



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Rivanildo Alves Soares

**DESENVOLVIMENTO DE UM SEGUIDOR SOLAR DE BAIXO CUSTO
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE PEQUENO PORTE**

Campina Grande, Paraíba
13 de maio de 2021

Rivanildo Alves Soares

**DESENVOLVIMENTO DE UM SEGUIDOR SOLAR DE BAIXO
CUSTO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenadoria de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba
13 de maio de 2021

Rivanildo Alves Soares

**DESENVOLVIMENTO DE UM SEGUIDOR SOLAR DE BAIXO CUSTO
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 13/05/2021

Prof. Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Profa. Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Campina Grande, Paraíba
13 de maio de 2021

Dedico este trabalho a todos que me inspiram e ensinam a ser um ser humano e profissional cada vez melhor: família, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha mãe Marilene e à minha avó Rita, que não pouparam esforços para proporcionar a oportunidade de caminhar com “minhas próprias pernas”. Sem ambas, tenho certeza de que não seria possível chegar tão longe.

À minha orientadora, Profa. Núbia Brito, por todos os ensinamentos e oportunidades que me foram dadas, por se mostrar atenciosa e pela valiosíssima orientação durante três anos de Iniciação Científica e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Célio Anésio, por todos os conhecimentos transmitidos, pela paciência, amizade e atenção ao longo do curso.

Aos meus amigos e colegas de curso, agradeço pelo apoio e conhecimentos compartilhados, em especial, agradeço a José Domingos, José Patrício, Maurilio, Paulo Vitor e William Santos. Sou grato a todos pela amizade que construímos.

A todos que fazem ou fizeram parte do cotidiano LSP e do LARCA da UFCG. Obrigado pela troca de conhecimentos, pelo acolhimento e pela integração no grupo durante todos esses anos. Um agradecimento especial a Matheus Dantas e Felipe Barros, que foram primordiais no desenvolvimento desse trabalho.

Aos excelentes funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial a Adail e Tchaikovsky, pelo carinho e dedicação exemplar no exercício de suas funções.

E por fim, agradeço à UFCG e funcionários pelo suporte dado durando os cinco anos de curso, em especial aos professores, pelo conhecimento transmitido e ao setor de assistência social, pelo apoio.

Se fracassar, ao menos que fracasse ousando grandes feitos, de modo que a sua postura não seja nunca a dessas almas frias e tímidas que não conhecem nem a vitória nem a derrota.

Theodore Roosevelt

RESUMO

Um protótipo de um seguidor solar de baixo custo é apresentado neste trabalho, o qual é usualmente utilizado para melhorar o processo de captação de painéis fotovoltaicos, garantindo o máximo aproveitamento da radiação solar incidente. O protótipo foi construído usando um modelo de seguidor solar de duplo eixo e utiliza componentes eletrônicos simples e acessíveis. As características construtivas resultaram em um sistema de baixo custo e de fácil montagem. Nos valores atuais, o custo final de fabricação foi de cerca de 10% do valor cobrado por um modelo semelhante disponível no mercado internacional. O sistema fotovoltaico completo foi construído e simulado computacionalmente e ao final, demonstrou-se sua eficácia e eficiência, ou seja, o protótipo foi capaz de seguir de modo efetivo o movimento do Sol e gerar aumento de geração próximo de 16% em relação a um sistema fixo.

Palavras-Chave: Energia Fotovoltaica, Seguidor Solar, Rastreador Solar.

ABSTRACT

A prototype of a low cost solar tracker is presented in this work, which is usually used to improve the process of capturing photovoltaic panels, ensuring the maximum use of incident solar radiation. The prototype was built using a dual-axis solar tracker model and uses simple and affordable electronic components. The constructive characteristics resulted in a low cost and easy assembly system. At current prices, the final cost of manufacture was about 10% of the amount charged for a similar model available on the international market. The complete photovoltaic system was built and simulated computationally and at the end, its effectiveness and efficiency was demonstrated, that is, the prototype was able to effectively follow the movement of the Sun and generate an increase in generation close to 16% in relation to a fixed system.

Keywords: Photovoltaic Energy, Solar Tracker, Solar Tracker.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes da radiação solar na atmosfera.	17
Figura 2 - Efeito fotovoltaico.....	18
Figura 3 - Curva característica de uma célula fotovoltaica.....	18
Figura 4 - (a) Posição do Sol. (b) Curva teórica da potência.....	19
Figura 5 - Seguidor passivo.....	21
Figura 6 - Seguidores solares:	22
Figura 7 - Estrutura do seguidor solar.....	27
Figura 8 - Eixos de movimentação do seguidor solar.	28
Figura 9 - Componentes dos eixos de movimento.	28
Figura 10 - (a) Micro inversor e sistema de monitoramento.....	29
Figura 11 - Diagrama elétrico do sistema.....	30
Figura 12 - Esquema do sistema eletrônico do seguidor solar.....	31
Figura 13 - Circuito eletrônico do sensor de alinhamento.....	31
Figura 14 - Estrutura para alocação dos sensores de luminosidade.	32
Figura 15 - Placa Arduino Nano V3.....	33
Figura 16 - Módulo relé.....	33
Figura 17 - Motor de corrente contínua do atuador	34
Figura 18 - Acionamento do motor no sentido usual de rotação.....	34
Figura 18 - Módulo conversor de tensão CC-CC.	35
Figura 19 - Estrutura construída do seguidor solar proposto.	36
Figura 21 - Conexão do sistema na rede elétrica.	37
Figura 22 - Circuito eletrônico de controle do seguidor solar.....	39
Figura 23 - Instalação do Protótipo.	39
Figura 24 - Exemplo de dados coletados durante um dia.	41
Figura 25 - Dados coletados em um mês.....	42
Figura 26 - Relatório detalhado dos dados coletados para o dia.	42
Figura 27 - Sistemas fixo x Sistema com seguidor solar.....	43
Figura 27 - Seguidor solar comercial.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Custo da mecânica do seguidor.	45
Tabela 3 - Custo da eletrônica de controle.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 MOTIVAÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 ENERGIA SOLAR.....	16
2.2 SEGUIDORES SOLARES	20
2.2.1 SEGUIDORES PASSIVOS	20
2.2.2 SEGUIDORES ATIVOS.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 ESTRUTURA MECÂNICA	26
4.2 INVERSOR E SISTEMA DE MONITORAMENTO	28
4.3 SISTEMA ELETRÔNICO	30
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5.1 ESTRUTURA FÍSICA	36
5.2 INVERSOR E SISTEMA DE COLETA DE DADOS.....	37
5.3 ANÁLISE DA EFICÁCIA DO SEGUIDOR SOLAR PROPOSTO.....	38
5.3.1 TESTE DO CIRCUITO DE CONTROLE EM BANCADA.....	38
5.3.2 TESTE DO PROTÓTIPO EM AMBIENTE EXTERNO.....	39
5.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SEGUIDOR SOLAR PROPOSTO.....	41
5.5 ANÁLISE DE CUSTOS.....	44
6. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da demanda por energia elétrica vem compelindo a busca por novas fontes de produção energia elétrica, dentre as quais destacam-se as provenientes da energia solar, considerada uma das mais promissoras. Na prática, o termo energia solar é usado para designar todo tipo de captação de energia luminosa ou térmica proveniente do Sol, que posteriormente, será transformada em alguma outra forma de energia utilizável pelo homem, seja diretamente para energia elétrica ou térmica.

Neste contexto, destaca-se a energia fotovoltaica, a qual vem sendo aplicada em larga escala para suprir sistemas urbanos de médio e pequeno porte, preferencialmente interconectados à rede elétrica ou em aplicações autônomas, como sistemas de telecomunicações, pequenos sistemas de aquisição de dados, eletrificação rural, bombeamento de água e sistemas de processos de dessalinização de água. Na grande maioria destas aplicações, a substituição de meios alternativos por sistemas fotovoltaicos tem sido vantajosa, principalmente em sistemas de pequena potência, onde sua difusão é significativa (FERNANDES, 2016).

Visando incentivar o seu uso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu em abril de 2012, o Regime de Compensação de Energia Elétrica, que se baseia na comparação entre as energias consumida e gerada pela unidade consumidora, para efetuar reduções na sua conta de energia. No caso do estado da Paraíba, o governo estadual firmou no ano de 2016, um acordo de cooperação entre o Banco do Nordeste do Brasil e a Gestão Unificada (Emepa/Interpa/ Emater) para viabilizar o uso de sistemas fotovoltaicos na agricultura familiar no estado (JORNAL DA PARAÍBA, 2016).

Segundo o GRENPEACE (2016), a estimativa é de que o Brasil poderá ter até 2050, um total de 118 GW de potência instalada em sistemas de geração solar distribuída. Portanto, a realização de pesquisas que conduzam à implantação segura e eficiente da energia fotovoltaica no Brasil, é sem dúvida, importante e necessária.

1.1 MOTIVAÇÃO

Dentre as várias linhas de pesquisas relacionados com sistemas fotovoltaicos, a busca pelo aumento da eficiência dos sistemas de captação solar constitui uma das mais desafiadoras, haja visto o alto custo financeiro e o baixo rendimento dos sistemas de conversão de energia solar em energia elétrica (PASSOS, 2017). Apesar dos muitos avanços já alcançados, as melhores células fotovoltaicas apresentam ainda um índice de eficiência baixo, na faixa compreendida entre 11% e 25%, dependendo do material utilizado (FREITAS, 2012). Esses valores se devem ao fato de a potência diária entregue por esse dispositivo depender de muitos fatores como: fabricante, temperatura de operação, radiação, ângulo de incidência sobre sua superfície, etc. (GONZAGA, 2013).

Na busca pelo aumento da eficiência desses sistemas fotovoltaicos, alguns métodos tentam obter o máximo aproveitamento da radiação solar incidente, dentre os quais, destaca-se o Seguidor Solar. Nesse método, o objetivo é acompanhar a movimentação do Sol ao longo do dia e do ano, buscando alinhar os raios solares perpendicularmente sobre a superfície do painel fotovoltaico, de modo a garantir o maior rendimento e conseqüentemente, aumento da potência média anual entregue (CASSERES, 2016).

Análise de mercado mostrou que no âmbito internacional, vários tipos de seguidores solar estão disponíveis, os quais, entretanto, resultam em custos elevados, devido sobretudo ao processo de importação. Além disso, o uso de componentes eletrônicos pouco usuais no mercado nacional, dificulta a reposição de componentes danificados. Este fato motivou o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), o qual apresenta as ideias de um protótipo de um seguidor solar de baixo custo, construído com tecnologia simples e com componentes disponíveis no mercado nacional.

1.2 OBJETIVOS

Este TCC teve como objetivo geral desenvolver um sistema de seguimento solar de baixo custo para sistemas fotovoltaicos de pequeno porte e como objetivos específicos:

- Construir um protótipo de um seguidor solar;
- Realizar análise de custos do protótipo;
- Comparar os desempenhos de um sistema fotovoltaico fixo e do sistema fotovoltaico com seguidor solar desenvolvido;
- Realizar análise de eficácia e eficiência na captação de luz solar dos dois sistemas (fixo e com seguimento solar).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto foi organizado em sete capítulos, incluindo este capítulo introdutório, conforme a seguir:

- Capítulo 2: apresentação dos conceitos teóricos requeridos para o entendimento do trabalho, como: energia e radiação solar, influência dos ângulos de incidência dos raios solares sobre um painel fotovoltaico, funcionamento dos principais tipos de seguidores solares.
- Capítulo 3: análise crítica dos trabalhos considerados mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 4: apresentação dos detalhes do projeto e desenvolvimento do seguidor solar.
- Capítulo 5: apresentação e discussão dos resultados obtidos e dos custos financeiros.
- Capítulo 6: apresentação das conclusões, sugestões de melhorias e propostas para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se a seguir, uma síntese dos temas mais relevantes para o desenvolvimento deste TCC.

2.1 ENERGIA SOLAR

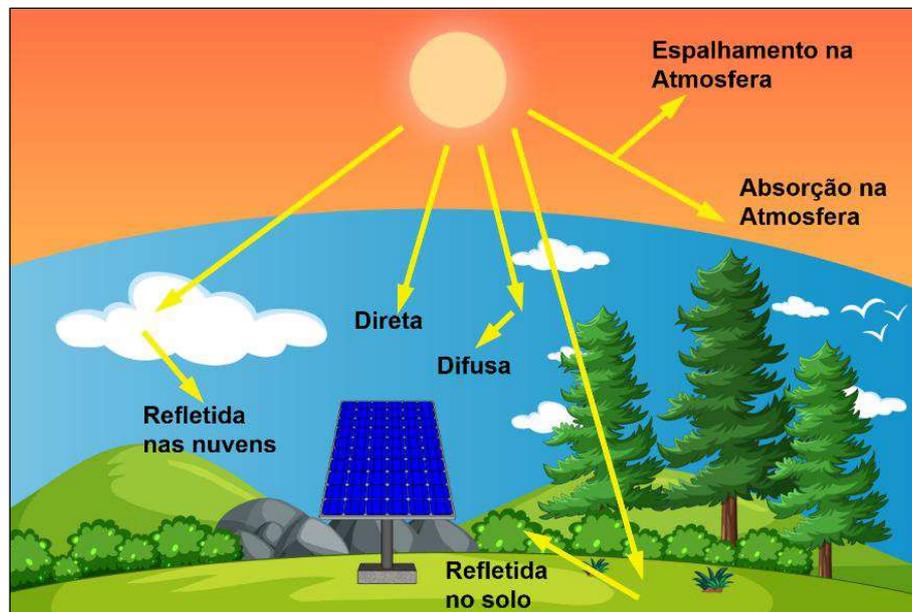
O termo energia solar é usado para designar todo tipo de energia luminosa ou térmica proveniente do Sol. Essa energia é o resultado do processo de fusão nuclear que ocorre na superfície do Sol ocasionado pela alta temperatura e pressão, onde os núcleos de átomos leves, como hidrogênio e hélio, liberam grandes quantidades de energia radiante em todas as direções ao seu redor. Essa energia é emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz, denominada de radiação ou irradiância solar. Devido à enorme distância entre a Terra e o Sol, apenas uma pequena parte da radiação emitida atinge o limite superior da atmosfera terrestre, a qual é denominada de “radiação solar incidente”. Ao atravessar a atmosfera, sua intensidade começa a diminuir e se divide em três tipos: energia refletida, absorvida ou transmitida. A reflexão da radiação solar ocorre principalmente, por agentes naturais como as nuvens, o gelo, a neve ou até mesmo, a superfície do planeta (CASSERES, 2016).

A radiação solar pode ser medida em unidades de potência por área (kW/m^2) e ao atravessar a atmosfera apresenta valores que variam durante o dia desde $0 \text{ kW}/\text{m}^2$ até um máximo de $1 \text{ kW}/\text{m}^2$, durante o período de maior radiação (CORTEZ, 2013). Essa variação de valores, também é conhecida como radiação solar global, sendo composta por duas partes, as quais são ilustradas na Figura 1: (ATLAS, 2017).

- Radiação solar direta: parte da radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer alteração em sua direção original, chegando diretamente à superfície da Terra.

- Radiação solar difusa: parte da radiação solar que ao atravessar a atmosfera, é espalhada indistintamente pela superfície da Terra por diferentes direções, ocasionadas pela interferência de gases, aerossóis e poeira (FREIRE, 2013).

Figura 1 - Componentes da radiação solar na atmosfera.

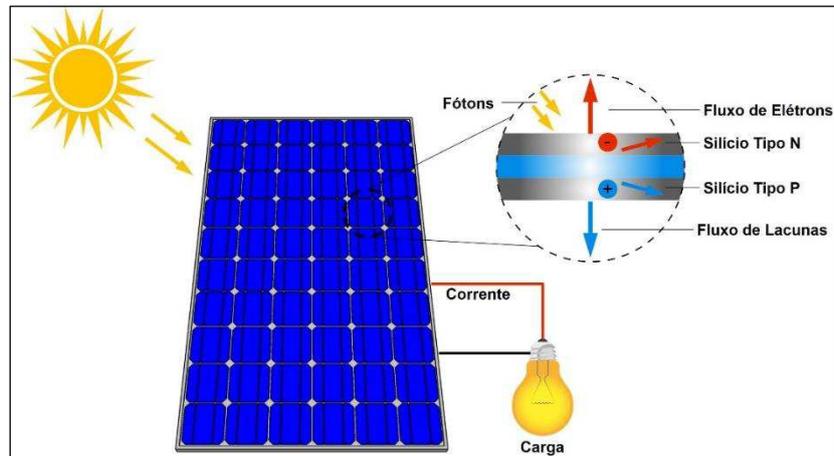


Fonte: Autoria Própria.

A radiação solar incidente na superfície terrestre pode ser convertida diretamente em energia elétrica por meio de sistemas de conversão, dentre os quais destacam-se aqui os sistemas fotovoltaicos, que se baseiam no uso de células fotovoltaicas, constituídas de dois tipos de silício, justapostos em duas camadas (uma camada fina do silício de tipo N é disposta sobre uma camada mais espessa de silício do tipo P) (MORAES, 2012).

Quando os fótons emitidos pelo Sol incidem sobre a célula fotovoltaica, uma excitação de elétrons presentes na estrutura do silício é provocada, o que resulta no surgimento de uma diferença de potencial nos extremos da estrutura do material. Como consequência, surge um fluxo de elétrons entre o silício do tipo N e o silício do tipo P. Caso um fio condutor seja conectado a esse dispositivo, uma corrente elétrica será conduzida por ele até sistemas que irão armazenar ou consumir a energia elétrica gerada. Na prática, os sistemas fotovoltaicos são constituídos de painéis fotovoltaicos, os quais são constituídos por células fotovoltaicas interconectadas. Um resumo desse processo é ilustrado na Figura 2.

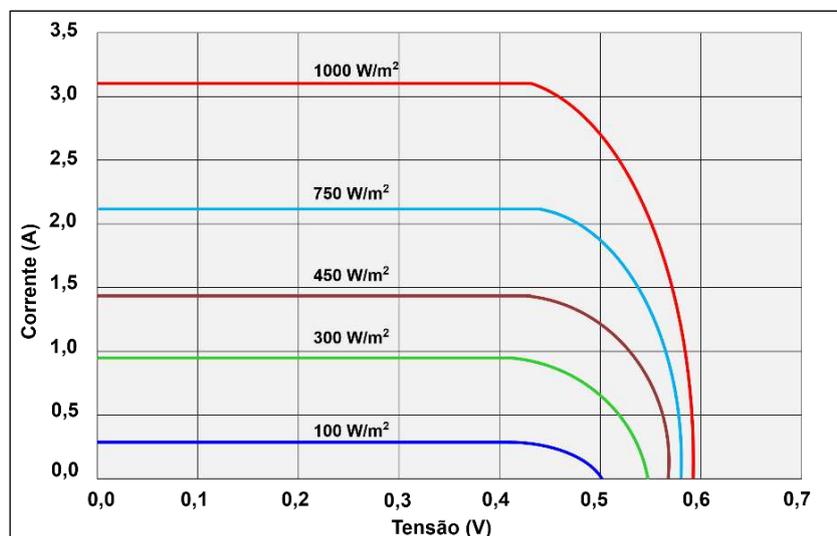
Figura 2 - Efeito fotovoltaico.



Fonte: Autoria Própria.

Como se percebe, a energia gerada por uma célula fotovoltaica tem relação direta com a radiação solar incidente sobre sua superfície. Essa relação é mostrada na Figura 3, que apresenta a curva característica de uma célula fotovoltaica para intensidades luminosas diferentes à uma temperatura constante.

Figura 3 - Curva característica de uma célula fotovoltaica.



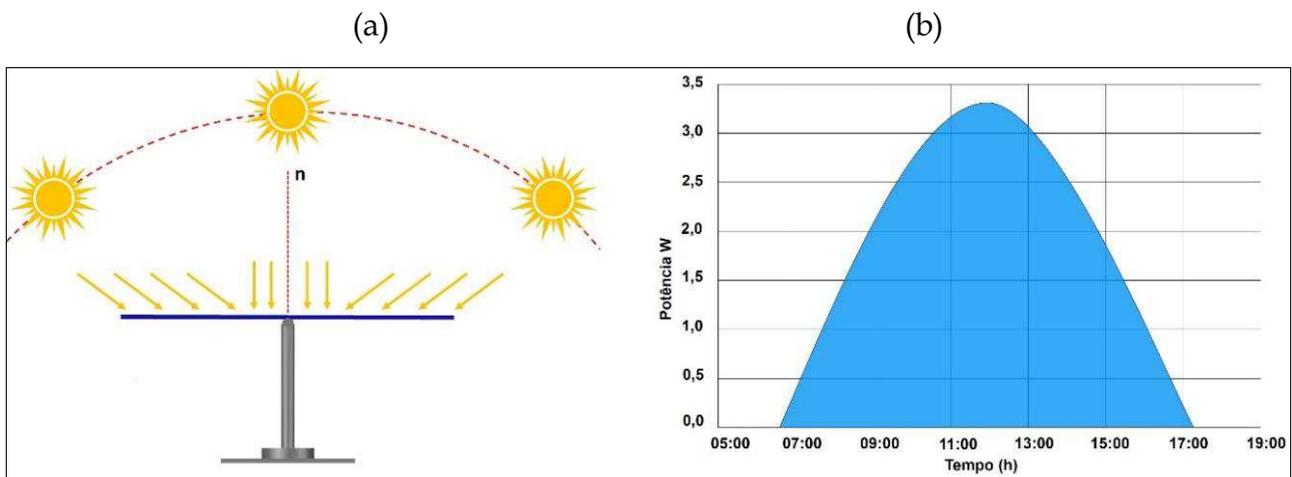
Fonte: Autoria Própria.

Análise da Figura 3 mostra que a corrente gerada pela célula aumenta significativamente quando a radiação solar incidente aumenta, enquanto a tensão apresenta apenas uma

pequena variação. Deduz-se então, que a intensidade da radiação solar incidente interfere diretamente na potência entregue pelo sistema (RIBEIRO, 2012).

Na prática, a radiação solar captada por um painel fotovoltaico apresenta variações na intensidade provocada por ângulos de incidência diferentes gerados pelo movimento aparente do Sol ao longo do dia. Essas variações também resultam em variações na potência entregue pelos sistemas de conversão. Por exemplo, para um painel fotovoltaico fixo e sem qualquer inclinação, como mostrado a Figura 4, a potência gerada ao longo do dia apresenta seu maior valor às 12 horas (meio-dia), quando o Sol atinge sua amplitude máxima no céu e o ângulo de incidência dos raios solares na sua superfície é praticamente perpendicular. Este fato implica em geração de energia maior quando o módulo fotovoltaico está diretamente voltado para o Sol.

Figura 4 - (a) Posição do Sol. (b) Curva teórica da potência.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que a potência gerada por um painel fotovoltaico ou por uma célula fotovoltaica depende significativamente da intensidade luminosa e do ângulo de incidência dos raios solares na sua superfície. Portanto, quanto mais próximo da perpendicularidade for a incidência dos raios solares na superfície desses sistemas, maior será a intensidade da radiação e por consequência, maior será a potência entregue (GONZAGA, 2013). Assim, é crucial o ajuste da inclinação do sistema de captação, de modo a condicionar a incidência dos raios solares sempre no modo perpendicular, garantindo o máximo aproveitamento de energia.

2.2 SEGUIDORES SOLARES

Um seguidor solar é um dispositivo utilizado junto a um painel ou arranjo de painéis fotovoltaicos que permite o ajuste automático do ângulo do conjunto de tal forma que esteja sempre voltado em direção ao Sol, em todos os instantes do dia, garantindo a máxima incidência dos raios solares, ou seja, perpendicularmente à superfície dos coletores. O ajuste automático permite que haja melhor aproveitamento da energia emitida pelo Sol, o que possibilita aumento significativo do rendimento da produção energética (CASSERES, 2016).

Análise do estado da arte mostrou que atualmente, existem vários modelos de seguidores solares, os quais podem ser classificados de diversas formas, considerando número de eixos, tipo de estrutura, tipo de controle e mecanismo de rastreamento. Este TCC focou no estudo dos seguidores classificados em relação ao mecanismo de rastreamento, os quais são agrupados em dois tipos: seguidores passivos e ativos.

2.2.1 SEGUIDORES PASSIVOS

Um seguidor solar é denominado de passivo quando não utiliza nenhum controle eletrônico para sua movimentação. O funcionamento desse tipo de seguidor solar é simples e baseia-se no efeito da transferência de massa (peso) de um fluido entre dois cilindros. Um modelo desse tipo de seguidor é apresentado na Figura 5. Basicamente, o vaso posicionado na direção do Sol ao amanhecer do dia, está cheio de fluido, o qual quando aquecido pelos primeiros raios de Sol, entra em evaporação, percorrendo um circuito fechado formado pelos dois vasos e pelo tubo de ligação entre eles, saindo do vaso mais aquecido para o menos aquecido (LIRA, 2014).

Figura 5 - Seguidor passivo.



Fonte: SOARES, 2014.

Ao chegar no extremo oposto, o gás irá condensar, causando aumento de peso no lado oposto do painel. Isso provocará mudança de peso entre as suas extremidades, fazendo com que o sistema altere o ponto de equilíbrio, gerando uma rotação que resulta então, no “acompanhamento” do Sol. Após alinhar-se ao nascer do Sol, o líquido nos recipientes buscará manter o equilíbrio do sistema durante o dia, saindo sempre em forma de vapor do vaso mais aquecido para o menos aquecido, induzindo o rastreamento solar (CORTEZ, 2013).

2.2.2 SEGUIDORES ATIVOS

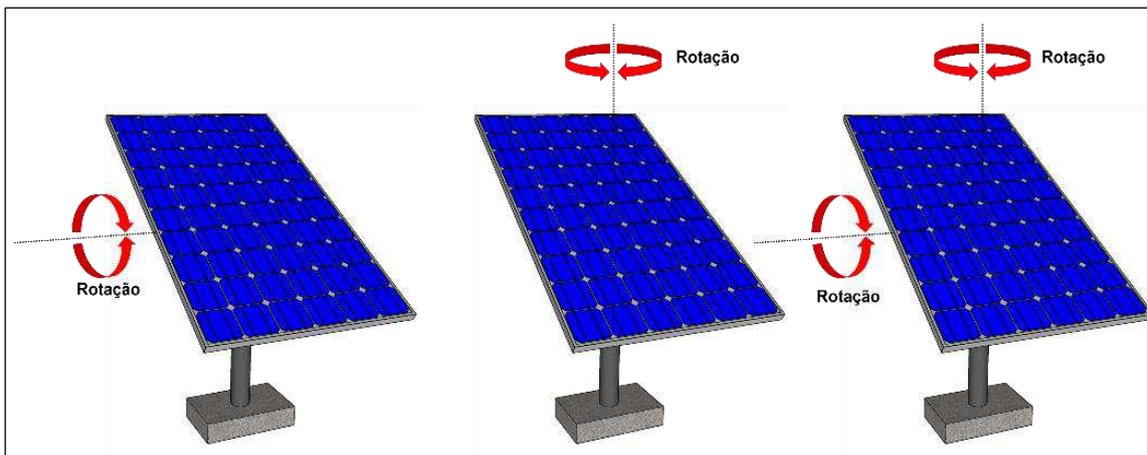
Um seguidor solar é dito ativo quando utiliza um sistema eletrônico para controlar o posicionamento do sistema. Esse tipo de seguidor utiliza um ou mais motores elétricos, polias e engrenagens para impulsionar os arranjos fotovoltaicos. Cada motor preso aos eixos de rotação é controlado por meio de um circuito eletrônico, que recebe dados da posição do Sol por meio de sensores. Os circuitos de controle podem variar desde simples sensores de luz como sensores fotoelétricos, até circuitos com microcontroladores e algorítmico para estimar a posição real do Sol ao longo dos dias, estações e ano (LIRA, 2014).

Os seguidores do tipo ativo subdividem-se em seguidores de eixo vertical, de eixo horizontal e de dois eixos, conforme ilustrado na Figura 6. Os seguidores com um eixo horizontal móvel, também chamado de “seguidor zenital”, baseiam-se no princípio da rotação do plano do

coletor solar sobre um eixo horizontal paralelamente à direção Norte-Sul da Terra. Os seguidores com eixo vertical móvel, também chamados de “seguidor azimutal”, baseiam-se no princípio da rotação do plano do coletor solar sobre o eixo vertical em relação à superfície terrestre (CASSERES, 2016). Os sistemas com dois eixos móveis são constituídos de uma junção de um seguidor eixo vertical móvel com um acréscimo de um segundo eixo de rotação horizontal. Eles possuem um eixo vertical em relação à superfície terrestre e ao mesmo tempo, um eixo horizontal paralelamente ao eixo Leste-Oeste da Terra, sobre o qual está fixado o painel ou coletor solar.

Figura 6 - Seguidores solares:

(a) Eixo simples horizontal; (b) Eixo simples vertical; (c) Eixo duplo.



Fonte: Autoria Própria.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Análise do estado da arte mostrou que o tema tratado neste TCC é atual e importante e dentre os vários trabalhos analisados, selecionaram-se os considerados mais relevantes para o desenvolvimento deste TCC, os quais são discutidos a seguir.

Oliveira (2007) desenvolveu um protótipo de um seguidor solar com um eixo de baixo custo. O projeto foi instalado em uma estrutura simples e segundo o autor, apresentou ganhos na irradiação diária entre 15 e 31%, resultando em um custo de 66% menor quando comparado com um modelo comercial de características semelhantes.

Moraes (2012) desenvolveu um protótipo de um seguidor solar utilizando tecnologias como Arduino e sensores como o LDR. Segundo o autor, o protótipo foi capaz de regular a posição do painel fotovoltaico de acordo com a posição instantânea do Sol.

Gonzaga (2013) e Ribeiro (2012) desenvolveram protótipos de seguidores solares de dois graus de liberdade. Os modelos basearam-se no uso de um algoritmo de programação para microcontroladores, sensores LDR e motores CC simples. Segundo os autores, ambos os protótipos produziram resultados satisfatórios, seguindo o Sol tanto no movimento diário quanto anual. Segundo Ribeiro (2012), seu protótipo apresentou baixo custo e consumo de energia pequeno.

Fernandes (2016) analisou o funcionamento de dois seguidores solares com um e dois eixos. O estudo contemplou a simulação computacional da radiação incidente sobre um painel fotovoltaico, modelagem de um conversor *buck* e projeto de controladores para atuar sobre o sistema simulado. Os resultados obtidos mostraram que o acoplamento do painel fotovoltaico a seguidores solares aumenta a radiação absorvida por ele e conseqüentemente, aumento da potência gerada. Segundo o autor, o sistema proposto resultou em ganhos de potência maiores quando comparado com o sistema a painel fixo: ganhos de 15% para o seguidor de um eixo ganhos de 24% para o seguidor de dois eixos.

Blaszczak (2017) comparou o ganho de eficiência de um painel fotovoltaico com seguidor solar com um painel fotovoltaico fixo tradicional. O autor desenvolveu um protótipo de um seguidor solar automatizado e um sistema de coleta de dados, ambos em plataformas Arduino. O protótipo apresentou ganhos significativos de potência durante o dia, de até 30%, principalmente nas primeiras e últimas horas de insolação

Lazaroiu et al. (2015) analisou dois sistemas com painéis fotovoltaicos, sendo um fixo e um com seguidor solar em um único eixo, sendo a escolha do modelo deste último baseando-se na maior produção e menor gasto de energia com a movimentação do painel solar. O estudo foi realizado por um período de 30 dias. Os resultados obtidos mostraram que o sistema com seguidor solar resultou em aumento de 12 a 20% da produção de energia, quando comparado com o sistema fixo. No entanto, para dias parcialmente claros ou nublados, os autores observaram redução de desempenho.

Perez (2018) desenvolveu um protótipo de seguidor solar de um eixo para placas fotovoltaicas de baixo custo, constituído de par de sensores de luminosidade baseados em resistores dependentes da luz para rastrear a posição do Sol, sistema de controle microcontrolado e motor de passo como atuador. Segundo o autor, o sistema mostrou-se eficaz para alterar a posição de um painel solar ao longo de um dia e seu custo total foi de R\$ 700,00.

Ao final, constatou-se que:

- A maioria dos sistemas é composta de seguidores solares de um único eixo e apresentam porte relativamente pequeno.
- A maioria dos trabalhos analisados contemplou sistemas com capacidade para painéis fotovoltaicos de pequeno porte, com potência inferior a 70 W.
- A maioria dos trabalhos não realiza análise de eficiência do protótipo proposto, apenas de eficácia.
- Alguns poucos trabalhos contemplam os custos associados ao desenvolvimento do protótipo.

Em comparativo com os trabalhos analisados, o protótipo proposto nesse trabalho apresenta características distintas da maioria, uma vez que apresenta dois eixos de seguimento e porte superior aos demais, suportando painéis de 250 a 385W. Além disso, neste trabalho é verificado não só a eficácia, como também a eficiência em comparação com um sistema fixo e os custos financeiros associados ao seu desenvolvimento.

4. METODOLOGIA

O TCC foi executado nos Laboratórios de Sistemas de Potência da UFCG (LSP) e de Referência em Controle e Automação (LARCA), que possuem a infraestrutura completa para o desenvolvimento da pesquisa, ou seja, possui todos os componentes constituintes de um sistema fotovoltaico, que são: controlador de carga, inversor de frequência, banco de baterias, cabeamento e, principalmente, painéis fotovoltaicos.

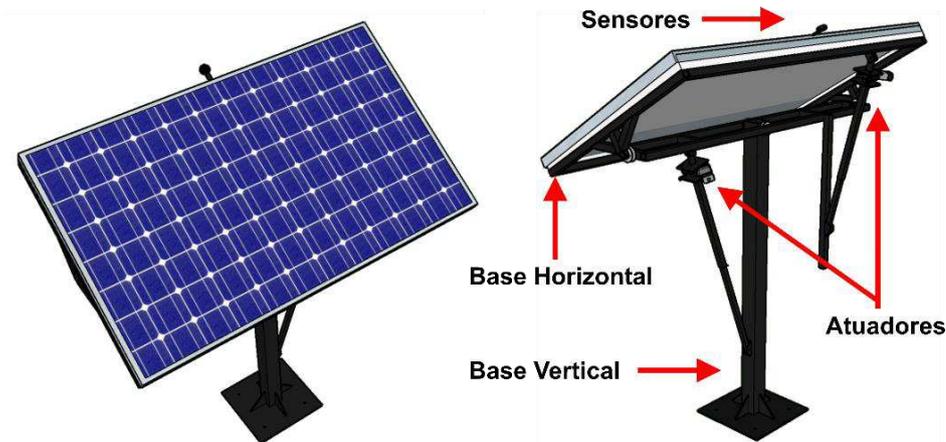
A metodologia adotada consistiu na execução de etapas de estudos teóricos e de experimentos em laboratório. Inicialmente, foram estudados conceitos importantes como: energia, radiação solar, efeito fotovoltaico, movimentos da Terra e ângulos de incidência dos raios solares sobre uma superfície. Também, analisou-se o funcionamento dos principais tipos de seguidores solares e dos respectivos sistemas de controle de posicionamento.

O foco deste TCC foi o seguidor ativo com dois eixos de rotação, considerado o de maior rendimento (FERNANDES, 2016). Em termos do sistema de controle de posicionamento, selecionou-se o uso de sensores fotoelétricos do tipo LDR, haja visto seu custo acessível. Um resumo do projeto do seguidor solar desenvolvido é apresentado a seguir.

4.1 ESTRUTURA MECÂNICA

Inicialmente, projetou-se uma estrutura mecânica simples para suportar o sistema do seguidor solar, a qual está ilustrada na Figura 7. Resumidamente, é uma estrutura metálica contendo componentes de giro como eixos e rolamentos, a qual serve de suporte para fixação da parte eletrônica do sistema de controle, dos sensores, dos painéis fotovoltaicos e dos motores que impulsionam o seguimento. Nesta estrutura, foram priorizadas soluções simples, confiáveis e de baixo custo.

Figura 7 - Estrutura do seguidor solar.



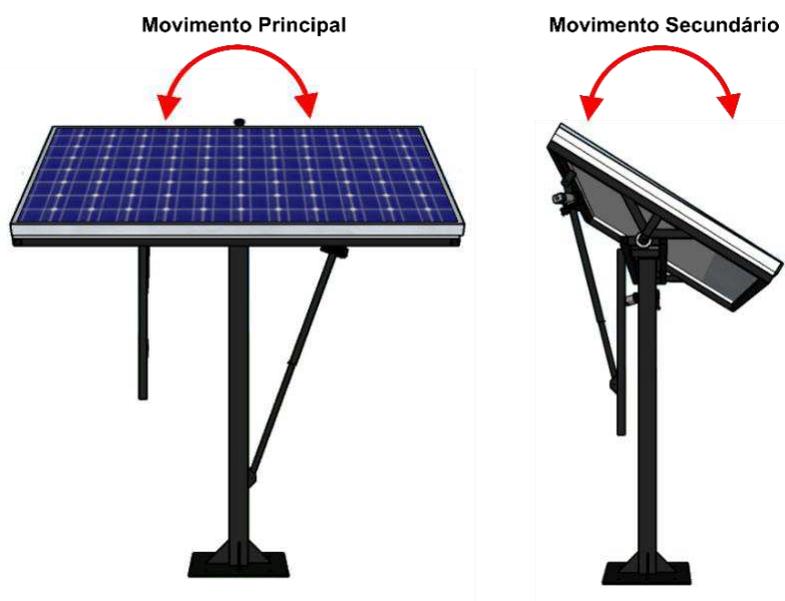
Fonte: Autoria Própria.

Como se vê, a estrutura é constituída de quatro partes principais: i) uma base horizontal que suporta o painel fotovoltaico e os mecanismos de giro do eixo vertical e horizontal; ii) uma base vertical que suporta a base horizontal serve de apoio para atuadores e para a parte eletrônica de comando; iii) suporte para alocação dos sensores de luminosidade; iv) atuadores responsáveis pela movimentação do painel fotovoltaico.

O seguidor solar foi projetado para possibilitar dois graus de liberdade no seguimento solar, cujos eixos de movimentação da estrutura são mostrados na Figura 8. Basicamente, o movimento principal representa o giro do seguidor em relação ao eixo principal, o qual está associado ao deslocamento diário do Sol, de Leste para Oeste. O eixo secundário é responsável pelo movimento secundário do seguidor, que acompanha o deslocamento anual do Sol, de Norte pra Sul.

Os mecanismos dos eixos de giro foram projetados de maneira simples, usando um componente do mecanismo de movimento de portões (Figura 9), cujos componentes são encontrados facilmente em qualquer loja do segmento ou serralheria.

Figura 8 - Eixos de movimentação do seguidor solar.



Fonte: Autorial Própria.

Figura 9 - Componentes dos eixos de movimento.



Fonte: Autorial Própria.

4.2 INVERSOR E SISTEMA DE MONITORAMENTO

A conexão da rede elétrica dos painéis fotovoltaicos foi realizada por um micro inversor, que neste TCC adotou-se o modelo RENO500 (Figura 10(a)), produzido pela empresa RENOVIGI Energia Solar. A escolha desse equipamento foi devido ao fato dele poder ser acoplado às placas solares, não exigindo espaço extra para fixação, como no caso dos inversores

tradicionais. Além disso, por permitir conexão dos painéis em entradas independentes, sendo possível analisar a potência individualmente para cada entrada.

O sistema também possui a *interface* RENO201 (Figura 10(b)), que permite monitorar a geração individual dos painéis, além de informar a quantidade de energia produzida instantaneamente e em um dado período, a potência fornecida, a tensão e a corrente.

Figura 10 – (a) Micro inversor e sistema de monitoramento.

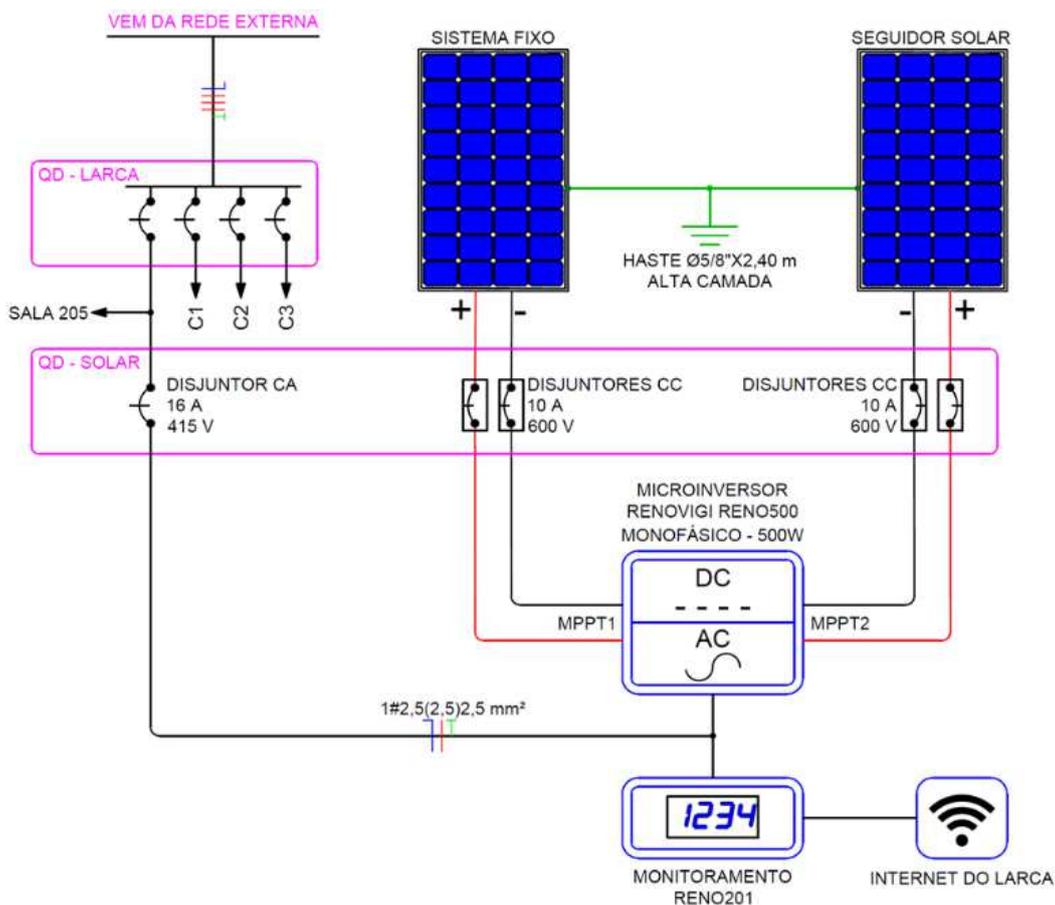


Fonte: RENOVIGI, 2019.

Na Figura 11 está apresentado o diagrama elétrico de todo o sistema fotovoltaico montado. Basicamente, ele é composto por dois painéis fotovoltaicos, um micro inversor, sistema de monitoramento, quadros e dispositivos de proteção e do aterramento. Um dos painéis sem movimentação e instalado com alugação fixa de 5° para o Norte. O outro painel em na estrutura com movimentação automática, ou seja, com seguimento solar nos dois eixos.

A conexão dos painéis é feita individualmente em cada entrada do inversor. Essa conexão é em corrente contínua (CC) e com tensão aproximada de 35V. Além disso, são utilizados disjuntores CC como forma de proteção das entradas do inversor. A saída em corrente alternada (CA) do inversor é então conectada à rede elétrica por meio de um disjuntor termomagnético. No diagrama pode ser visto ainda o sistema de monitoramento RENO201, o qual se conecta a saída do inversor e a um ponto de internet do laboratório LARCA.

Figura 11 - Diagrama elétrico do sistema.

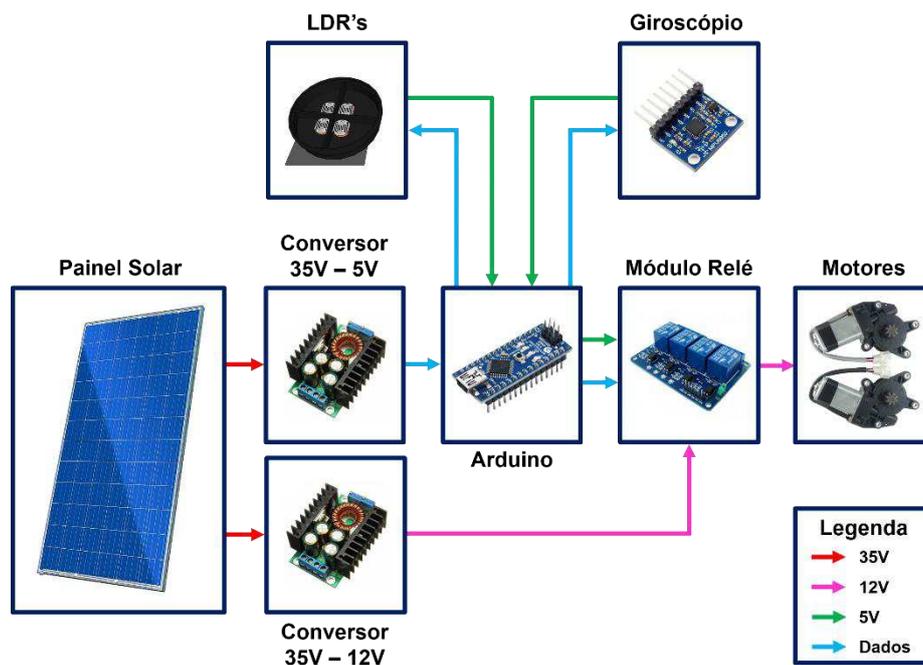


Fonte: Autoria Própria.

4.3 SISTEMA ELETRÔNICO

O esquema do sistema eletrônico do seguidor solar é apresentado na Figura 12, na qual as setas representam o fluxo de energia o fluxo de dados (comandos ou informações), conforme legenda. O sistema eletrônico é suprido pelo próprio painel solar, com tensão de 35 V, a qual é reduzida e controlada até um valor compatível por um conversor. A placa Arduino é responsável pelo processamento dos sinais dos sensores e controle dos atuadores por intermédio módulos relés.

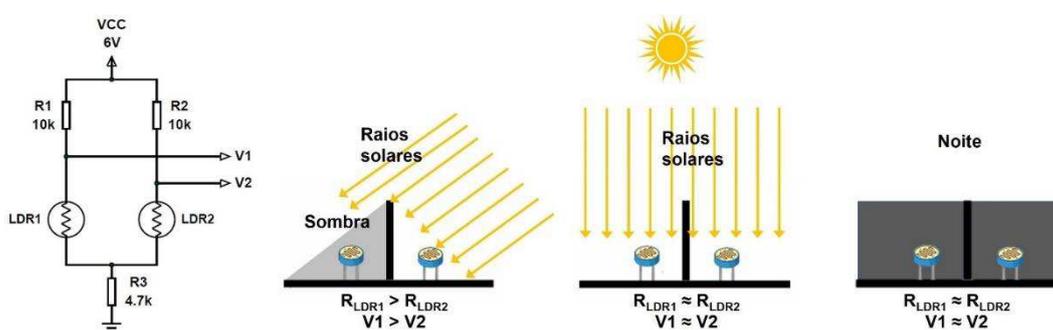
Figura 12 - Esquema do sistema eletrônico do seguidor solar.



Fonte: Autoria Própria.

Os sensores desenvolvidos foram implementados a partir de dois pares de fotoresistências do tipo LDR, um para cada eixo, ligados em um circuito eletrônico formado por um divisor de tensão conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Circuito eletrônico do sensor de alinhamento.



Fonte: Autoria Própria.

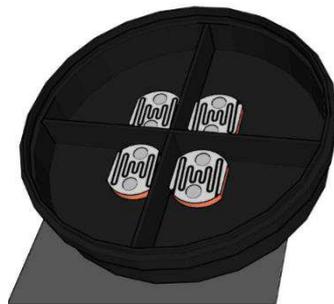
Partindo do princípio de funcionamento desse componente em que, quanto menor a incidência de luz sobre ele, maior sua resistência, é possível obter diferentes sinais de tensões em V_1 e V_2 , dependendo da luminosidade sobre cada LDR, sendo estes sinais diretamente proporcionais à luminosidade incidente. No caso mostrado na Figura 12, ou seja, LDR_1

coberto pela sombra e LDR₂ exposto aos raios solares, tem-se LDR₁ com resistência maior que a do LDR₂, por consequência, a tensão V_1 é maior que a tensão V_2 . O caso inverso aconteceria com o LDR₂ estando sombreado. Quando ambos estão igualmente expostos ou igualmente sombreados, as tensões V_1 e V_2 são iguais.

Esses fotoresistores foram fixados e separados por uma estrutura apropriada, mostrada na Figura 14. que isola a incidência de luz indireta, fazendo com que uma sombra seja gerada individualmente, sobre cada LDR, dependendo da inclinação de incidência dos raios solares. O anteparo em forma de “x” no centro do suporte é responsável por gerar sombreamento sobre os LDR ao longo da variação de posicionamento solar durante o dia. Assim, sempre que o Sol se movimenta de Leste para Oeste ou em sua variação anual de Norte para Sul, uma sombra é gerada sobre um dos sensores, enquanto o segundo estará exposto aos raios solares.

A diferença de luminosidade será interpretada pelo sistema eletrônico, que ativará o respectivo atuador, fazendo o sistema se posicionar de tal modo, que a diferença de luminosidade sobre os sensores seja nula e por consequência, que a incidência dos raios solares sobre o painel seja perpendicular a ele.

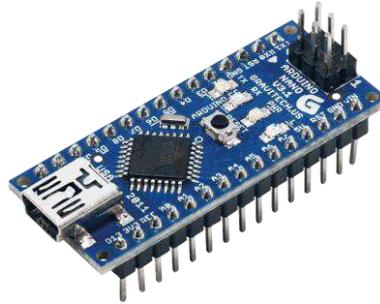
Figura 14 - Estrutura para alocação dos sensores de luminosidade.



Fonte: Autorial Própria.

Como dito anteriormente, a leitura dos sensores, o processamento e os comandos dos atuadores são executados pela placa Arduino (Figura 15), que possui 28 pinos, sendo que 14 pinos podem ser usados como entrada ou saída digitais e seis pinos, como entrada ou saída analógica.

Figura 15 - Placa Arduino Nano V3.



Fonte: Aatoria Própria.

Essa placa foi escolhida por ser *open source*, possuir vastas informações disponíveis, facilidade de uso, podendo ser facilmente conectada à um computador e programada via IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado), utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras, apenas o uso de um cabo USB.

Como a placa Arduino não fornece corrente suficiente para o acionamento de um motor, é necessário o uso de um circuito intermediário, que neste TCC foi composto por quatro relés com seus respectivos circuitos de controle, o qual foi denominado de “módulo relé” (Figura 16). Basicamente, o objetivo desse módulo é converter o sinal de comando proveniente da placa de controle em sinal de potência para acionamento dos atuadores.

Figura 16 - Módulo relé.



Fonte: Aatoria Própria.

Os atuadores são formados cada um, por um pequeno motor de corrente contínua, como ilustrado na Figura 17, usualmente utilizado em mecanismos de movimentação de vidros de

automóveis. Este dispositivo requer uma tensão de 12 V, alto torque e baixa velocidade de rotação. Além disso, apresenta baixo custo e simplicidade de comando.

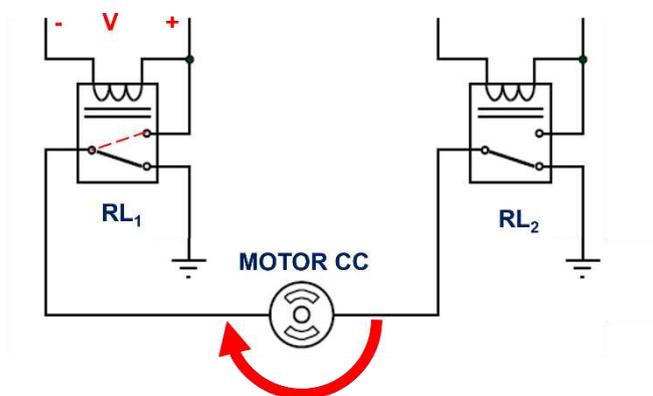
Figura 17 – Motor de corrente contínua do atuador



Fonte: Autorial Própria.

O controle de rotação dos motores foi realizado conforme ilustrado na Figura 16. Resumidamente, um conjunto de dois relés é responsável por acionar o motor, de modo que ele realize o movimento de rotação no sentido horário ou anti-horário. No estado inicial, o motor está em repouso, tendo em vista que ambos os relés estão desligados e, portanto, impondo sobre os terminais do motor uma diferença de potencial nula (ambos ligados à Terra). Quando um dos relés é acionado, por exemplo o RL_1 , seus contatos comutam o que provoca uma diferença de potencial diferente de zero nos terminais do motor, fazendo-o girar no sentido normal de rotação. O sentido inverso de rotação é imposto com RL_2 acionado e RL_1 desligado.

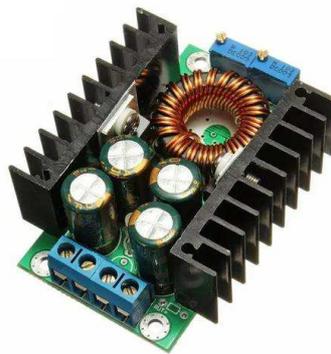
Figura 18 – Acionamento do motor no sentido usual de rotação.



Fonte: Autorial Própria.

O conversor CC/CC (ou DC/DC) é um circuito eletrônico que converte uma tensão ou corrente contínua com determinada amplitude, em outra tensão ou corrente contínua com amplitude diferente. A ideia é semelhante ao uso de um transformador em corrente alternada, que eleva ou reduz determinada tensão de entrada. Como não se pode usar transformadores para níveis CC, pois não haveria variação de fluxo magnético, os conversores tornam-se indispensáveis nesses casos. O módulo conversor CC-CC usado é mostrado na Figura 18.

Figura 19 – Módulo conversor de tensão CC-CC.



Fonte: Autoria Própria.

Esse módulo utiliza um regulador de tensão ajustável, modelo XL4016, o qual é desenvolvido para aplicação em projetos eletrônicos onde são requeridos diferentes níveis de tensão de entrada e saída. O módulo suporta tensões de entrada de 8V a 40V, oferecendo em suas saídas tensões de 0,8 a 28V que podem ser ajustadas conforme necessidade. Assim, torna-se ideal converter os níveis de tensão provenientes dos painéis solares para níveis adequados ao sistema eletrônico de controle do seguidor.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos no desenvolvimento do seguidor solar proposto, além da realização de análises de eficácia e eficiência e dos custos financeiros.

5.1 ESTRUTURA FÍSICA

A estrutura do protótipo de seguidor solar desenvolvido é apresentada na Figura 19 e como se vê, foram construídas duas estruturas idênticas. Cada estrutura possui 1 (um) painel solar de 250 watts e com dimensões aproximadas de 1,00x1,66 metros e pesando 18kg. Vale destacar que, apesar da estrutura comportar apenas um painel solar, ela foi construída com robustez suficiente para comportar de 4 (quatro) a 6 (seis) painéis solares. Para isso, é necessário apenas aumentar a estrutura superior de suporte do painel.

Figura 20 – Estrutura construída do seguidor solar proposto.



Fonte: Autoria Própria.

Após a montagem da estrutura física, seguiu-se para a etapa de testes, na qual foram realizadas simulações e montagens preliminares do circuito de controle e dos sensores de alinhamento, além de testes visando analisar a capacidade de seguimento e de eficiência.

5.2 INVERSOR E SISTEMA DE COLETA DE DADOS

Além da montagem da estrutura física propriamente dita, montou-se o sistema completo que permitiu a conexão com a rede elétrica e o monitoramento de grandezas. O *layout* do micro inversor para conexão do sistema na rede é apresentado na Figura 21. Todas as conexões foram executadas conforme diagrama elétrico já apresentado na seção 4.2.

Figura 21 – Conexão do sistema na rede elétrica.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura, é possível ver o micro inversor (a esquerda), o sistema de monitoramento (ao centro) e o quadro (a direita) contendo os dispositivos de proteção. O sistema foi então conectado à rede elétrica do LARCA. Antes, porém, foram realizados teste de ilhamento que, na pratica, verifica se o micro inversor é capaz de detectar a queda de tensão da rede elétrica e se auto desligar, evitando que o mesmo forneça tensão elétrica para a rede e ocasione choque elétrico em equipes de manutenção.

5.3 ANÁLISE DA EFICÁCIA DO SEGUIDOR SOLAR PROPOSTO

Como já citado na seção 5.1, após a confecção de todas as partes constituintes do seguidor solar, foram realizados testes visando análise de desempenho, cujos principais resultados são apresentados e discutidos a seguir.

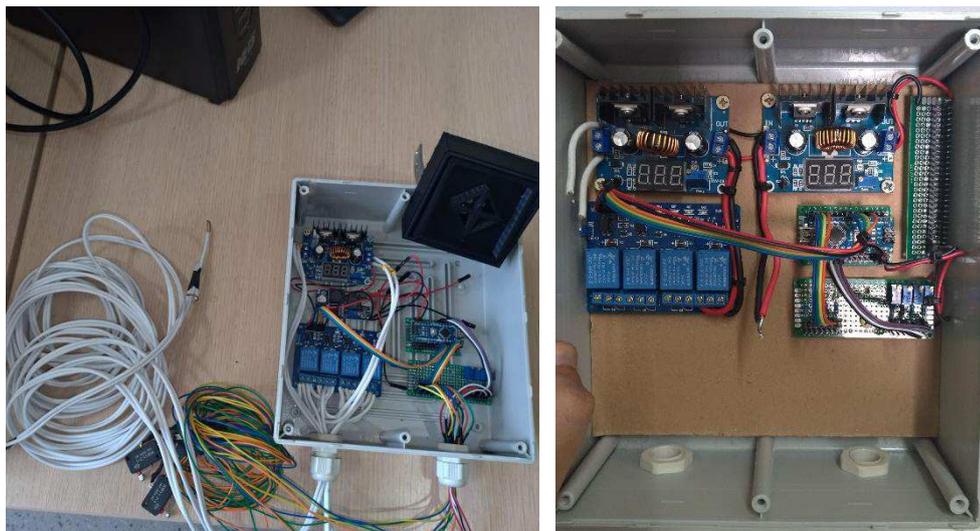
5.3.1 TESTE DO CIRCUITO DE CONTROLE EM BANCADA

Esse teste visou validar o funcionamento do circuito eletrônico projetado. Conforme mostrado na Figura 22, o circuito eletrônico do seguidor foi organizado em uma caixa plástica própria para projetos eletrônicos. Após a primeira montagem, posteriormente, adicionou-se na caixa, um fundo para permitir melhor fixação e organização dos conversores, placa de controle, módulo relé e conectores. As principais partes foram ensaiadas em bancada do LSP, cujo resumo é apresentado a seguir onde se observou:

- A alimentação do circuito em laboratório foi realizada por uma fonte de bancada de corrente contínua, ajustada para uma tensão de 35V e corrente de 5A, simulando o painel solar.
- Os módulos conversores reduziram a tensão de entrada de 35V para 12V, permitindo alimentação adequada dos componentes.
- Toda iluminação do ambiente estava ligada. Isso permitiu manter o mesmo nível de luz sobre todos os LDR e em seguida, testá-los individualmente.
- Nos testes dos sensores, constatou-se diferença de tensão entre as duas saídas (V_1 e V_2) do circuito quando há diferença na quantidade de luz incidente sobre cada um dos LDR.
- Os relés mantêm a saída desligada quando ambos os sensores estão igualmente sombreados ou expostos a mesma quantidade de luz e aciona sempre que há sombreamento um dos LDR. Isso indica que os motores de giro estariam parados ou ativos nos momentos desejados.

Com os resultados obtidos, inferiu-se que o circuito atende as necessidades do projeto.

Figura 22 – Circuito eletrônico de controle do seguidor solar.



Fonte: Autoria Própria.

5.3.2 TESTE DO PROTÓTIPO EM AMBIENTE EXTERNO

Neste teste, o sistema foi montado por completo em um ambiente externo, frente ao LSP, distante de objetos que pudessem atrapalhar o funcionamento dos sensores, criando sombras ou distorcendo sua percepção de localização do Sol (Figura 23).

Figura 23 – Instalação do Protótipo.



Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, o protótipo foi colocado com o painel direcionado para a direção Oeste, simulando a posição adquirida ao anoitecer, de modo que fosse possível constatar a sua capacidade de retorno à Leste, ao amanhecer.

Verificou-se que o sistema não conseguiu retornar para posição do nascer do Sol, uma vez que como o painel solar estava inclinado em direção contrária a dos raios solares, não havia geração de potência suficiente para funcionamento dos motores. Para contornar esse problema, adicionou-se uma bateria (Figura 23), de modo que ao longo do dia a bateria acumulasse carga suficiente para permitir o sistema posicionasse o painel solar em direção ao Sol no amanhecer do dia.

Após o término da etapa de testes do sistema completo, seguiu-se para a etapa de monitoramento do sistema, a qual durou cerca de seis meses. A meta foi avaliar o acompanhamento do Sol diante da sua variação aparente ao longo do dia, de Leste para Oeste. Um resumo dessa etapa é apresentado a seguir.

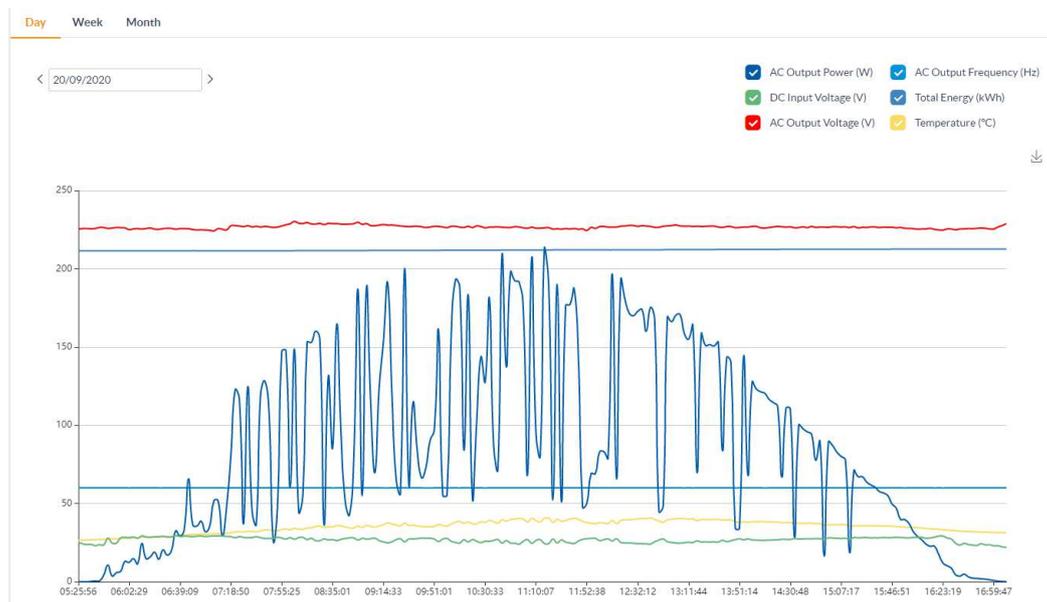
- A sombra gerada nos sensores pelo anteparo secundário com os primeiros raios solares foi suficiente para fazer o arranjo girar e se posicionar em relação ao Sol ao amanhecer.
- O sistema foi capaz de responder às mudanças de posicionamento solar durante todo o dia, interrompendo seu funcionamento ao cair da noite.
- No período compreendido entre 11 horas e 12 horas, não se constatou nenhum movimento da estrutura, tendo em vista que o Sol se encontrava exatamente sobre a mesma, não gerando sombra sobre qualquer sensor.
- A estrutura mecânica mostrou-se robusta, mas em alguns casos, quando em situações de vento, apresentou certa dificuldade para manter o movimento, chegando a balançar. Logo, foi necessário aumentar a fixação da base no solo.
- Em ambiente de teste em bancada, o sistema eletrônico mostrou-se adequado aos requisitos do rastreador. Durante a etapa de teste ao Sol, constatou-se que a sensibilidade dos sensores foi menor que no teste em bancada, devido a diferença de luminosidade dos dois ambientes.

De modo geral, o protótipo apresentou um desempenho satisfatório, sendo que no período da tarde (Sol forte e poucas nuvens) a precisão no posicionamento foi maior que no período da manhã (Céu parcialmente nublado).

5.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SEGUIDOR SOLAR PROPOSTO

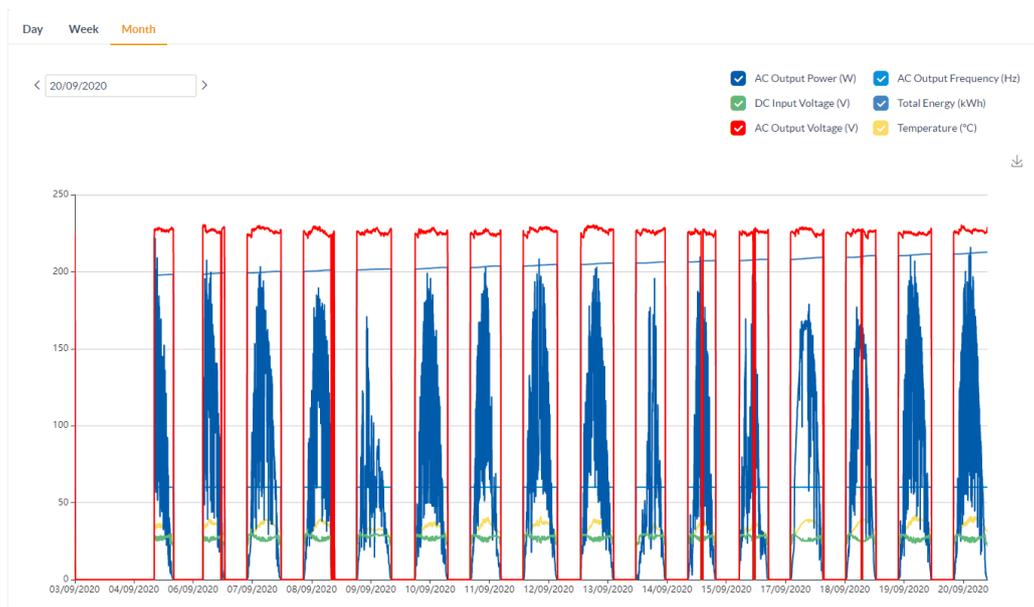
Para verificar a eficiência do seguidor solar, inicialmente é necessário ter acesso aos valores das variáveis elétricas dos dois sistemas (fixo e com seguidor solar). O acompanhamento do processo de medição dessas variáveis ao longo de um dia é mostrado na Figura 24 e as medições ao longo de um mês, na Figura 25. Basicamente, o sistema monitora e coleta os dados das placas e armazena-os via internet, em um banco de dados, no qual podem ser visualizados e “baixados”. O sistema coleta dados de potência, tensão de entrada, tensão de saída, energia total e frequência de saída e envia para o repositório online a cada 3 (três) minutos.

Figura 24 – Exemplo de dados coletados durante um dia.



Fonte: Fonte: RENOVIGI, 2020.

Figura 25 – Dados coletados em um mês.



Fonte: RENOVIGI, 2020.

Todos os dados coletados em um dado período de tempo pode ser exportados no formato de planilha do Excel. Uma parte dos dados gerados pelo sistema é mostrada na Figura 26. Os dados podem ser exportados nos modos diário, mensal ou anual, entretanto, nos modos mensal e anual são exportados apenas os valores da energia gerada.

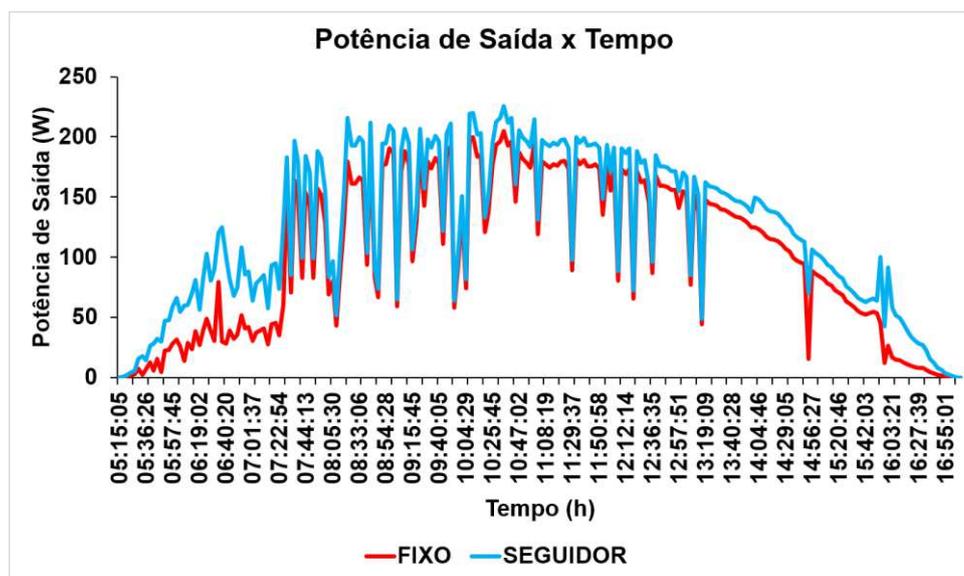
Figura 26 – Relatório detalhado dos dados coletados para o dia.

Daily Report							
System Info							
System Name :	LSP_RENO_01	Today's Energy :	1.10 kWh				
Capacity :	0.50 kWp	Total Energy :	375.00 kWh				
Update Time :	20/09/2020						
Details							
MIS/N	Estática						
MIS/N	DC Volt	Grid Volt	Power	Frequency	Temperature	Time	Total Energy
Estática	25.29	225.42	0	60.04	26.59	20/09/2020 05:25:56	211.50
Estática	24.31	225.73	0	60.01	26.59	20/09/2020 05:29:00	211.50
Estática	23.75	225.75	0	60.01	26.7	20/09/2020 05:32:03	211.50
Estática	23.94	225.58	0.27	60.01	26.8	20/09/2020 05:35:04	211.50
Estática	23.03	225.8	0.53	60.01	26.9	20/09/2020 05:38:08	211.50
Estática	23.68	226.45	0.52	60.04	27	20/09/2020 05:41:11	211.50
Estática	23.53	226.39	4.23	60.07	27.09	20/09/2020 05:44:14	211.50
Estática	27.87	225.84	10.7	60.02	27.4	20/09/2020 05:47:16	211.50
Estática	24.74	226.08	3.67	60.04	27.3	20/09/2020 05:50:20	211.50
Estática	24.71	226.39	5.83	60.08	27.4	20/09/2020 05:53:22	211.50
Estática	28.07	226.31	6.66	60.03	27.59	20/09/2020 05:56:25	211.50

Fonte: RENOVIGI, 2020.

Por fim, após a coleta e exportação dos dados para o *software* Excel, os dados podem ser “tratados” e analisados. A Figura 27 ilustra exatamente o perfil gráfico desses dados traçados com auxílio do Excel. Na figura, é possível ver a potência de saída, em função do tempo, a partir de cada painel solar. A curva em vermelho representa a potência entregue pelo sistema fixo enquanto a curva em azul representa a do sistema móvel com seguimento solar.

Figura 27 – Sistemas fixo x Sistema com seguidor solar.



Fonte: RENOVIGI, 2020.

Visualmente, pela figura, é possível verificar que a potência entregue pelo sistema com seguidor solar é sempre maior ou igual a potência do sistema fixo. O melhor desempenho do seguidor pode ser observado nos horários de começo do dia (5h até as 8h) e fim do dia (15h até as 17h). Nesses horários, foi possível constatar geração de até 100% maior que o sistema fixo. No intervalo que compreende das 8h até as 15h o sistema ainda apresenta desempenho de geração maior que o fixo, no entanto, em termos percentuais, correspondem a apenas de 12 a 18%.

A eficiência do seguidor solar foi então analisada para todo o dia. Para isso, foi considerado a energia total gerada para cada sistema. Para o sistema fixo, a energia total variou de 237,0kWh para 238,2 kWh, assim, com produção diária de 1,2 kWh. Enquanto isso, a geração do sistema com seguimento solar variou de 244,3 kWh para 245,7 kWh, logo a produção

diária de 1,4 kWh. O que representa um ganho diário de aproximadamente 16% em relação ao sistema fixo.

Na prática, a análise refere-se a apenas um dia. O ideal para garantir o desempenho do sistema seria avaliar ao longo de um grande período de tempo, com no mínimo de um ano. Nessa avaliação seria possível analisar também a interferência das estações do ano no processo de seguimento para os dois eixos bem como a energia total gerada por cada sistema, sendo possível verificar se os gastos financeiros associados a montagem do sistema seriam compensados em um período de tempo baixo. Ou seja, seria possível analisar o tempo de retorno esperado para o investimento.

Essa avaliação não foi possível por alguns motivos:

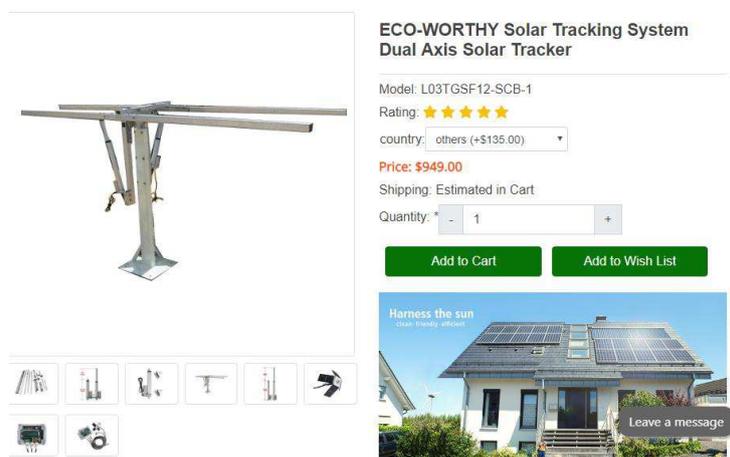
- Como se trata da construção de um protótipo, dentro do período de estudo e construção, várias modificações foram realizadas na estrutura. Assim, não se teria um resultado de geração condizente com o protótipo final do seguidor. Logo, a energia total gerada seria, na prática, o acumulado das várias versões do seguidor solar e não apenas do protótipo final, o que provavelmente reduziria o valor total da energia gerada.
- O período de pandemia também dificultou a análise da versão final do seguidor solar. Em algumas situações o sistema se auto desligou devido a atuação dos dispositivos de proteção e só foi religado alguns dias após. Enquanto isso o sistema fixo continuou ligado. Logo, não seria possível comparar energia total gerada nesse período.

5.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Pesquisa bibliográfica e de mercado realizada revelou que a venda de seguidor solar para aplicação em sistemas de pequeno porte é incipiente. Na grande maioria dos casos, a aplicação de seguidor solar é direcionada para sistemas de grande porte. No mercado local não se constatou nenhum sistema equiparável, em preço e estrutura, ao que está sendo projetado. No mercado internacional, um seguidor solar Azimutal de porte semelhante ao desenvolvido neste TCC (Figura 27) tem custo aproximado de US\$ 1.000,00 (mil dólares), incluídos os custos de frete. Convertido em moeda brasileira (Real), seu custo é de aproximadamente R\$ 5.000,00 (cinco mil reais). Levando em conta o adicional de 60% desse

valor aplicado pela Receita Federal sobre a importação, o produto chega ao consumidor final no Brasil por aproximadamente R\$ 8.000,00 (oito mil reais).

Figura 28 – Seguidor solar comercial.



Fonte: ECO-WORTHY, 2020.

Os custos prováveis do seguidor desenvolvido neste TCC foram feitos com base no preço dos componentes utilizados no sistema eletrônico de controle e no material e serviços usados na construção da estrutura mecânica. Os preços basearam-se em pesquisa no mercado local e em *sites* na internet.

Um resumo dos materiais utilizados na construção da estrutura mecânica do seguidor com suas respectivas quantidades e custos atualmente praticados são apresentados na Tabela 2, onde se incluiu também, o valor de materiais adicionais, como tintas e lixas, utilizadas para acabamento final na estrutura. Na Tabela 3 estão listados todos os componentes usados no sistema eletrônico de controle do seguidor.

Tabela 1 - Custo da mecânica do seguidor.

QUANT.	DESCRIÇÃO	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Metalon Quadrado Chapa 18 - 20x20mm x 6m	22,96	25,96
1	Metalon Quadrado Chapa 18 - 25x25mm x 6m	28,94	28,94
4	Metalon Quadrado Chapa 18 - 30x30mm x 6m	35,98	143,92
1	Metalon Quadrado Chapa 14 - 80x80mm x 6m	143,62	143,62
8	Roldana 2,5 polegadas	11,99	95,92
8	Chumbador arabolt	8,00	64,00

8	Parafuso M6x50mm com porca autotravante	2,00	16,00
4	Barra roscada - 12mm x 1m	9,00	36,00
1	14 pedaços de Barra chata 1/8 e 3/16	124,00	124,00
4	Spray preto	13,00	52,00
1	Mão de Obra - Construção da Estrutura	150,00	300,00
1	Areia	3,50	14,00
1	Brita	3,50	14,00
1	Cimento	26,00	26,00
		TOTAL	784,36

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2 - Custo da eletrônica de controle.

QUANT.	DESCRIÇÃO	PREÇO UNT.	TOTAL
2	Modulo relé 4 canais	24,90	49,80
2	Conversor CC-CC	25,00	50,00
2	Arduino Uno	45,90	91,80
8	Sensor LDR	1,00	8,00
16	Resistor 4,7k Ω	0,25	4,00
8	Resistor 10k Ω	0,25	2,00
8	Chave fim de curso	5,00	40,00
2	Chave gangorra	3,00	6,00
10	Cabinho flexível - varias cores (metro)	0,50	5,00
4	Motor de Vidro Elétrico - Mabuchi 12v 8d	59,90	239,60
		TOTAL	496,20

Fonte: Autoria Própria.

O custo estimado para construção do seguidor solar proposto é de aproximadamente R\$ 640,00 (seiscentos e quarenta reais). Essa estimativa foi obtida com base nas duas tabelas anteriormente citadas e considerando a compra dos itens novos. Quando comparado ao modelo comercial citado, o seguidor solar proposto neste TCC equivale a 10% do seu valor. O custo final, após a construção física, pode ser ainda menor, caso haja possibilidade de reaproveitamento de partes como motores, normalmente encontrados em impressoras, e dos tubos em aço para construção da estrutura metálica. Esses itens são responsáveis por quase 50% de todo o custo do seguidor solar.

6. CONCLUSÕES

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentou o projeto e construção de um protótipo de seguidor solar de baixo custo, constituído de tecnologia simples e com componentes de fácil disponibilidade no mercado nacional. Estas vantagens garantem facilidade de construção e aplicação em projetos autônomos e de pequeno porte que utilizem energia fotovoltaica.

O protótipo, apesar de ter sido construído com uma estrutura mecânica simples e com um sistema eletrônico de baixa complexidade, possibilitou implementação fácil e com capacidade de posicionamento satisfatória.

O acompanhamento do Sol ocorreu conforme o esperado, com o retorno do sistema à posição inicial (ao amanhecer). Ao longo do dia, o sistema apresentou seguimento solar relativamente preciso, desde que ocorra presença significativa de radiação direta. Com a presença de radiação difusa, a precisão foi menor. Quando há igualdade de sombreamento ou luminosidade sobre os sensores, o sistema permanece imóvel.

A reutilização de componentes possibilitou redução significativa no custo do protótipo, cujo valor final foi de cerca de 10% do valor cobrado no mercado internacional. A maior parte dos gastos do sistema foram devido à estrutura mecânica, a qual foi responsável por mais de 50% do custo total do rastreador. O sistema eletrônico custou menos de 25% do valor cobrado por modelos semelhantes.

No que diz respeito a eficiência do sistema em relação ao sistema com painel fixo, conforme o período de análise, observou-se aumento médio diário de eficiência na captação de aproximadamente 16%. No entanto, uma análise para um longo período de tempo deve ser realizada com a versão final do seguidor solar, a fim de verificar o desempenho total do sistema e a influência das estações do ano no segundo eixo de seguimento.

Apesar da produção do protótipo se mostrar satisfatória algumas melhorias e análises podem ser feitas. Com sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- Desenvolver uma placa de controle completa, reunindo todas as funcionalidades dos módulos que compõem a eletrônica;
- Analisar a geração total do sistema após, pelo menos, um ano de monitoramento;
- Realizar uma análise comparativa com o sistema fixo, considerando apenas um eixo de seguimento e analisar a influência do segundo eixo do seguidor;
- Fazer uma avaliação energética do consumo energético do sistema eletrônico e a sua influência na energia total gerada pelo protótipo;
- Realizar uma análise de *Payback* do tempo de retorno do investimento com o seguidor solar.

REFERÊNCIAS

BLASZCZAK, V. Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2017.

CASSERES, M. A. R. Avaliação operacional de sistemas fotovoltaicos com seguimento solar: sistemas com e sem concentração. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2016.

CORTEZ, R. J. M. Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

FERNANDES, N. A. C.. Análise de rastreadores fotovoltaicos aplicados a sistemas de carregamento de baterias baseado no conversor buck. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

FREITAS, A. M. C. & GARBIS, F. U. C. Otimização da captação de um painel solar a partir do desenvolvimento de um seguidor solar. Trabalho Acadêmico de Iniciação Científica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, 2012.

GONZAGA, D. A. Desenvolvimento e análise de desempenho de sistema seguidor solar de dois graus de liberdade. Monografia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

GREENPEACE, Brasil. [r]evolução energética: A caminho de um Brasil com 100% de energias renováveis. 2016. Disponível em:

<http://m.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2015/Dezembro/2016/Revolu%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica%202016.%20Greenpeace%20Brasil.pdf>. Acesso em: 27 de abril de 2018.

JORNAL DA PARAÍBA. Agricultores da PB terão R\$ 10 mi para investir em energia solar. Disponível em:

<http://www.jornaldaparaiba.com.br/politica/agricultores-da-pb-terao-r-10-mi-para-investir-em-energia-solar.html>. Acesso em: 27 de Abril de 2018.

LAZAROIU, G. C., LONGO, M., ROSCIA, M., & PAGANO, M. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*, v. 92, p. 143-148, 2015.

LIRA, J. R. V. Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

MAKHIJA, S.; KHATWANI, A.; KHAN, M. F.; GOEL, V.; M. ROJA, M. M. Design & Implementation of an Automated Dual-Axis Solar Tracker with Data-Logging. *International Conference on Inventive Systems and Control*, 2017.

MORAES, E. P. Seguidor solar de um único eixo inclinado. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Brasília, Brasília 2012.

OLIVEIRA, C. A. A. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PEREZ, F. J. Construção de um protótipo de seguidor solar de um eixo para placas fotovoltaicas. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

RIBEIRO, S. C.; PRADO, P. P. L. & GONÇALVES, J. B. Projeto e desenvolvimento de um rastreador solar para painéis fotovoltaicos. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 2012.

SOARES, R. A. S. & W. Costa. Desenvolvimento de um protótipo de seguidor solar de baixo custo para painéis de fotovoltaicos de pequeno porte. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Caicó, 2014.

TORRES, A. & ALONSO, G. Seguidor Solar. Trabalho de Investigação da Metodologia Científica, Universidad Tecnológica *del Per*, Lima, Peru, 2013.
