 50% de *holding torque* e passo de $\frac{1}{4}$. Os sensores utilizados para perceber a intensidade luminosa foram 4 LDRs de 5mm de modelo GL5528. Porém, foi necessário colocar um resistor de 470R em cada um para ajudar o nível de sensibilidade. Esse valor foi encontrado através de testes práticos com um potenciômetro.

O sensor foi posicionado diretamente ao sol e foi escolhido no potenciômetro de 1K o menor valor capaz de fazer com que as entradas analógicas do arduino fossem capazes de diferenciar a luminosidade direta e indireta do sol. Então, foi escolhido o valor de resistência comercial mais próxima. Os resistores foram soldados em uma placa de Fenolite perfurada seguindo o esquemático da **Figura 12 (Regulador dos LDRs)**, sendo a parte de cima do esquemático ligado aos LDRs e a parte de baixo ligado ao Arduino.

O sistema da parte eletrônica foi colocado em uma caixa e pode ser observado na **Figura 18**, nos números 1 e 2 estão os Drivers TB6560, no número 3 está a placa contendo os resistores e no número 4 está o Arduino Nano.

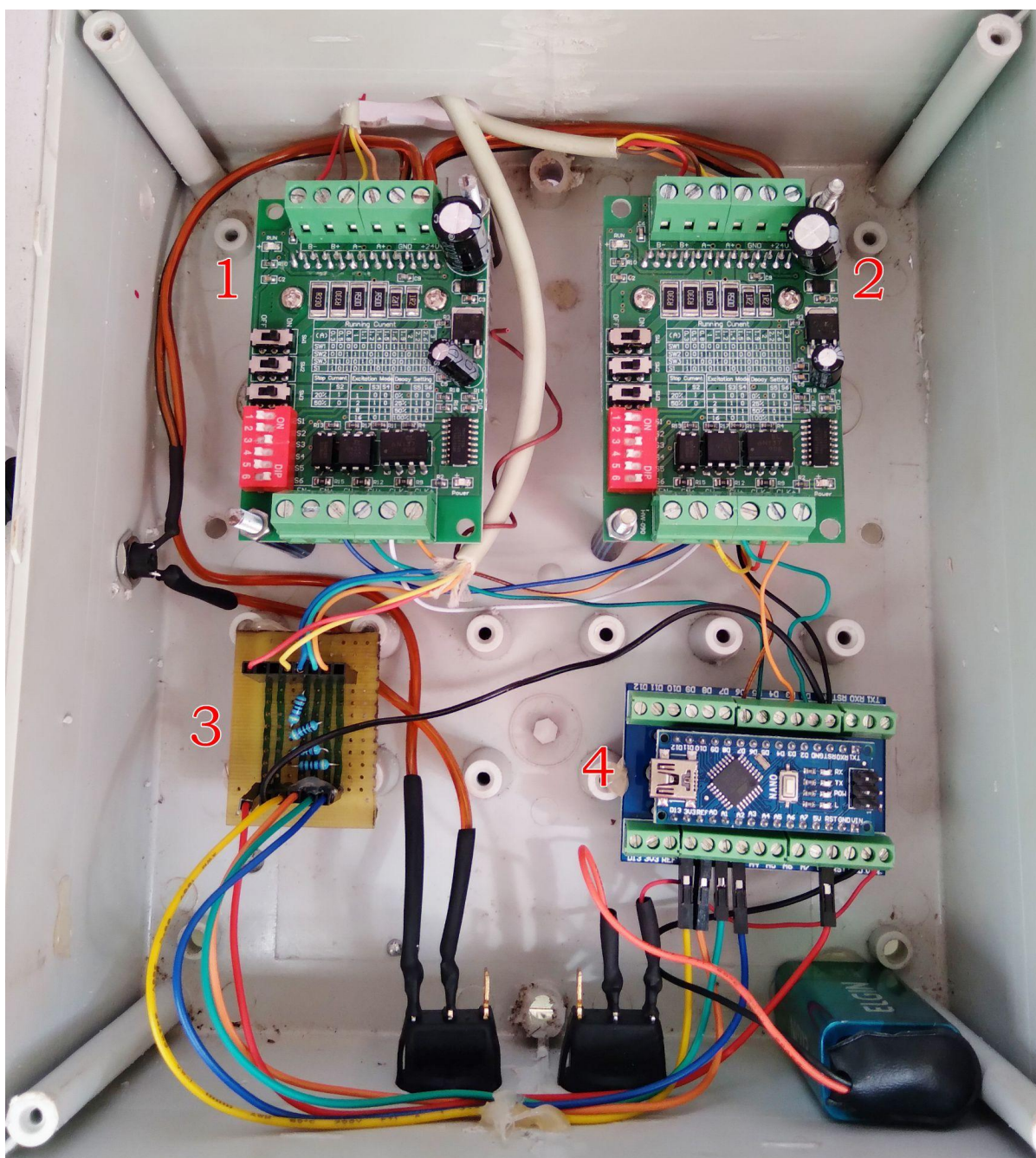


Figura 18. Caixa contendo os Drivers, Arduino e placa de resistores.(Autoria própria).

Os sensores foram colocados em suporte feito de MDF para que o Arduino fosse capaz de perceber a direção da radiação solar direta. O suporte contava com

quatro aletas de 26 cm de altura, 8 cm de comprimento e 0,25 cm de espessura, divididas em quatro quadrantes, conforme as **Figuras 11 e 19**. Com espaçamento de 2 cm das paredes, os LDRs foram capazes de perceber a direção do sol com uma precisão de aproximadamente $4,4^\circ$. O suporte foi pintado de preto fosco para diminuir a incidência da luz indireta no sensor e fixado paralelamente ao painel na parte superior.

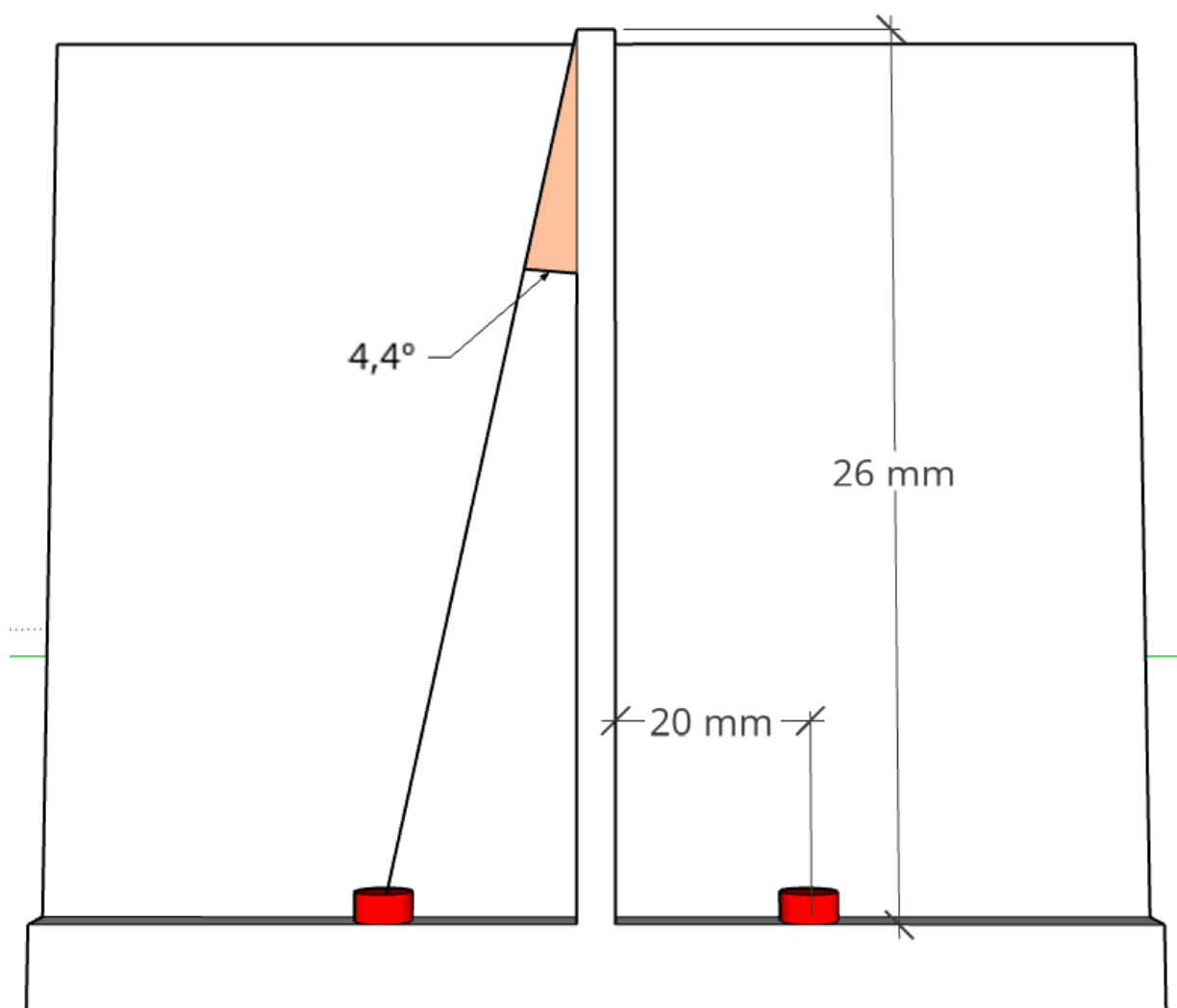


Figura 19. Seção vertical da representação 3D do suporte. As escalas foram alteradas para melhor compreensão. Os LDRs estão representados em vermelho.(Autoria própria).

O seguidor completo pode ser visto na **Figura 20** abaixo:



Figura 20. Foto do seguidor completo em funcionamento.(Autoria própria).

4.1.3 Geração de Energia Fotovoltaica

A escolha do painel solar levou em consideração o tamanho usual e que fosse possível criar uma prova de conceito sem que fosse adicionado desafios extras. Dessa forma, foi escolhido o painel solar de 150 W ao invés dos painéis de 330 ou 500 W.

Após a escolha dos painéis, foi necessário escolher o controlador de carga. Assim, foi escolhido o controlador de carga de estilo PWM de 30 A, uma vez que o painel é capaz de fornecer uma corrente máxima de 8,38 A. No caso, não foi escolhido o controlador com tecnologia MPPT visto que a leitura do wattímetro foi realizada entre o painel e o controlador de carga.

Para a medição da potência e energia gerada pelos painéis, foi escolhido um wattímetro digital de 100 V e 20 A. Os cabos escolhidos foram de seção de 4mm, de modo a atender os limites estabelecidos pela NBR 5410 para limite de corrente.

A energia gerada pelo painel foi armazenada em uma bateria estacionária de 12 Volts e 115 Ah. A referida bateria também serviu para alimentar o circuito do sensor, arduino e motores.

Foi acoplada à saída de carga do PWM uma resistência de 120 W para garantir que o painel sempre forneça o máximo de energia possível. Assim, quando o painel estiver fornecendo mais de 120 W, o excesso será fornecido às baterias e, quando o painel estiver fornecendo menos de 120 W, a resistência utilizará a energia das baterias para complementar.

Os dois painéis foram ligados utilizando os mesmos equipamentos e da mesma forma para diminuir qualquer interferência na análise dos dados. Tal ligação foi realizada conforme mostram as **Figura 21 e Figura 22** a seguir.

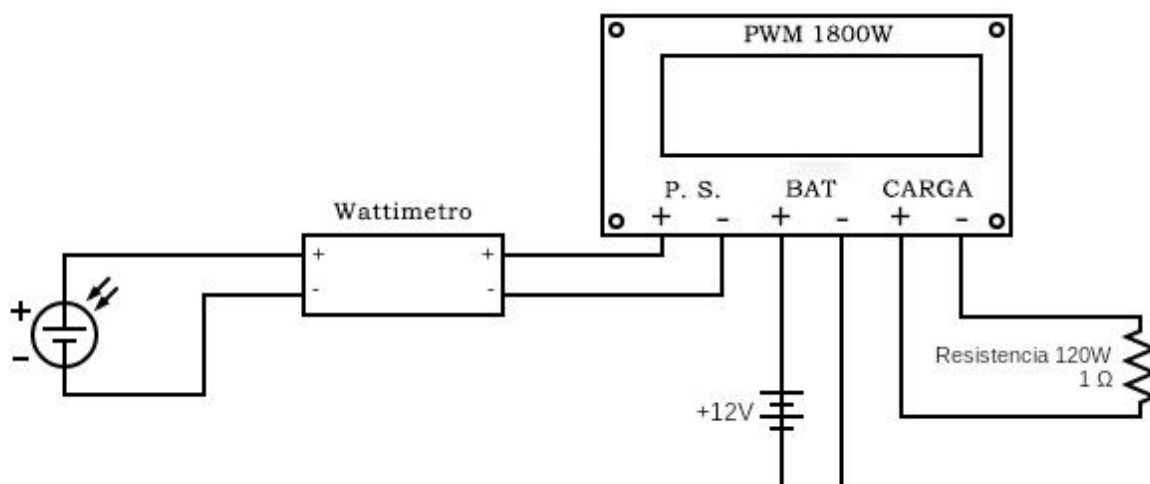


Figura 21. Esquemático de ligação da parte de geração de energia solar.(Autoria própria).

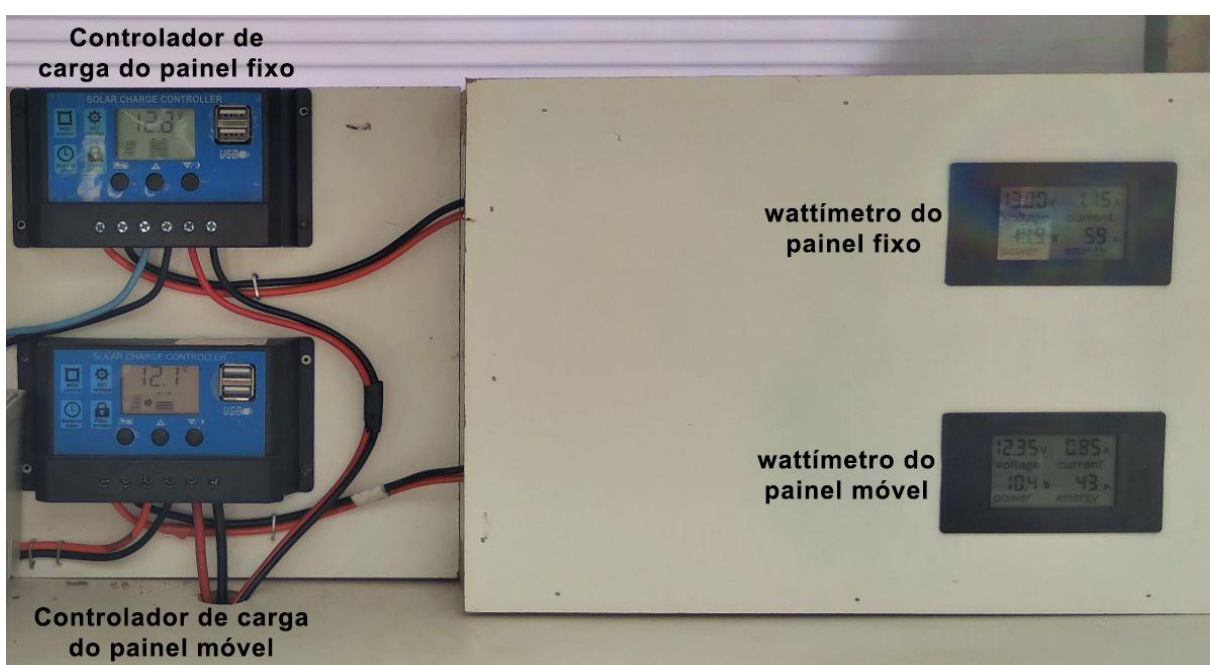


Figura 22. Foto dos controladores de carga à esquerda e dos wattímetros a direita.(Autoria própria).

4.2 PROGRAMAÇÃO DO SEGUIDOR

Para determinar a direção do sol foi montada na programação uma comparação entre os quatros sensores, divididos em quatro quadrantes, superior esquerdo, superior direito, inferior esquerdo e inferior direito. Por exemplo, caso o valor lido entre as médias dos valores da esquerda fosse maior que os valores lidos

na média da direita, significa que os sensores da esquerda estão recebendo mais luz. Dessa forma, o painel deveria efetuar o movimento para esquerda até que as médias se aproximassem. A sensibilidade (diferença) foi estabelecida como 50, de acordo com testes preliminares, para que o painel não se movimentasse desnecessariamente.

Partindo do princípio de que o estudo buscava montar um sistema com a maior eficiência possível, levantou-se a possibilidade de adicionar outras variáveis para determinar quanto e quando o painel iria se movimentar. Uma das variáveis testadas foi a incidência de luz solar. Foi observado que, em momentos muito nublados (majoritariamente radiação solar indireta), a diferença de angulação do painel não apresentou ganhos na obtenção de energia, como pode ser observado na **Figura 23**.

Dessa forma foi acrescentado ao programa a variável de intensidade para determinar se haveria ou não a movimentação. De acordo com testes preliminares, percebeu-se havia um incremento na obtenção de energia pelos painéis quando a média dos quatro sensores era superior a 350 (o valor encontrado não representa diretamente nenhuma escala conhecida, como LUX ou Lúmens).

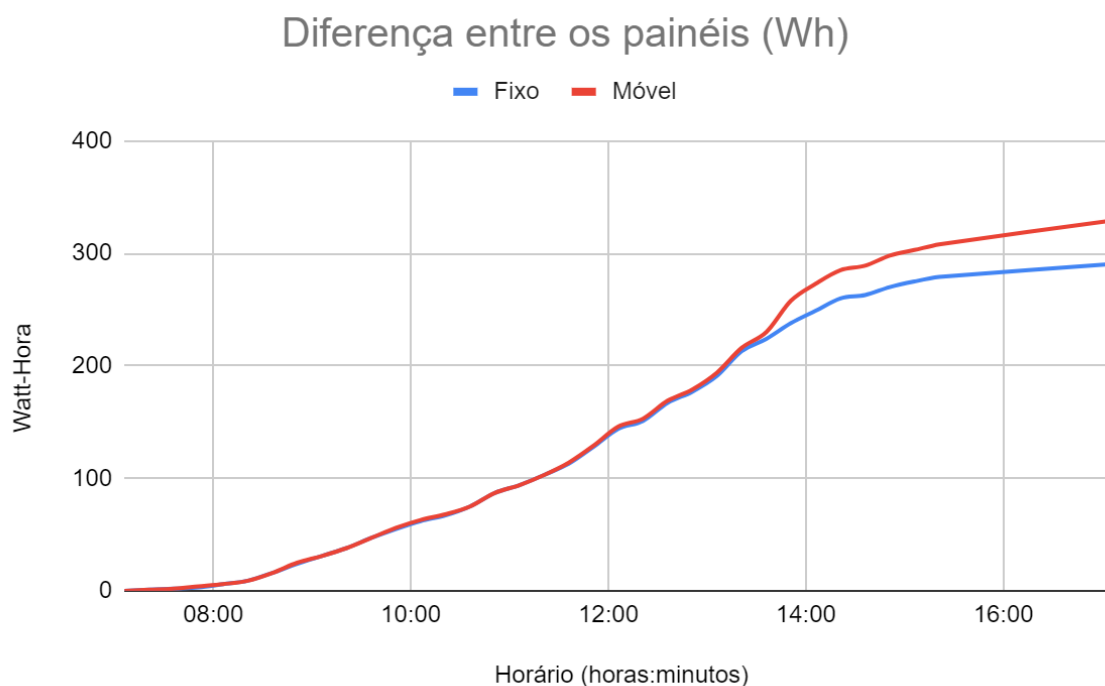


Figura 23. Dados obtidos em uma manhã extremamente nublada. (Autoria própria).

Para evitar que o painel se confundisse durante um período nublado e não conseguisse voltar à posição correta foi adicionado ao programa um limite de movimentação no eixo vertical e horizontal. No eixo horizontal foi limitado em 65° para cada lado e para o eixo vertical foi limitado em 210°, visto que a maior movimentação que o sol faz no Distrito Federal durante o ano em um único dia é de 205°, geralmente no mês de Fevereiro. (SUNCALC - SUN POSITION CALCULATOR, 2021).

Levando em consideração a relação entre polias, o passo do motor e a configuração do Driver, os valores que representam a movimentação foram *VLR_MAX_DE* 130 e *VLR_MAX_TB* 300, sendo “DE” movimentação horizontal e “TB” movimentação vertical (ANEXO A, p 56).

Outro desafio encontrado foi a possibilidade do painel amanhecer de costas para o sol, visto que, no dia anterior ele terminou virado aproximadamente 180° para o lado que o sol nasceu. Dessa forma, foi adicionado ao programa uma situação em que, se a média dos sensores fosse igual à leitura observada durante à noite, (*VLR_ESCURO_RESETAR* 80) o painel se movimentaria para a posição inicial (ANEXO A, p 55).

Levando em consideração a possibilidade de ruídos no sinal analógico e interferências na leitura, foi acrescido ao programa uma média móvel para analisar as últimas dez leituras de cada sensor. Também foi acrescido uma condição de diferença mínima entre as leituras para que o painel não se movimentasse com pouca diferença de luminosidade e ficasse mais suscetível a interferências. Os testes mostraram que o valor 50 para *VLR_DIFF_ATIVACAO* era razoável. Por último foi acrescido um delay entre os ciclos do programa para melhorar a estabilidade e diminuir o gasto energético. O *delay* escolhido foi de 800 milissegundos (ANEXO A, p 57).

No intuito de utilizar a menor quantidade de energia possível para a movimentação foi acrescido ao programa uma função de desligar o motor que movimenta o eixo vertical através da função ENABLE do driver TB6560, já o motor

do eixo horizontal não pode ser desligado pois ele é necessário para manter o painel na posição correta.

Outra calibração utilizada para diminuir o gasto foi a determinação da menor quantidade necessária de corrente para movimentar os eixos, através do pinos de configuração do Driver foi possível configurar os dois motores para 2,2 A. Dessa forma foi possível diminuir a potência gasta dos motores para 8,8 Watts.

4.3 OBTENÇÃO DOS DADOS

Visando uma aquisição de dados com a menor interferência possível foram realizados testes para determinar se havia diferenças entre os dois sistemas, o fixo e o móvel. Os dois painéis foram colocados na mesma posição durante um dia inteiro e não foi observado nenhuma diferença da energia gerada entre os dois painéis. No dia seguinte, deu-se início às análises. Os dois suportes foram colocados ao nível do chão e sem sombreamento durante todo o dia. O painel fixo foi posicionado virado ao norte e com inclinação com o chão de 16°.

Cada sistema continha um wattímetro digital capaz de analisar a tensão, corrente, potência e energia gerada por cada painel, além de um terceiro wattímetro que gravou o gasto energético dos motores. Para a aquisição dos dados foi posicionada uma câmera programada para registrar os valores de 15 em 15 minutos, levando em consideração a incidência de luz direta no local onde os painéis foram instalados. O período de análise utilizado foi das 7:05 horas da manhã até às 17:20 horas da tarde.

O período analisado foi do dia 22 de abril de 2021 até o dia 6 de maio de 2021, um intervalo de 15 dias onde foi possível observar vários cenários diferentes como manhãs nubladas e tarde ensolaradas, dias inteiros ensolarados, dias inteiros nublados e períodos rápidos de chuva.

Os valores obtidos de potência e energia foram colocados em uma tabela juntamente com a média da energia gerada no intervalo. Essa média foi importante para a análise, pois poderia ocorrer de estar nublado no momento em que a foto foi

tirada mas, não na maior parte do intervalo. A **Tabela 5** representa um dia ensolarado com algumas nuvens ao longo do dia.

Tabela 5. Valores obtidos no dia 28/04/2021.

PAINEL FIXO			PAINEL MÓVEL			Horário
Potência [W]	Energia [Wh]	[Wh/min]	Potência [W]	Energia [Wh]	[Wh/min]	
6,3	0	0	50,7	0	0	07:06
27,3	5	0,33	61,6	13	0,87	07:21
34,3	13	0,53	65,2	29	1,07	07:36
42,7	22	0,6	81,5	46	1,13	07:51
50,6	33	0,73	84,6	64	1,2	08:06
58,5	47	0,93	90,2	83	1,27	08:21
65,2	62	1	105,6	105	1,47	08:36
72,3	80	1,2	112	128	1,53	08:51
113,3	126	1,02	137,4	200	1,6	09:36
29,5	137	0,73	32,2	213	0,87	09:51
23,7	153	1,07	26,5	232	1,27	10:06
120,3	177	1,6	129,6	258	1,73	10:21
124,3	199	1,47	132,2	282	1,6	10:36
121,8	227	1,87	126,4	311	1,93	10:51
26,2	249	1,47	23,9	339	1,87	11:06
133,1	274	1,67	136	367	1,87	11:21
63,7	300	1,73	65,8	396	1,93	11:36
134,3	332	2,13	140,3	430	2,27	11:51
18,6	352	1,33	16,8	450	1,33	12:06
39,6	360	0,53	41,5	459	0,6	12:21
131,1	394	2,27	136,3	493	2,27	12:36
19,4	422	1,87	18,1	523	2	12:51
127,4	449	1,8	134,1	551	1,87	13:06
133,2	482	2,2	141,6	586	2,33	13:21
124,9	498	1,07	138,2	602	1,07	13:36
119,5	516	1,2	137,5	620	1,2	13:51
100,9	541	1,67	129,3	649	1,93	14:06
37,4	553	0,8	139,8	675	1,73	14:21
38	568	1	62,9	704	1,93	14:36
15,3	575	0,47	20,2	718	0,93	14:51
23,8	582	0,47	120,6	744	1,73	15:06
19,9	588	0,4	64,9	768	1,6	15:21
54,6	593	0,33	95	776	0,53	15:36
10,2	599	0,4	11,9	786	0,67	15:51

Continuação Tabela 5

PAINEL FIXO			PAINEL MÓVEL			Horário
Potência [W]	Energia [Wh]	[Wh/min]	Potência [W]	Energia [Wh]	[Wh/min]	
9,8	601	0,13	10,8	788	0,55	16:06
6,2	603	0,13	5,4	790	0,42	16:21
6,5	605	0,13	5,5	792	0,31	16:36
3,1	606	0,07	3	793	0,07	16:51
2,5	606	0	2,4	793	0	17:06
2,1	607	0,07	2,2	794	0,07	17:21

Para melhor visualização dos dados foram gerados os gráficos de produção acumulado de energia (**Figura 24**) e da média no intervalo de 15 minutos (**Figura 25**).

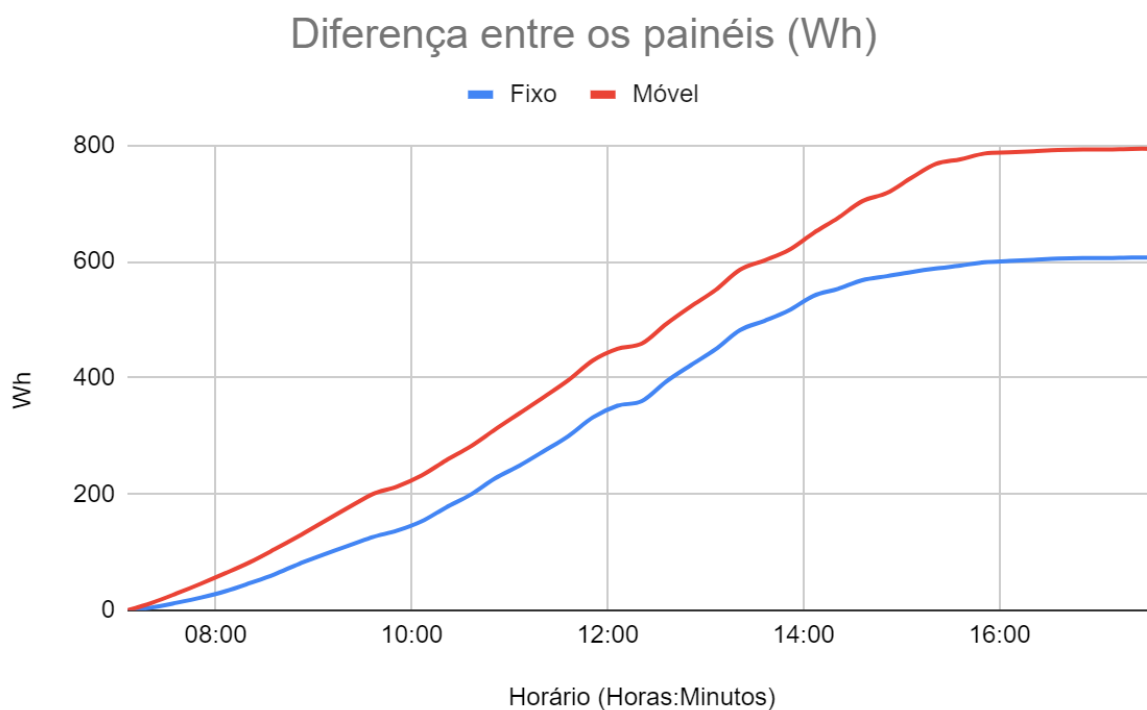


Figura 24. Produção acumulada de energia do dia 28/04/2021.

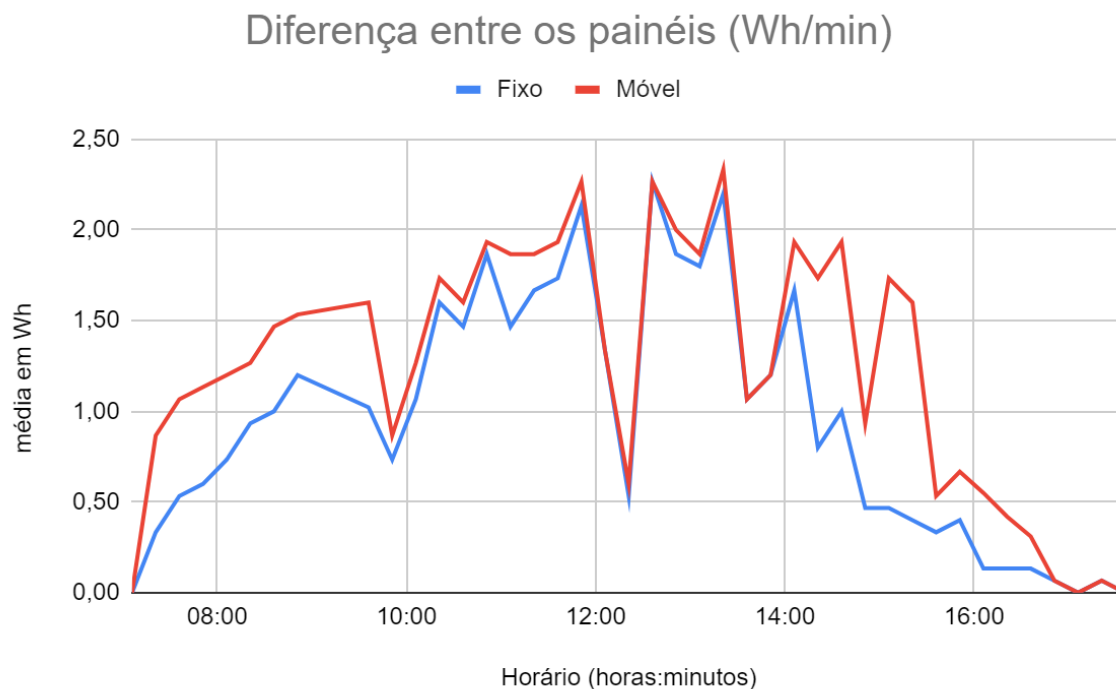


Figura 25. Média no intervalo de 15 minutos do dia 28/04/2021.

No caso do dia avaliado (**Figura 25**), a diferença de produção entre os painéis foi de 30,81%, mesmo descontando o gasto energético total dos motores de 21 Wh.

De acordo com as **Figura 26** e **Figura 27**, pode-se observar que as maiores diferenças de produção energética entre os painéis ocorreram no início da manhã e no final da tarde.

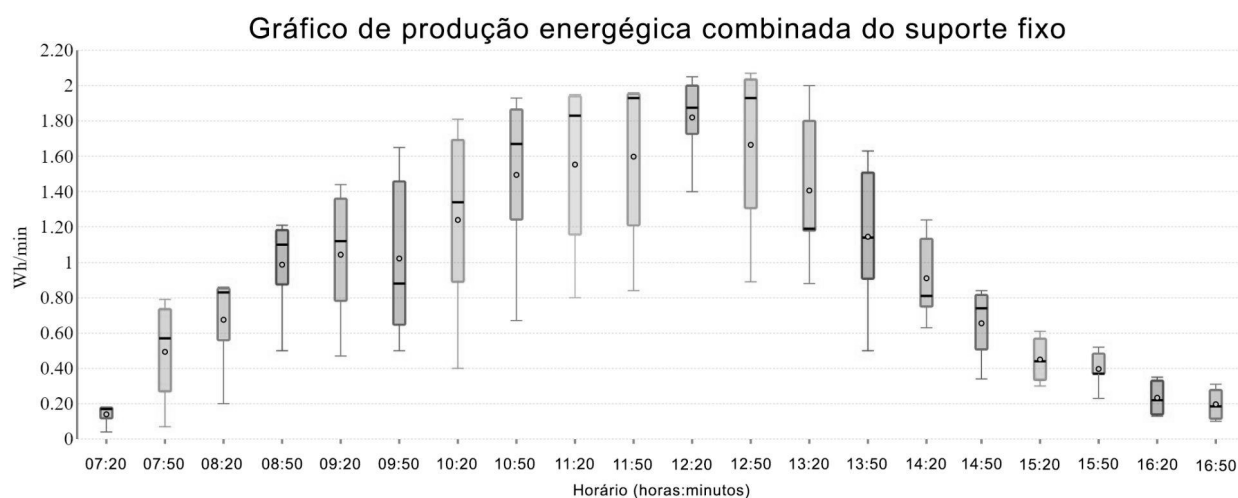


Figura 26. Gráfico Boxplot dos valores encontrados pelo suporte fixo nos 15 dias analisados.

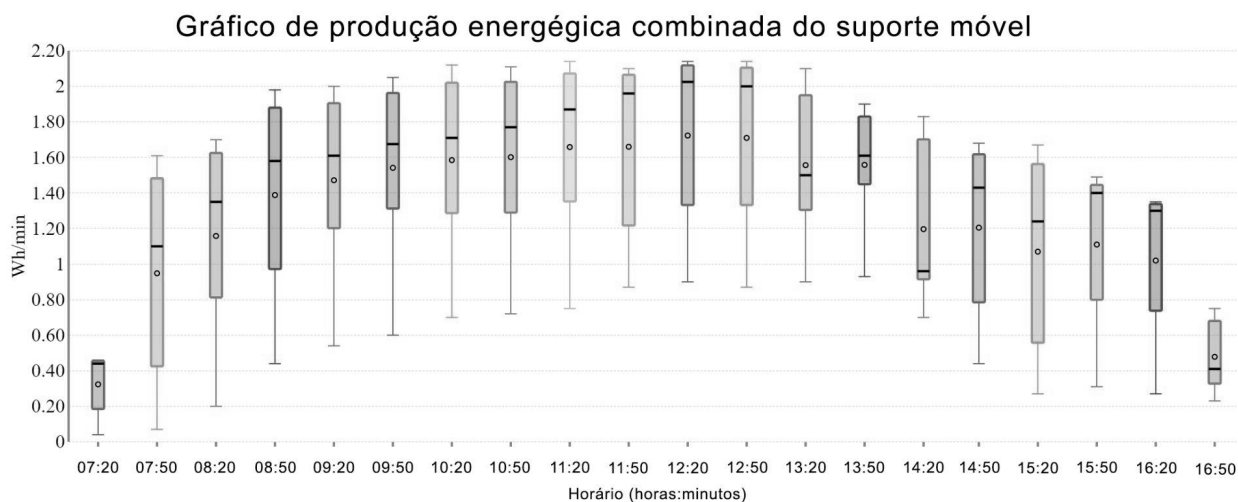


Figura 27. Gráfico Boxplot dos valores encontrados pelo suporte móvel nos 15 dias analisados.

Um fenômeno interessante foi observado no dia 05/05/2021 (**Figura 28**), em que o dia estava nublado até as 14:00 horas e, a partir desse horário o céu ficou sem nuvens. Mesmo com cerca de 65% do dia nublado (situação em que a diferença entre as placas é pequena, o período ensolarado no final da tarde foi responsável pela diferença de 23,32% na produção de energia entre os dois painéis do dia inteiro. Para locais onde a demanda de energia durante o início e o final do dia é grande, pode ser vantajoso o sistema móvel, visto que nesse período a produção chega a ser até 4 vezes melhor.

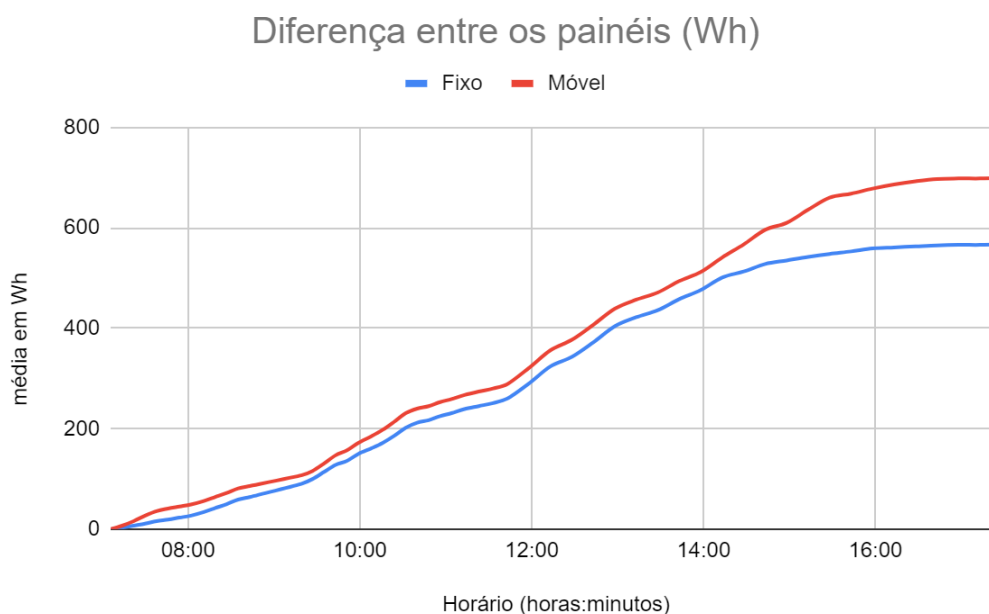


Figura 28. Energia gerada no dia 05/05/2021.

4.4 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA

De acordo com os dados obtidos no período de quinze dias (**Figura 29**), pode-se perceber uma grande flutuação entre a produção de energia entre os dias bem como a diferença entre os painéis em dias nublados e em dias ensolarados (**Figura 30**).

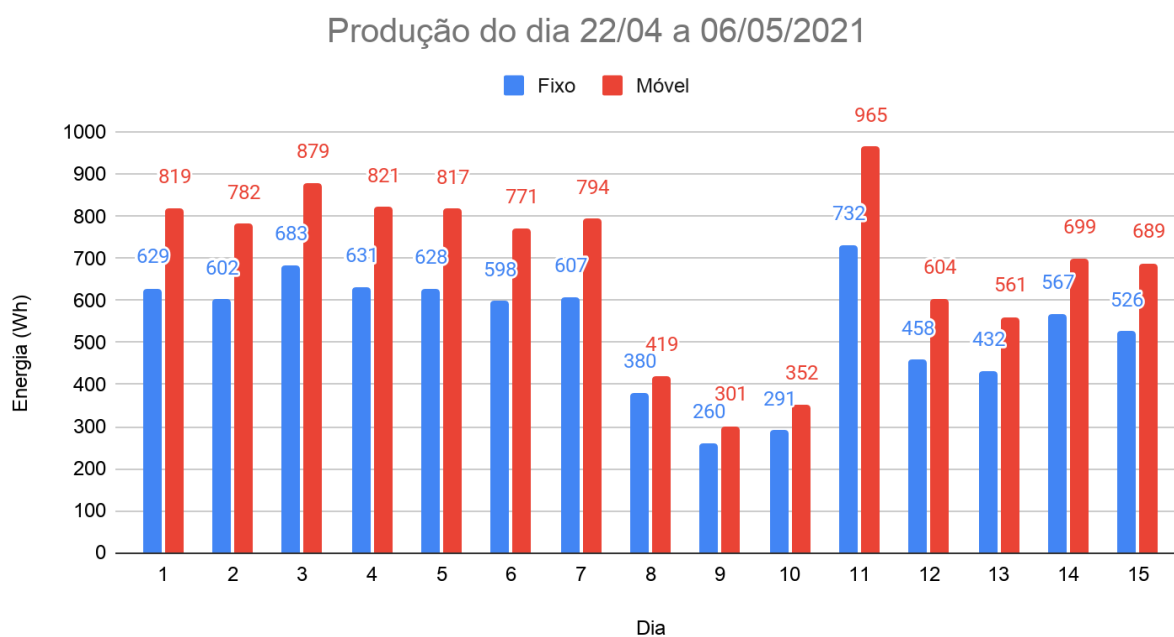


Figura 29. Quantidade de energia gerada no período de 15 dias.

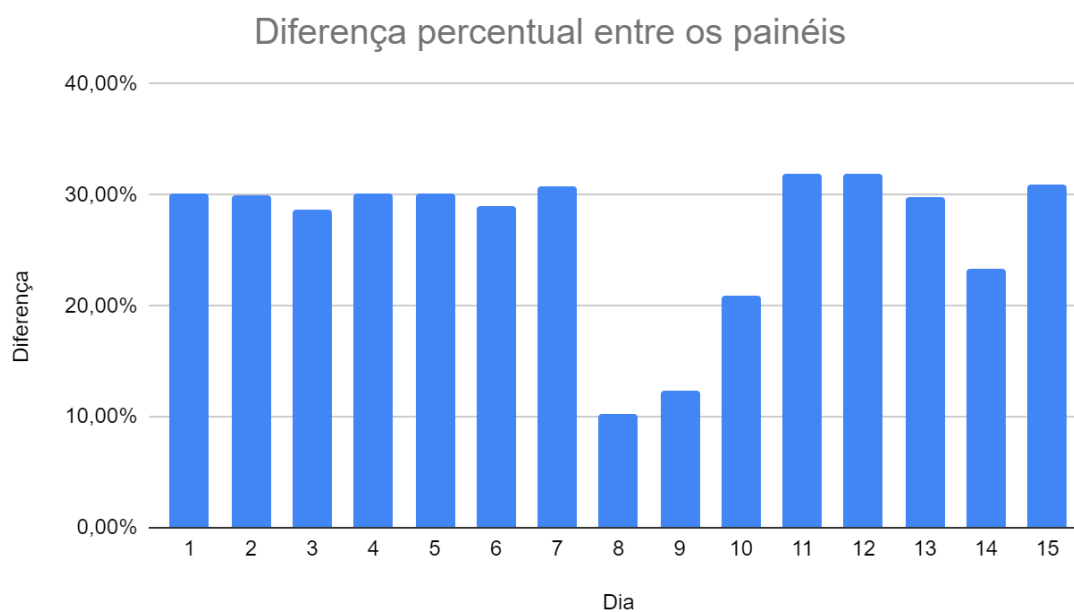


Figura 30. Diferença percentual de energia gerada entre os painéis no período de 15 dias.

Durante o período analisado, a média das diferenças de geração líquida de energia entre os painéis foi de 26,91%. Levando em consideração que o período analisado contou com dias bastante nublados e até mesmo chuvosos e, de acordo com os dados de irradiação solar para o Distrito Federal do INPE, a média anual de diária é de 5271 Wh/m², tal valor é 7,3% maior que a média dos meses de Abril e Maio. Ou seja, a média poderia ter sido maior em uma época mais ensolarada e provavelmente a média anual seria maior que o valor encontrado (IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL PARA O DISTRITO FEDERAL, 2021).

4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para realizar a análise de viabilidade econômica do sistema móvel foi levado em consideração que a instalação não seria feita com apenas um painel solar e sim, com quatro painéis. Assim, foi realizada a simulação com quatro painéis solares, de modo a maximizar o controlador de carga e reduzir o custo final. Os custos do sistema fixo foi de R\$ 3726,00 e do sistema com seguidores solares foi de R\$ 7591,76, o que corresponde a um acréscimo de 103,7%. É importante ressaltar que o sistema usado é Off-grid, um sistema on-grid custaria mais caro. O detalhamento do gasto pode ser visto nas **Tabelas 2, 3 e 4**, apresentadas anteriormente.

Levando em consideração a produção média mensal dos quatro painéis solares com suporte fixo em 75,2 kWh (baseado nos dados do fabricante e dados do INPE para Brasília - DF) o acréscimo de 26,91% para o suporte móvel, tem-se uma produção estimada de 95,43 kWh. Na data presente o valor médio cobrado pelo kWh em Brasília custa R\$0,6162. Dessa forma, a economia em energia elétrica seria de R\$556,00 e R\$705,67 para o suporte fixo e o móvel respectivamente.

4.5.1 VPL, TIR e Payback

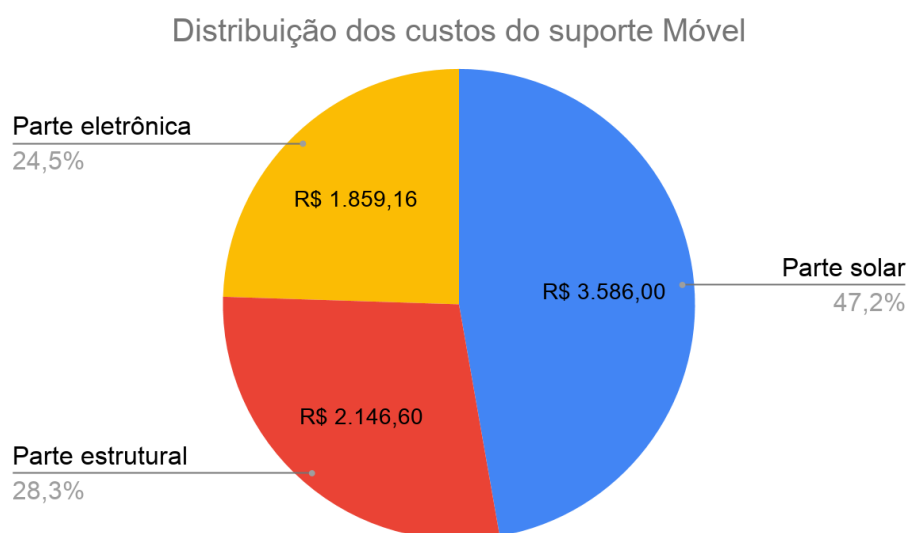
Foram realizados os cálculos para a estimativa de retorno de investimento dos dois sistemas, conforme apresenta a **Tabela 6**, utilizando uma TMA de 5%. Chegou-se à conclusão de que o seguidor solar construído é financeiramente inviável, visto que seu tempo de retorno financeiro é quase o dobro do tempo do suporte fixo.

Tabela 6. Estimativa de tempo de retorno de investimento.

	Painel Fixo	Painel Móvel
Taxa de desconto (i)	5,00%	5,00%
VPL	R\$ 567,75	-R\$ 2.142,76
TIR	8,03%	-1,31%
Payback simples	6,70 anos	10,76 anos
Payback descontado	8,37 anos	15,83 anos

4.5.2 Análise da Inviabilidade

Levando em consideração os resultados adquiridos até o momento, para que existisse a viabilidade econômica no sistema móvel desenvolvido nesse estudo, o valor acrescido ao sistema deveria ser igual ou inferior à porcentagem do ganho energético, que, nesse caso, foi de aproximadamente 27%. Porém, o acréscimo no custo foi de 103.7%. De acordo com a **Figura 31**, o aumento considerável do valor não se deu somente pela adição de uma parte eletrônica mas principalmente pelo aumento da complexidade da parte estrutural.

**Figura 31.** Custos do suporte móvel.

A manutenção dos sistemas é outro fator que deve ser levado em consideração, mesmo não tendo sido contabilizada neste estudo, é esperado que o custo de manutenção do sistema móvel seja consideravelmente maior que o sistema fixo devido a complexidade e custo dos componentes.

Deve-se considerar que os valores dos materiais utilizados sofreram um aumento considerável no período de construção. O aço, por exemplo, teve um aumento acumulado de 200% e o dólar um aumento de 39% nos últimos 15 meses (REAJUSTES DAS USINAS DE AÇO AFLIGEM CLIENTES INDUSTRIAIS, 2021).

5. CONCLUSÕES

Apesar do alto custo do material no momento da execução do estudo, foi possível construir um seguidor solar robusto contendo um sensor de direção de luz solar capaz de funcionar de forma correta em vários cenários de intemperismo (sol, neblina, nuvens e chuva). Assim, foi possível fazer a análise comparativa da geração de energia entre um sistema fixo e móvel durante o período de quinze dias.

A partir dos dados obtidos nesse intervalo e considerando quatro placas fotovoltaicas, houve um acréscimo médio de cerca de 27% de energia quando comparado ao sistema fixo. No entanto, tal acréscimo ainda é insuficiente para superar o investimento na sua confecção, uma vez que seu retorno demandaria o dobro de tempo, quando comparado ao sistema fixo.

A comparação, mesmo em pouco tempo, se mostrou consistente com a literatura e com os valores esperados. Mesmo com o ganho energético, infelizmente o alto custo ainda é um empecilho para a maior disseminação dessa tecnologia.

6. PROPOSTAS DE MELHORIA

Durante a execução deste estudo foram encontrados vários desafios devido ao tamanho do painel escolhido, como a necessidade de um contra-peso, um motor robusto, polias e correias mais caras em relação a outros estudos realizados com painéis pequenos. Além disso, foram percebidos alguns pontos de melhoria que poderiam ser executados para reduzir o custo e aumentar a economia, sendo eles:

- Diminuição da altura do suporte em “U”. Esse foi projetado para permitir uma inclinação de até 85º mas, se mostrou acima do necessário, que seria em torno de 65º;

- Diminuição do comprimento das correias. Foram utilizadas correias com tamanhos comerciais disponíveis no momento da construção mas, há a possibilidade de redução do tamanho sem comprometer a funcionalidade do seguidor;

- Utilização de um motor menor para a movimentação no eixo vertical. Caso fosse utilizada uma relação de polias maior, a utilização de um motor menor acarretaria em um eixo de menor comprimento;

- Fabricação do suporte dos sensores em impressora 3D para diminuir o peso e permitir uma melhor suscetibilidade a intemperismos, pois o MDF utilizado não pode ter contato contínuo com água;

- Aquisição de alguns materiais em maior quantidade (atacado). Tal compra resultaria em uma redução de custo;

- Realização da aquisição dos dados em um período maior de tempo. Um maior número amostral permitiria avaliar a eficiência dos painéis ao longo do ano inteiro e também possibilitaria verificar a resistência do sistema.

- Propor uma solução para sustentar o painel sem que o motor do eixo horizontal precise ficar ligado o tempo todo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada se mostrou coerente, porém o pouco tempo para realização do trabalho não permitiu que fossem realizados mais ciclos entre as etapas 1 e 4 para aprimorar a eficiência e custo do sistema, o que possivelmente resultaria em um menor tempo de retorno financeiro.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10 INSANE SOLAR ENERGY STATS. Disponível em:

<westcoastsolarenergy.com/10-insane-solar-energy-stats> Acesso em: 20 out 2018.

ARAUJO, N. D., ZANESCO, I., FUENTES, R. L., MOEHLECKE, A., GARCIA, S. B., and ARAUJO, G. P., Evolução e análise de sistemas fotovoltaicos no Brasil e Chile, *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado*, p.1-9, 2018.

AZEVÊDO, V., PAES, M. D. C., and TIBA, C., Geographic information systems and economic methods for the evaluation of solar farms sites: Case study in northeast of Brazil, *AIP Conf. Proc. 2033*, p.190001-1–190001-9, 2018.

BRAZIL TO HIT 2 GIGAWATTS OF INSTALLED SOLAR BY END OF 2018. Disponível em:

<cleantechnica.com/2018/05/15/brazil-to-hit-2-gigawatts-of-installed-solar-by-end-of-2018/> Acesso em: 15 out 2018.

BRAZIL HITS 1 GW SOLAR MILESTONE. Disponível em:

<www.pv-magazine.com/2018/01/09/brazil-hits-1-gw-renewables-milestone> Acesso em: 20 out 2018.

CANTONI, ALESSANDRO, Avaliação do desempenho de um algoritmo fuzzy para posicionamento de placas fotovoltaicas, TCC, Curitiba, Paraná, 2017.

CAVALCANTI, J. H. F., MELO, H., SOUTO, C. R., and CAVALCANTI, M. T., Lógica fuzzy aplicada às engenharias, João Pessoa, Paraíba, Brazil, 2012.

CLIMATOLOGIA DE BRASÍLIA - DF. Disponível em:

<www.climatempo.com.br/climatologia/61/brasil-ia-df> Acesso em: 14 set 2018.

COMO A CÉLULA FOTOVOLTAICA FUNCIONA. Disponível em:

<www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/luischan/comofunciona.htm> Acesso em: 3 out 2018.

DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed. Ed. Wiley, 1991, 944p.

FU, R., FELDMAN, D., MARGOLIS, R., WOODHOUSE, M., and ARDANI, K., U.S. Solar Photovoltaic System cost benchmark: Q1 2017, *National Renewable Energy Laboratory*, p.1-73, 2017.

- GASPARIN, F. P., & KRENZINGER, A., Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel, *Revista Brasileira de Energia Solar*, a.8, v.8, n.1, p.10-17, 2017.
- GREEN, M. A., DUNLOP, E. D., HOHL-EBINGER, J., YOSHITA, M., KOPIDAKIS, N., HAO, X., Solar cell efficiency tables (version 56), *Prog Photovolt Res Appl*. v.28, p. 629–638, 2020.
- HAFEZ, A. Z., SOLIMAN, A., EL-METWALLY, K. A., and ISMAIL, I. M., Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 77, p.147–168, 2017.
- HARVESTING, TROUGH, PINPOINTING AND HELIOSTAT SOLAR COLLECTING SYSTEMS, v.2, South Africa, 2015.489p.
- HEPTONSTALL, P., A Review of Electricity Unit Cost Estimates, *UK Energy Research Centre*, p1-23, 2007.
- HOW DOES THE WEATHER AFFECT SOLAR PANEL EFFICIENCY?. Disponível em: <www.1876energy.com/how-does-the-weather-affect-solar-panel-efficiency> Acesso em: 28 set 2018.
- HOW SOLAR PANELS WORK. Disponível em: <www.loomsolar.com/blogs/collections/how-to-generate-electricity-using-solar-panels> Acesso em: 25 set 2020.
- IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL PARA O DISTRITO FEDERAL. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/DF_dir.html> Acesso em: 4 abr 2021.
- KANNAN, N & VAKEESAN, D., Solar energy for future world: - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n.62 p.1092–1105, 2016.
- KHORASANIZADEH, H., MOHAMMADI K., and MOSTAFAEIPOUR, A., Establishing a diffuse solar radiation model for determining the optimum tilt angle of solar surfaces in Tabass, Iran, *Energy Conversion and Management* n.78, p.805–814, 2014.
- MARINHO, M. O. S., Desenvolvimento de um sistema de geração de energia solar de alto rendimento utilizando técnicas de rastreamento solar e MPPT, TCC, Ouro Preto, Minas Gerais, 2018.

- MASSON, T. J., MUNHOZ JR, A. H., MIRANDA, L. F., SILVA, G. T., and SEBASTIANELLI, F. S., *Energia Solar – Célula Fotovoltaica, XVII Safety, Health and Environment World Congress, Vila Real, Portugal,, 2017.*
- NAGARAJA T. K., & PRASHANTH, Design and development of solar panel tracking mechanism, *International Conference on Sustainable Engineering and Technology*, p. 020014-1–020014-8, 2018.
- OPTIMUM TILT OF SOLAR PANELS. Disponível em: <www.solarpaneltilt.com> Acesso em: 4 out 2018.
- OLIVEIRA, F. T. V., & GÓMEZ-MALAGÓN, L. A., Otimização do ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de petrolina, *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado*, p.1-10, 2018
- PANORAMA DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>> Acesso em: fev 2018.
- PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L., RÜTHER, R., ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S. V., and SOUZA, J. G., *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2.ed. Brazil: INPE, 2017.80p.
- PHOTOVOLTAICS REPORT, Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>> Acesso em 25 nov 2018.
- PRINSLOO, G. & DOBSON, R., *Sun Tracking and Solar Renewable Energy Harvesting: Solar Energy*, v.2. South Africa, 2015. 489p.
- REAJUSTES DAS USINAS DE AÇO AFLIGEM CLIENTES INDUSTRIAIS. Disponível em <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/03/11/reajustes-das-usinas-de-aco-afligem-clientes-industriais.ghtml>> Acesso em 02 mai 2021.
- RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT. Disponível em <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf> Acesso em 25 nov 2018.
- SLAM, H., MEKHILEF, S., SHAH, N. B. M., SOON, T. K., SEYEDMAHMOUSIAN, M., HORAN, B., and STOJCEVSKI, A., Performance Evaluation of Maximum Power Point Tracking Approaches and Photovoltaic Systems, *Energies* n.11, v.365, p.1-24, 2018.

SOLAR INDUSTRY RESEARCH DATA. Disponível em:

<www.seia.org/solar-industry-research-data> Acesso em: 03 fev 2021.

SOLAR PHOTOVOLTAIC OUTPUT DEPENDS ON ORIENTATION, TILT, AND

TRACKING. Disponível em: <www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18871>

Acesso em: 20 set 2018.

SUNCALC - SUN POSITION CALCULATOR. Disponível em:

<<http://suncalc.net/#/-15.9027,-47.9386,16/2021.05.07/16:43>> Acesso em: 14 abr 2021.

STINE, W. B. & GEYER, M., *Power from the Sun*, 2001, disponível em:

< <http://www.powerfromthesun.net/book.html>, > Acesso em: 25 nov 2018.

TAN, J. A. & CHUA, A., Design of a Mechatronic Sensor System for Solar Energy Demand Based Monitoring, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, v.10, n.1-5, p.41-45, 2018.

VERISSIMO, P. H. A., Avaliação de uma usina solar fotovoltaica comparando diferentes topologias de sistemas de fixação utilizando duas diferentes tecnologias FV, Dissertação, Florianópolis, Santa Catarina, 2017.

WILLIAMS, J. R., HAKA, S. F., BETTNER, M. S. and CARCELLO, J. V., *Financial and Managerial Accounting*, 16ed. Ed. McGraw-Hill, 2011, 1264p.

9. APÊNDICE

APÊNDICE A - Código do Arduino

```
// Inclui as bibliotecas de C e do motor de passo
#include <stdarg.h>
#include <AccelStepper.h>
//Define todos os parâmetros de configuração do programa.
#define DEBUG 0
#define DELAY 800
#define MODO_AUTOMATICO      0
#define MODO_MANUAL          1
#define SERIAL_PRINTF_MAX_BUFF 256
#define F_PRECISION          2
#define STEP_M1 3 // PASSO MOTOR 1
#define DIR_M1 2 // DIREÇ MOTOR 1
#define STEP_M2 6 // PASSO MOTOR 2
#define DIR_M2 5 // DIREÇ MOTOR 2
#define ENABLE2 7 / DESLIGA MOTOR 2
#define TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL 10
#define QTD_SENSORES_LUZ 4
#define VLR_MIN_ANALOG_ATIVACAO_MOTOR 300
#define VLR_MAX_ANALOG_ATIVACAO_MOTOR 700
#define VLR_DIFF_ATIVACAO 50
#define VLR_VELOCIDADE_STEP 200
#define VLR_ESCURO_RESETAR 80
#define VLR_MAXIMO_CLARIDADE 800
#define VLR_MAX_STEP 1000
#define VLR_MAX_DE 130
#define VLR_MAX_TB 300
#define STE 0
#define STD 1
#define SBE 2
#define SBD 3
```

```

void serialPrintf(const char *fmt, ...);
// Define os pinos de entrada dos sensores
const int pinoSBD = A3; // SENSOR 0
const int pinoSTD = A2; // SENSOR 1
const int pinoSTE = A1; // SENSOR 2
const int pinoSBE = A0; // SENSOR 3

const int MODO = MODO_AUTOMATICO;
int steps = 1025;

int valoresBrutos[QTD_SENSORES_LUZ] = {0};
int valoresNormalizados[QTD_SENSORES_LUZ] = {0};
int amostrasSTE[TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL] = {0};
int amostrasSTD[TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL] = {0};
int amostrasSBE[TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL] = {0};
int amostrasSBD[TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL] = {0};
int posicaoAmostras[QTD_SENSORES_LUZ] = {0};
long somaAmostras[QTD_SENSORES_LUZ] = {0};
float valoresMedios[QTD_SENSORES_LUZ] = {0};

float mediaT = 0.0;
float mediaB = 0.0;
float mediaE = 0.0;
float mediaD = 0.0;
float diffTB = 0.0;
float diffED = 0.0;
// Define a configuração do motor de acordo com a biblioteca
AccelStepper stepperTB(1, STEP_M1, DIR_M1);
AccelStepper stepperDE(1, STEP_M2, DIR_M2);
// Define os pinos de saída do Arduino com os pinos de entrada do Driver
void setup() {
  pinMode(DIR_M1, OUTPUT);
  pinMode(STEP_M1, OUTPUT);
  pinMode(DIR_M2, OUTPUT);
  pinMode(STEP_M2, OUTPUT);

```

```

pinMode(ENABLE2, OUTPUT);
delay(50);
Serial.begin(9600);
}
// Programa em C para calcular a média móvel
void serialPrintf(const char *fmt, ...) {

char buf[SERIAL_PRINTF_MAX_BUFFER];
char *pbuf = buf;
va_list pargs;

va_start(pargs, fmt);
while(*fmt) {
if(*fmt == '%') {
switch(++fmt) {
case 'd':
case 'i':
pbuf += sprintf(pbuf, "%d", va_arg(pargs, int));
break; case 'u':
pbuf += sprintf(pbuf, "%u", va_arg(pargs, unsigned int));
break; case 'l':
switch(++fmt) {
case 'd':
case 'i':
pbuf += sprintf(pbuf, "%ld", va_arg(pargs, long));
break; case 'u':
pbuf += sprintf( pbuf, "%lu",
va_arg(pargs, unsigned long));
break;
}
}
break; case 'f':
pbuf += strlen(dtostrf( va_arg(pargs, double),
1, F_PRECISION, pbuf));
break;
}
}
}

```

```

    case 'c':
        *(pbuf++) = (char)va_arg(pargs, int);
        break;    case 's':
            pbuf += sprintf(pbuf, "%s", va_arg(pargs, char *));
            break;    case '%':
                *(pbuf++) = '%';
                break;    default:
                break;
        }
    } else {
        *(pbuf++) = *fmt;
    }
    fmt++;
}
*pbuf = '\0';
va_end(pargs);
Serial.print(buf);
}

float mediaMovel(int *ptrArrNumbers, long *ptrSum, int *pos, int len, int nextNum) {
    *ptrSum = *ptrSum - ptrArrNumbers[*pos] + nextNum;
    ptrArrNumbers[*pos] = nextNum;
    *pos = (*pos + 1) % len;
    return *ptrSum / (float)len;
}

// Executa do programa de reinicialização quando não há sol
void reset(){
    stepperTB.setMaxSpeed(VLR_MAX_STEP/4.0);
    stepperDE.setMaxSpeed(VLR_MAX_STEP/4.0);
    stepperTB.moveTo(0);
    stepperTB.runToPosition();
    stepperDE.moveTo(0);
    stepperDE.runToPosition();
    desligar();
}

```

```

}
void desligar(){
  desligarTB();
}
void desligarDE(){
  stepperDE.stop();
  stepperDE.disableOutputs();
}
void checkReset(){
  if(getValorMedioGeral() < VLR_ESCURO_RESETAR){
    serialPrintf("resetando...\n");
    reset();
  }
}
float getValorMedioGeral(){
  return (mediaT+mediaB+mediaE+mediaD) / 4.0;
}
void automatico(){
  input();
  calculo();
  info();
  checkReset();
}

```

// Define as variáveis e remapeia a entrada dos sensores

```

void input(){
  valoresBrutos[STE] = analogRead(pinoSTE);
  valoresBrutos[STD] = analogRead(pinoSTD);
  valoresBrutos[SBE] = analogRead(pinoSBE);
  valoresBrutos[SBD] = analogRead(pinoSBD);
  valoresNormalizados[STE] = map(valoresBrutos[STE], 0, 795, 0, 1000);
  valoresNormalizados[STD] = map(valoresBrutos[STD], 0, 737, 0, 1000);
  valoresNormalizados[SBE] = map(valoresBrutos[SBE], 0, 728, 0, 1000);
  valoresNormalizados[SBD] = map(valoresBrutos[SBD], 0, 793, 0, 1000);
  stepperTB.setMaxSpeed(VLR_MAX_STEP);
}

```

```

stepperDE.setMaxSpeed(VLR_MAX_STEP);
}
// Verifica se o painel chegou no limite do movimento
void checkMovimentoDireita(){
  if(stepperDE.currentPosition() < VLR_MAX_DE){
    serialPrintf("Movimento direita\n");
    stepperDE.setSpeed(VLR_VELOCIDADE_STEP);
    stepperDE.runSpeed();
  }
}
void checkMovimentoEsquerda(){
  if(stepperDE.currentPosition() > -VLR_MAX_DE){
    serialPrintf("Movimento esquerda\n");
    stepperDE.setSpeed(-VLR_VELOCIDADE_STEP);
    stepperDE.runSpeed();
  }
}
void checkMovimentoCima(){
  if(stepperTB.currentPosition() < VLR_MAX_TB){
    serialPrintf("Movimento cima\n");
    stepperTB.setSpeed(VLR_VELOCIDADE_STEP);
    stepperTB.runSpeed();
  }
}
void checkMovimentoBaixo(){
  if(stepperTB.currentPosition() > -VLR_MAX_TB){
    serialPrintf("Movimento baixo\n");
    stepperTB.setSpeed(-VLR_VELOCIDADE_STEP);
    stepperTB.runSpeed();
  }
}
// Realiza os cálculos das médias entre os sensores
void calculo(){

```

```

    valoresMedios[STE] = mediaMovel(amostrasSTE, &somaAmostras[STE],
&posicaoAmostras[STE],
    TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL,
valoresNormalizados[STE]);
    valoresMedios[STD] = mediaMovel(amostrasSTD, &somaAmostras[STD],
&posicaoAmostras[STD],
    TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL,
valoresNormalizados[STD]);
    valoresMedios[SBE] = mediaMovel(amostrasSBE, &somaAmostras[SBE],
&posicaoAmostras[SBE],
    TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL,
valoresNormalizados[SBE]);
    valoresMedios[SBD] = mediaMovel(amostrasSBD, &somaAmostras[SBD],
&posicaoAmostras[SBD],
    TAMANHO_JANELA_MEDIA_MOVEL,
valoresNormalizados[SBD]);

```

```

mediaT = (valoresMedios[STE] + valoresMedios[STD])/2.0;
mediaB = (valoresMedios[SBE] + valoresMedios[SBD])/2.0;
mediaE = (valoresMedios[STE] + valoresMedios[SBE])/2.0;
mediaD = (valoresMedios[STD] + valoresMedios[SBD])/2.0;

```

```

diffTB = mediaT - mediaB;
diffED = mediaE - mediaD;

```

//Realiza os movimentos de acordo com as entradas

```

if(abs(diffED) > VLR_DIFF_ATIVACAO){
    if(diffED > 0){
        checkMovimentoDireita();
    }else{
        checkMovimentoEsquerda();
    }
}else{
    desligarDE();
}
if(abs(diffTB) > VLR_DIFF_ATIVACAO){
    if(diffTB < 0){
        checkMovimentoCima();
    }else{

```

```

    checkMovimentoBaixo();
}
}else{
    desligarTB();
}
}

// Escreve na saída serial do arduino alguns resultados para verificação
void info(){
    serialPrintf("posicaoTB: %d\t", stepperTB.currentPosition());
    serialPrintf("posicaoDE: %d\n", stepperDE.currentPosition());
    serialPrintf( "brutoSTE: %d \t brutoSTD: %d\nbrutoSBE: %d \t brutoSBD: %d\n",
valoresBrutos[STE], valoresBrutos[STD], valoresBrutos[SBE], valoresBrutos[SBD]);
// serialPrintf( "normalSTE: %d \t normalSTD: %d\nnormalSBE: %d \t normalSBD: %d\n",
valoresNormalizados[STE], valoresNormalizados[STD], valoresNormalizados[SBE],
valoresNormalizados[SBD]);
// serialPrintf( "medioSTE: %f\t medioSTD: %f\nmedioSBE: %f\t medioSBD: %f\n",
valoresMedios[STE], valoresMedios[STD], valoresMedios[SBE], valoresMedios[SBD]);
// serialPrintf("medioGeral: %f\n", getValorMedioGeral());
// serialPrintf( "avgT: %f\tavgB: %f\navgE: %f\tavgD: %f\n", mediaT, mediaB, mediaE,
mediaD);
    serialPrintf( "diffTB: %f\tdiffED: %f\n", diffTB, diffED);
    serialPrintf("-----\n");
}

// Executa o programa
void loop() {
    if(MODO == MODO_AUTOMATICO){
        automatico();
    }else{
        manual();
    }
    delay(DELAY);
}

```


APÊNDICE B - Fotos



