

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR SOLAR COM CONTROLE EM MALHA FECHADA
PARA REDUÇÃO DE PERDAS POR SOMBREAMENTO

por

Bruno Capoani

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Capoani, Bruno
DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR SOLAR COM CONTROLE EM
MALHA FECHADA PARA REDUÇÃO DE PERDAS POR SOMBREAMENTO
/ Bruno Capoani. -- 2019.
27 f.
Orientador: Eduardo André Perondi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Seguidor solar. 2. Sistemas fotovoltaicos. 3.
Sombreamento. 4. Dois eixos. 5. Controle em malha
fechada. I. Perondi, Eduardo André, orient. II.
Titulo.

Bruno Capoani

DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR SOLAR COM CONTROLE EM MALHA FECHADA
PARA REDUÇÃO DE PERDAS POR SOMBREAMENTO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Eduardo André Perondi

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, que simboliza não apenas conclusão deste curso, mas também a concretização de todo esforço investido, aos meus pais, José Carlos Capoani e Sílvia Regina Capoani, cujo sacrifício, para me dar as condições necessárias para poder dedicar-me aos estudos, fora transcendental. Agradeço especialmente a minha noiva Daniele por me dar a motivação para seguir em frente quando mais precisei. Por fim, a todos os familiares, amigos e professores que me deram suporte ao longo dos anos, muito obrigado!

*“Ideias
e somente ideias
podem iluminar a escuridão”*

Ludwig von Mises

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	2
2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO	3
2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	4
2.4 SEGUIDORES SOLARES	5
2.5 SOMBREMENTO	5
3. METODOLOGIA	6
3.1 EQUACIONAMENTO DA POSIÇÃO DO SOL RELATIVAMENTE A UM PONTO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	6
3.2 SENSOR LDR	9
3.3 SISTEMA DE CONTROLE DESENVOLVIDO	9
3.4 PROTOTIPAGEM.....	10
3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1 TESTES PRELIMINARES.....	12
4.2 EXPERIMENTO PRINCIPAL	13
4.3 ERROS E INCERTEZAS	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
NOMENCLATURA.....	18
ANEXO A – MAPA DE CAMINHO DO SOL PARA PORTO ALEGRE	19
APÊNDICE A – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS	19
APÊNDICE B – RESULTADOS DO EXPERIMENTO PRINCIPAL	20

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR SOLAR COM CONTROLE EM MALHA
FECHADA PARA REDUÇÃO DE PERDAS POR SOMBREAMENTO

Capoani, Bruno

bruno.capoani@ufrgs.br

Resumo. A energia solar é uma fonte limpa e praticamente inesgotável e ainda assim pouco utilizada devido ao alto custo e a baixa eficiência de conversão. Seguidores solares estão sendo desenvolvidos para melhorar a eficiência de geração de energia de painéis fotovoltaicos colocando-os em posições de maior aproveitamento energético em relação aos raios solares, sendo os modelos por equacionamento da posição do Sol os mais precisos em relação ao seguimento do Sol. Entretanto, estes seguidores são suscetíveis ao fenômeno de sombreamento, que é prejudicial tanto por diminuir a geração de energia, como também pela possibilidade de danos aos painéis devido aos pontos quentes. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um protótipo de plataforma de seguimento de trajetória solar por equacionamento com dois eixos, mas que opere com controle em malha fechada para verificar a ocorrência de sombreamento e corrigir a posição das células fotovoltaicas, reduzindo assim as perdas. Os experimentos mostram que o protótipo desenvolvido obteve um aumento de 27,11% na corrente gerada e uma redução de 20,45% nas perdas de tensão para sombreamentos de 50% da área das células, quando comparado a uma célula fixa equivalente.

Palavras-chave: seguidor solar, sistemas fotovoltaicos, sombreamento, dois eixos, controle em malha fechada.

Abstract. The solar energy is a clean and practicably inexhaustible resource and yet little used because of the expensive costs and low conversion efficiency. Sun trackers have been developed to improve the efficiency of energy generation of photovoltaic generators by putting them in positions with greater energy harnessing in relation with the sunbeams, being the models by equation of the sun position the more accurate ones in relation with the sun tracking. However, these trackers are susceptible to the shading phenomena, which is detrimental both by reducing the energy generation, as by the possibility of damage to the panels due the hot-spots. In this work was proposed the development of a prototype of a platform for sun tracking by equation with two axes, but operating in closed-loop control to verify the occurrence of shading and to correct the position of the photovoltaic cells, reducing the losses. The experiments show that the developed prototype obtained an increase of 27.11% in the generated current and a 20.45% reduction on losses by a 50% shaded area of the photovoltaic cells, when compared to an equivalent fixed cell.

Keywords: sun tracker, photovoltaic systems, shading, two axes, closed-loop control.

1. INTRODUÇÃO

Sol é uma fonte de energia inesgotável na escala terrestre de tempo (Pinho e Galdino, 2014), e o seu aproveitamento, tanto na forma de calor como de luz, é uma das alternativas mais promissoras para superar os desafios energéticos atuais. Segundo estes autores, a terra recebe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, e uma das possíveis formas de captação da energia vinda do Sol é pela conversão direta da luz em eletricidade, aproveitando o efeito fotovoltaico, através de dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas.

No Brasil, segundo Abreu (2003), a energia solar incidente sobre o seu território totaliza aproximadamente $1,7 \times 10^{16}$ kWh/ano, o que correspondia a mais de 55 mil vezes o consumo do ano de 2000. Mesmo com um potencial tão grande, o uso de energia solar no país é baixo. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (2018), apesar de o Brasil ter 45,3% de sua matriz energética formada por fontes renováveis, apenas 0,2% das fontes renováveis correspondem à energia solar.

Apesar da energia solar ser uma das fontes primárias mais limpas, ser silenciosa, requisitar baixa manutenção e causar baixo impacto ambiental, a baixa eficiência de conversão e o alto custo de sistemas fotovoltaicos, historicamente, fizeram com que esta não fosse amplamente utilizada (Imhoff, 2007). Este fato, porém, está mudando, seja com o número cada vez maior de pesquisas e pelo desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, seja pelos incentivos de buscar fontes alternativas de energia.

Considerando a importância da busca por fontes limpas e renováveis de energia como a energia fotovoltaica para a preservação do planeta, o grande potencial do Brasil para a utilização de sistemas fotovoltaicos e o fato de que o alto custo destes vem caindo devido ao aumento de pesquisas nessa área, fica clara a relevância de estudos que busquem a melhoria da eficiência de geração energética por dispositivos fotovoltaicos.

Neste contexto, foram desenvolvidos vários modelos de seguidores e coletores solares, com diversas configurações e sistemas de controle. Alguns exemplos são apresentados abaixo:

Kalogirou (1996) desenvolveu um seguidor solar de um eixo do tipo polar, onde a posição do Sol era detectada por um conjunto de três resistores dependentes de luz (LDR), sendo um para verificar se a estrutura está focada em direção ao Sol, ficando sombreado quando não o está, o segundo detecta a presença de nuvens e o último identifica se é dia ou noite.

Kumar e Suryanarayana (2014) desenvolveram um seguidor solar de dois eixos, que utilizava sensores LDR para localizar a posição do Sol, a partir da projeção da sombra de um cilindro sobre tais sensores quando o painel fotovoltaico não estivesse perpendicular aos raios solares, obtendo uma diferença significativa na potência gerada, de 7038 W pelo seguidor contra 6417 W do painel fixo. Neste trabalho percebeu-se que, embora a diferença de tensão gerada tenha sido pequena, a geração de corrente e de potência fora significativa.

Abdallah e Nijmeh (2004) desenvolveram um seguidor solar do tipo azimutal de dois eixos, onde um controlador lógico programável (CLP) ajustava os ângulos de inclinação e azimute, obtendo um aumento de eficiência de 41,34%. Este modelo teve como proposta ser um seguidor que pudesse operar bem independentemente das condições climáticas, em especial a presença de nuvens. O motor vertical ficava ocioso por 15-35 minutos, e o motor azimutal ficava ocioso por 5-10 minutos, ambos operando por poucos segundos entre estes intervalos.

Tannhauser (2018) desenvolveu um seguidor solar de dois eixos segundo a equação da rota solar. Este protótipo obteve um aumento médio de 11,43% na geração de energia quando comparado a um painel fixo de inclinação compatível com o local. Obteve também grande precisão de posicionamento quando comparado às curvas de trajetória solar.

Segundo Neto (2010), os modelos que utilizam sensores estão sempre onde há maior incidência dos raios solares, mas não têm alta precisão, em especial em dias nublados, quando estes podem apresentar um comportamento inesperado. Já, os seguidores solares que operam em malha aberta,

utilizando-se do equacionamento pré-programado, têm alta precisão e conseguem operar mesmo em dias nublados, porém, não têm um sistema de verificação se de fato há incidência solar naquela posição, ficando sujeitos ao efeito de sombreamento.

Como mostra Lopes (2013), este sombreamento pode causar significativa perda de geração de energia, uma vez que a área sombreada, além de não gerar energia, acaba agindo como uma resistência, dissipando energia de entrada, podendo causar o aquecimento das células, criando assim os chamados pontos quentes.

Apresentadas as vantagens e desvantagens dos modelos de plataformas e seus sistemas de controle, surgiu a questão: é possível obter o posicionamento preciso de um seguidor solar por trajetória pré-programada juntamente à averiguação e correção de posição para os casos de sombreamento do gerador fotovoltaico de tal seguidor? Assim, o objetivo deste trabalho foi buscar desenvolver um protótipo de baixo custo de plataforma de seguimento de trajetória solar para células fotovoltaicas, cujo sistema de controle em malha fechada permitisse não apenas obter uma **maior eficiência** em comparação aos sistemas fixos com a **precisão de posicionamento** necessária via equação da rota solar, mas também que fosse **capaz de contornar o problema de eventuais sombreamentos, reduzindo suas perdas** ao fazer as correções necessárias no posicionamento das células.

Para alcançar este objetivo principal, objetivos parciais a serem cumpridos foram definidos: esquematizar um procedimento de operação para o sistema de controle; construir um protótipo de plataforma que permitisse a comparação entre o seguidor solar e um painel fixo de inclinação compatível; desenvolver e implementar um sistema de controle que fizesse o posicionamento e as correções desejadas; calibrar e validar tal modelo; fazer os testes de geração de energia em campo; e analisar os dados obtidos e fazer as comparações para constatar se o objetivo final fora atingido.

Este trabalho é uma pesquisa descritiva, no qual é explicado o procedimento de montagem do protótipo, a elaboração do sistema de controle em malha fechada, os testes realizados e seus resultados. A técnica utilizada é a experimental, pois os resultados da redução das perdas por sombreamento de tal protótipo são obtidos por testes em campo comparando os dados do mesmo juntamente a uma célula fotovoltaica fixa, utilizada como controle. A comparação se dá por uma abordagem quantitativa, uma vez que os dados de geração de tensão pelos painéis, assim como suas perdas, são valores numéricos objetivos, assim como sua comparação em forma percentual.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

São descritos nesta seção alguns pontos teóricos considerados necessários para o entendimento do trabalho.

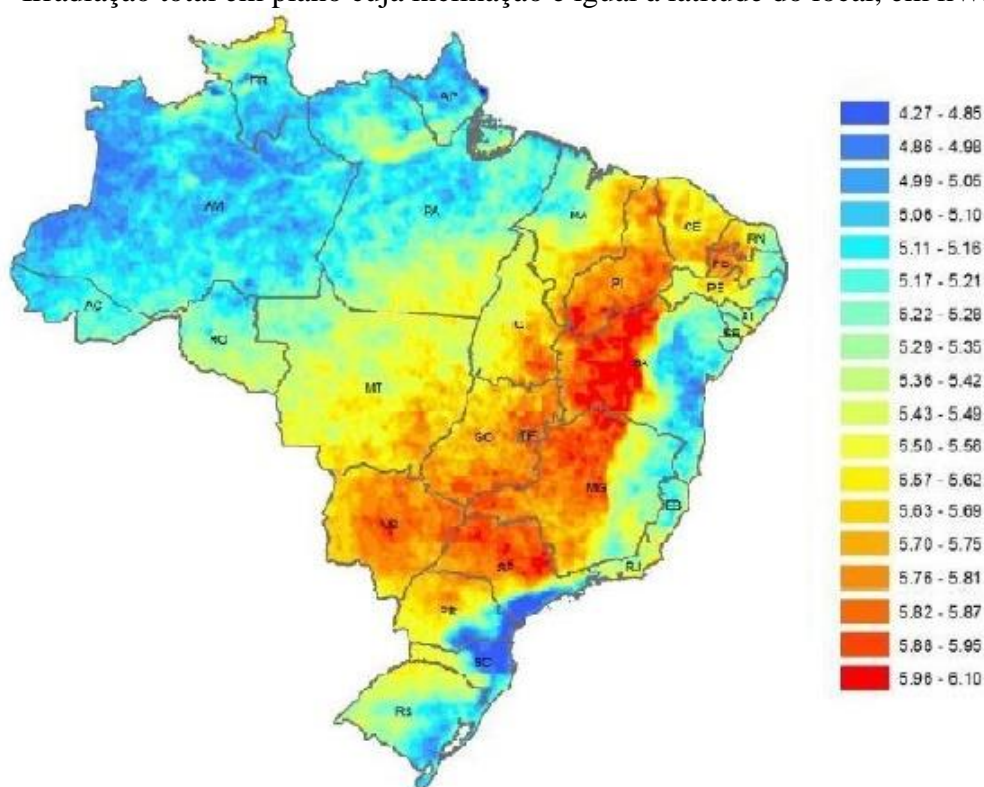
2.1 RADIAÇÃO SOLAR

Com relação à radiação, utilizam-se os conceitos definidos de acordo com Pinho e Galdino (2014):

- Radiação solar: é a energia procedente do Sol sob a forma de onda eletromagnética;
- Irradiância solar: é a potência radiante (radiação solar) incidente por unidade de superfície sobre um dado plano;
- Constante solar: é a irradiância solar incidente num plano perpendicular à direção de propagação no topo da atmosfera terrestre e vale aproximadamente 1367 W/m^2 .
- Irradiação solar: é a energia incidente por unidade de superfície de um dado plano, obtida pela integração da irradiância durante um intervalo de tempo, normalmente uma hora ou um dia;
- Irradiação direta: é a irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência;

- Irradiação difusa: é a irradiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Em dias sem nuvens, cerca de 20% da radiação que atinge a superfície é difusa, enquanto que passa a ser de 100% em dias completamente nublados, pois não há radiação direta;
- Irradiação refletida: É a parte da radiação solar que chega à superfície da Terra e é refletida pelo ambiente do entorno, e surge sempre que uma superfície estiver inclinada com relação à horizontal. O coeficiente de reflexão de cada superfície se chama albedo;
- Irradiação global: É a quantidade resultante da soma das irradiações solares direta, difusa e refletida. ABINEE (2012 apud Diedrich, 2013) apresenta um mapa de irradiação total sobre o Brasil, o qual é reproduzido na Figura 1, e afirma que a média diária no país fica entre 4,8 e 6 kWh/m² por dia, contra, por exemplo, os 3,2 kWh/m² da Alemanha, país com a maior capacidade instalada em energia fotovoltaica. O Rio Grande do Sul tem valores entre 5 e 5,5 kWh/m²/dia.

Figura 1 – Irradiação total em plano cuja inclinação é igual à latitude do local, em kWh/m²/dia



(Fonte: ABINEE (2012 apud Diedrich, 2013))

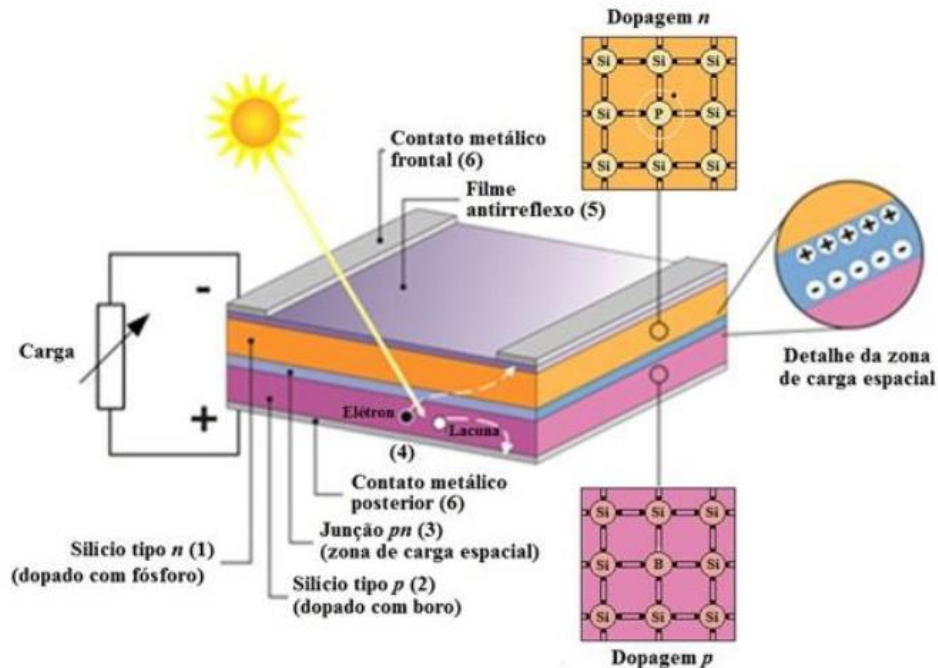
2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

De acordo com Pinho e Galdino (2014) o efeito fotovoltaico é conversão direta da energia da luz, no espectro visível, em energia elétrica. Lasnier e Ang (1990) apontam que foi Becquerel quem descobriu, em 1839, que uma diferença de potencial se desenvolve quando se direciona luz a um eletrodo em uma solução eletrolítica. Depois dele, em 1877, ocorreu a observação por Adams e Day deste efeito fotovoltaico em um sólido. Porém, foi apenas a partir de 1954 que houve, na literatura científica, publicações de resultados do uso do efeito fotovoltaico em processos de conversão de energia, com Calvin Fuller produzindo a primeira célula solar de silício.

Lopes (2013) descreve que quando um elétron da órbita externa dos átomos de silício recebe energia, a ligação covalente que este tem com os átomos vizinhos é quebrada e o elétron consegue sair da banda de valência indo para a banda de condução, onde é livre para se movimentar. Se este elétron tiver energia suficiente e for direcionado a um circuito, ele irá gerar uma corrente. Essa condição é obtida a partir da dopagem do silício das células fotovoltaicas, por exemplo com fósforo

(dopagem tipo n) e boro (dopagem tipo p), que faz com que o material destas células tenha um campo elétrico permanente, de modo a conseguir acelerar os elétrons livres para fora do material, direcionando-os a um circuito externo. Tal processo é ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica

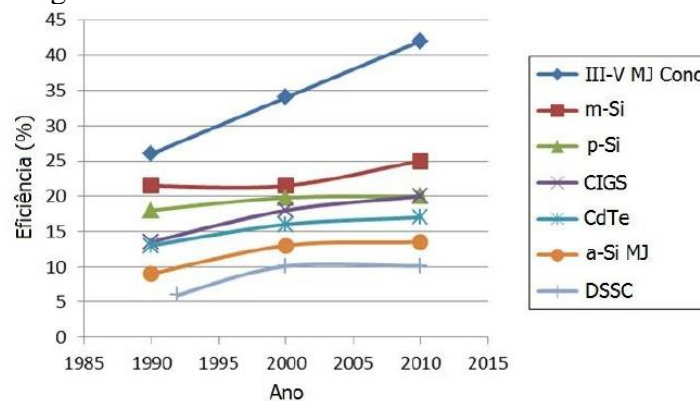


(Fonte: Pinho e Galdino, 2014)

2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Segundo Pinho e Galdino (2014), uma célula fotovoltaica é um "dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta da energia solar em energia elétrica". Estes mesmos autores afirmam que as células fotovoltaicas da primeira geração, ou seja, produzidas em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), representam 85% do mercado, devido à sua consolidação e confiabilidade, além de possuírem uma das melhores eficiências energéticas dos elementos comercialmente disponíveis. Entretanto, estes mesmos autores também citam que a maior eficiência de fato se dá nas células com concentradores multijunção (III-V MJ Conc) que utilizam semicondutores dos grupos III e V da tabela periódica em sua fabricação. A evolução da eficiência de conversão de diversos tipos de células fotovoltaicas é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Desenvolvimento das células fotovoltaicas



(Fonte: Pinho e Galdino 2014)

2.4 SEGUIDORES SOLARES

Ainda segundo Pinho e Galdino (2014), um rastreador solar (ou seguidor solar) é um “suporte mecânico ativo que permite o apontamento da superfície do gerador fotovoltaico na direção do Sol, com intuito de maximizar a produção de energia”. Além disso, “Idealmente tal dispositivo deve manter o ângulo de incidência da luz solar sempre próximo da normal à superfície do gerador”. Mousazadeh (2009 apud Lira, 2014) conta que o primeiro rastreador solar fora construído por Finster, em 1962, e a partir daí, vários modelos de seguidores solares têm sido desenvolvidos.

Oliveira (2008) apresenta os principais tipos de seguidores solares. São eles:

- De movimento sobre o eixo horizontal, que pode ser Leste-Oeste ou Norte-Sul, sendo o segundo de maior ganho energético;
- Seguidor polar, que possui um eixo móvel Norte-Sul com inclinação ajustável, tem montagem simples e é bastante eficiente, em especial em latitudes próximas do Equador (Lira 2014)
- Seguidor com eixo vertical móvel, no sentido Leste-Oeste seguindo o ângulo azimutal, e apresenta bom desempenho em latitudes distantes do Equador (Lira 2014)
- Seguidor com dois eixos móveis, um vertical para movimento azimutal e um horizontal para ajuste da inclinação. Os dois eixos proporcionam grande rendimento de conversão da componente direta da radiação solar.

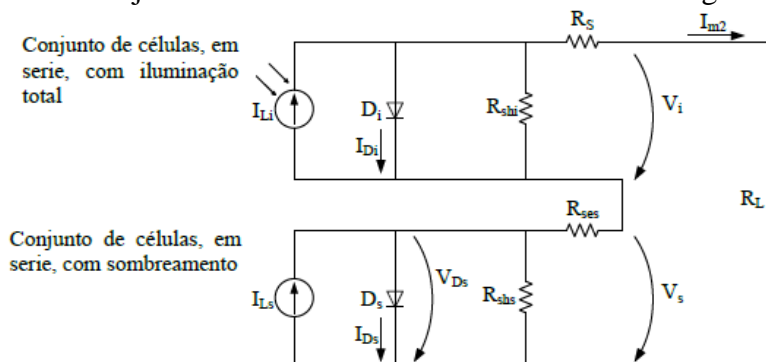
A respeito destas disposições de seguidores, Abdallah (2003) fez um estudo comparando valores de corrente, tensão e potência geradas em quatro tipos de seguidores: dois eixos, um eixo Leste-Oeste, um eixo vertical e um eixo Norte-Sul, todos comparados a um painel fixo, obtendo um aumento de potência elétrica de 43,87%, 37,53%, 34,43% e 15,69%, respectivamente.

Quanto ao método de posicionamento, Oliveira (2008) explica que esse pode ser feito por meio de cálculos precisos de posição azimutal e de elevação solar, sendo utilizado em sistemas que requerem alta precisão; ou através de sensores óticos, como fototransistor, fotodiodo, resistores dependentes de luz (LDR) e células fotovoltaicas, sendo este método o utilizado na maioria das aplicações de seguidores solares.

2.5 SOMBREMENTO

Segundo Lopes (2013), o sombreamento faz com que a célula fotovoltaica em sombreamento atue como uma carga, dissipando a corrente de entrada, aquecendo e criando os pontos quentes. Para minimizar esse efeito, são introduzidos os diodos de *bypass* que deixam passar a corrente sem causar dano à célula. Já, para um grupo de células em sombreamento, tem-se uma perda de energia produzida “pela redução da energia gerada pela célula e pelo aumento das perdas nas células sombreadas. Este problema torna-se mais grave quando o sombreamento das células causa a polarização inversa”. Uma representação do efeito é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Conjunto de células com e sem sombreamento ligadas em série



(Fonte: Lopes, 2013)

Um grupo de células que tem iluminação total (indicado por I_{LI}) está ligado em série com um grupo de células em sombreamento (indicado por I_{LS}). Sempre que a corrente I_{M2} for maior que a corrente I_{LS} , a corrente no diodo D_S passa a ser igual a I_{LS} menos I_{M2} , colocando o diodo D_S em polarização inversa. “Nesta situação, o diodo D_S irá comportar-se como uma resistência de elevado valor, o que reduz significativamente a corrente na carga I_{M2} ” (Lopes, 2013).

Em um sistema fotovoltaico, os módulos fotovoltaicos podem ser ligados em série, para aumentar a tensão gerada, ou em paralelo, para aumentar a corrente gerada. Alonso-Garcia et al. (2005) fizeram uma simulação computacional dos efeitos do sombreamento em arranjos fotovoltaicos com diferentes configuração de *string* (módulos ligados em série) para analisar as alterações na curva I-V (corrente x tensão), chegando à conclusão que o aumento no número de células sombreadas em diferentes *strings* causa grande alteração, enquanto que o aumento no número de células sombreadas na mesma *string* causa pequena alteração.

A literatura apresenta diversos trabalhos acerca do sombreamento, como por exemplo: para a determinação de suas características e efeitos (Alonso-García et al. 2005; Alonso-García et al. 2006; Dolara et al. 2013; Lopes 2013), para um novo método de seguidor de potência máxima (Kajihara e Harakawa 2005; Ishaque e Salam 2013) ou ainda novas configurações de ligações para diminuir os efeitos (Wang e Hsu 2010; Bidram et al. 2012; Shams El-Dein et al. 2013). Entretanto, a maioria é realizada por modelagens e simulações computacionais, além de focarem apenas no posicionamento de painéis fixos.

3. METODOLOGIA

3.1 EQUACIONAMENTO DA POSIÇÃO DO SOL RELATIVAMENTE A UM PONTO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Segundo Pinho e Galdino (2014), a Terra move-se ao redor do Sol em uma trajetória elíptica de excentricidade aproximada de 0,017, no movimento de translação, que tem duração de 365,25 dias. A Terra também gira em torno de seu eixo, que tem inclinação de $23,45^\circ$ com relação ao plano normal da elipse, no movimento de rotação, dando origem aos trópicos: de capricórnio no hemisfério sul (latitude = $-23,45^\circ$) e de câncer no hemisfério norte (latitude = $+23,45^\circ$). As estações do ano têm origem no movimento de translação em conjunto a esta inclinação.

O ângulo de incidência dos raios solares e o plano do Equador é chamado de Declinação Solar (δ). Este ângulo varia entre $\delta = +23,45^\circ$ em torno do dia 21 de junho, que corresponde ao solstício de inverno no hemisfério sul e o solstício de verão no hemisfério norte, e $\delta = -23,45^\circ$ em torno do dia 21 de dezembro, que corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul e o solstício de inverno no hemisfério norte, passando por $\delta = 0^\circ$ nos dias 21 de março e 21 de setembro, correspondentes aos equinócios de outono e de primavera no hemisfério sul, e aos equinócios de primavera e de outono no hemisfério norte, respectivamente.

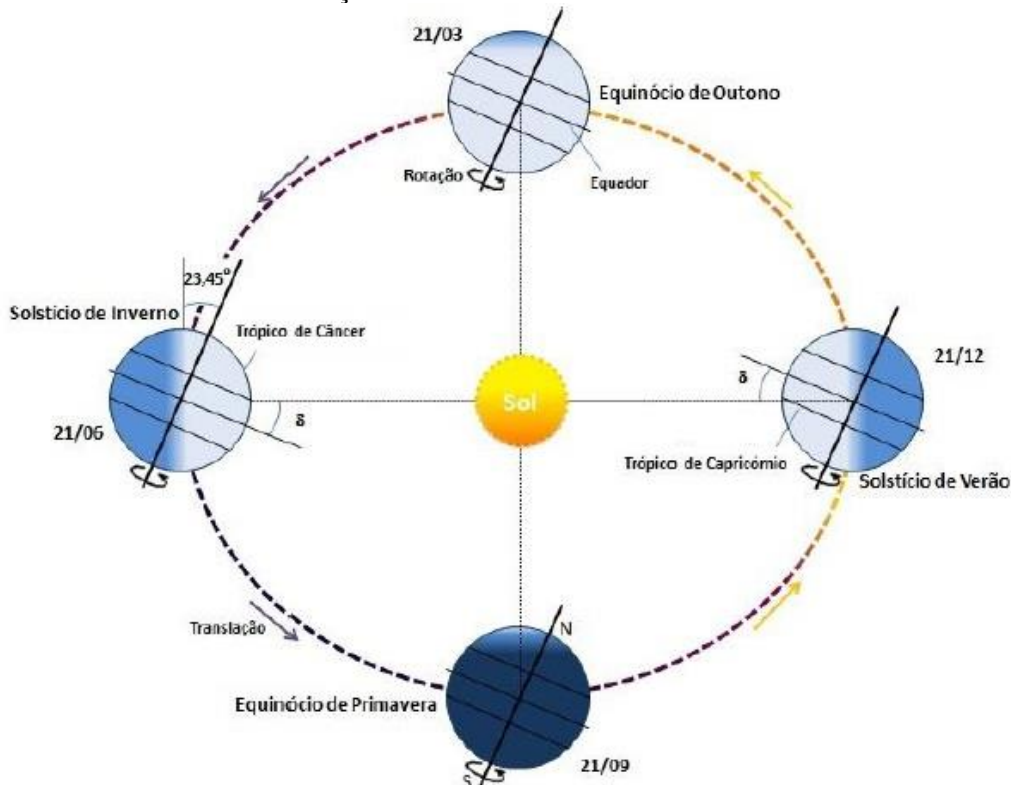
A declinação solar pode ser calculada com a Equação 1:

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45^\circ) \cdot \cos\left(\frac{360}{365,25} \cdot (n + 10)\right) \quad (1)$$

onde n representa o número de dias desde 1 de janeiro.

Estes ângulos e movimentos são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Órbita da Terra em torno do Sol, com eixo N-S inclinado em $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério sul



(Fonte: Pinho e Galdino 2014)

Além da declinação, outros ângulos são necessários para a definição da posição do Sol. São eles:

- O ângulo zenital (θ_z), formado entre os raios do Sol e vertical local (zênite), calculado conforme a Equação 2:

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\phi) + \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \quad (2)$$

onde δ é a declinação, ω é o ângulo horário, ϕ é a latitude.

- A altura ou elevação solar (α), formada entre os raios do Sol e a projeção destes sobre o plano horizontal, calculada pela Equação 3:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (3)$$

onde θ_z é o ângulo zenital.

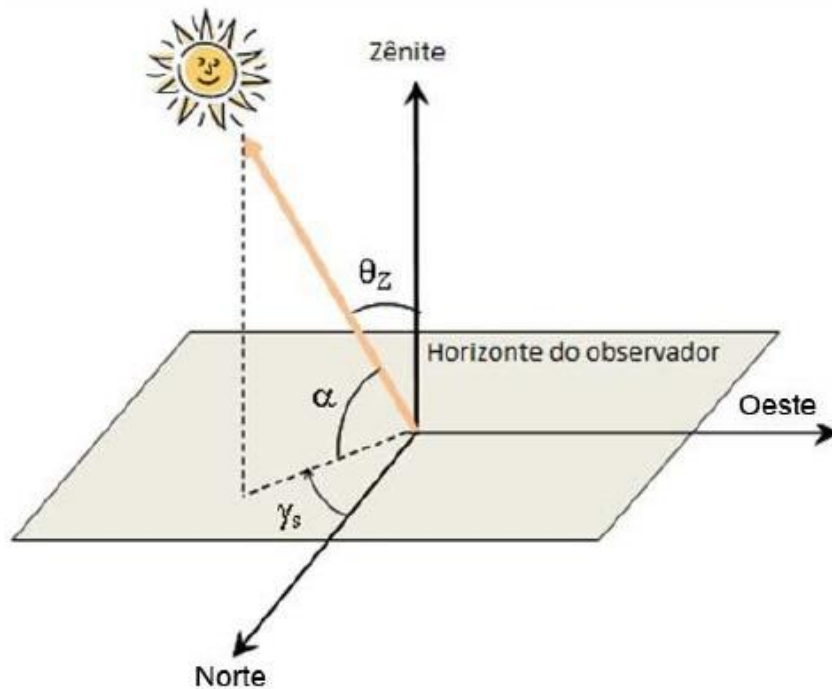
- O ângulo azimutal (γ_s), formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e o norte verdadeiro, sendo positivo a Leste e negativo a Oeste ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$). Segundo Oliveira (2008), o ângulo azimutal pode ser calculado pela Equação 4:

$$\cos(\gamma_s) = \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\phi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\phi)} \quad (4)$$

onde α é a altura solar, ϕ é a latitude e δ é a declinação.

Os três ângulos analisados acima (α , ϕ e δ) são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Ilustração dos ângulos θ_z , α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal



(Fonte: Pinho e Galdino 2014)

A seguir, o equacionamento é apresentado de acordo com Tannhauser (2018). O ângulo Horário do Sol (ω) corresponde ao deslocamento angular, de Leste a Oeste, do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, e é calculado com a Equação 5:

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15^\circ \quad (5)$$

onde TSV é o tempo solar verdadeiro.

Para converter a hora solar para o tempo local, utiliza-se a Equação 6.

$$LCT = TSV - \frac{Et}{60} + LC \quad (6)$$

onde LCT é a hora local, TSV é o tempo solar, Et é a equação do tempo e LC a longitude corrigida.

$$LC = \frac{\text{Longitude local} - \text{longitude do fuso horário}}{15} \quad (7)$$

A equação do tempo é calculada como segue:

$$Et = 0,258 \cdot \cos(\Gamma) - 7,416 \cdot \text{sen}(\Gamma) - 3,648 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) - 9,228 \cdot \text{sen}(2 \cdot \Gamma) \quad (8)$$

onde Γ é um ângulo definido como segue:

$$\Gamma = \frac{360 \cdot (n-1)}{365,242} \quad (9)$$

onde n é o número de dias desde 1º de janeiro.

3.2 SENSOR LDR

O sensor ótico LDR consiste de um resistor, cuja resistividade depende da incidência de luz, resultando em uma variação efetiva da resistência. Assim, apresenta maior resistência quando está mais escuro, e menor resistência quando está mais claro. Essa variação na sua resistência pode ser utilizada para medir a luminosidade de um determinado local, e, se utilizado em pares (contanto que um não “enxergue” o outro, colocando uma divisória entre eles), pode-se identificar em qual direção deve-se deslocar para obter uma maior/menor luminosidade. Um meio simples para obtenção dessa informação é utilizando um divisor de tensão, que segundo Sadiku e Alexander (2013), consiste em um circuito no qual dois resistores são ligados em série. Assim, a tensão que passa por eles é dividida na proporção de suas resistências. Neste caso, liga-se um resistor conhecido e um LDR em série e se faz a medida de tensão entre eles.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE DESENVOLVIDO

Segundo Ogata (2005) um sistema de controle de malha fechada é um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio para gerar o sinal de controle, enquanto que um sistema de controle de malha aberta é aquele “em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema”.

O posicionamento do seguidor será feito inicialmente em malha aberta com a equação da posição do Sol, que é o método mais preciso e, se possível, se manterá operando com a equação até o final do dia, o que deve ocorrer se nenhum sombreamento atuar sobre o seguidor. Tal posição é calculada por um microcontrolador, utilizando dos dados de data e hora de um relógio de tempo real (RTC). Esse tipo de trajetória pré-programada é utilizado pelos seguidores solares que operam em malha aberta, e por não serem retroalimentados com respeito a incidência solar na posição, ficam suscetíveis a sombreamentos. Com este problema em mente, desenvolveu-se o sistema em malha fechada em paralelo descrito a seguir, utilizando como variável controlada, essa incidência solar.

A parte da malha fechada se dará através do uso de 4 LDRs, em cima: à direita TR e à esquerda TL; embaixo: à direita DR, à esquerda DL. Eles estarão montados em um divisor de tensão cada, onde será feita a leitura da tensão em cada um deles. Estas tensões serão lidas em pares: de cima ($T=TR+TL$), de baixo ($D=DR+DL$), da direita ($R=TR+DR$) e da esquerda ($L=TL+DL$). A seguir são feitas as diferenças, T com D, e R com L, e são comparadas com uma tolerância. Se, e somente se, a diferença entre eles for maior que essa tolerância a ser estipulada, o que ocorrerá sempre que um sombreamento significativo ocorrer, o sistema sai do modo de posicionamento por equação e entra no modo do sensor, onde será acionado o servomotor adequado (vertical ou horizontal). A seguir, se fará uma nova leitura, uma nova comparação, e um novo acionamento dos servomotores, até que esta diferença fique dentro da tolerância. Uma vez no modo do sensor, a posição não mais será dada pela equação de referência em malha aberta, até que um parâmetro de tempo faça o sistema voltar ao seguimento dessa trajetória (em malha aberta), como descrito a seguir.

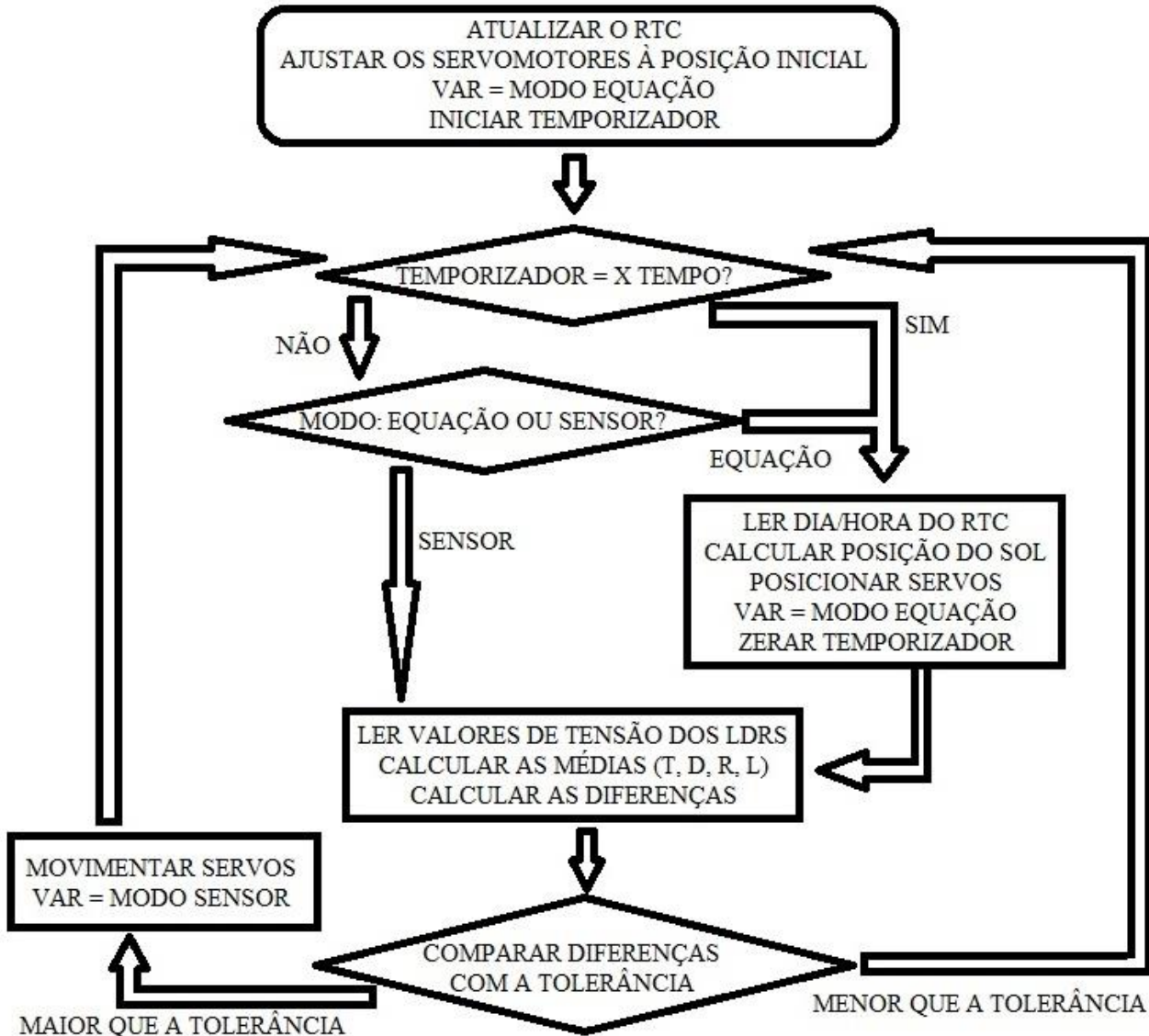
Em paralelo a esta operação em malha fechada, o tempo será monitorado por meio de um temporizador, de modo que, a cada intervalo de tempo (a ser estipulado) fora do modo de equação, o sistema volte para o modo de posicionamento em malha aberta, visando recuperar o posicionamento perpendicular aos raios solares. Essa estratégia foi elaborada para o caso de sombreamentos momentâneos, onde o seguidor se reposicionaria para o melhor ganho na presença desta sombra, e após esse dado tempo ele retornaria, ao invés de ficar muito tempo numa posição desfavorável.

Este esquema baseado em temporização serve para permitir avaliar periodicamente se o sombreamento cessou. Caso positivo, o seguidor tem o melhor ganho na posição atual e se mantém a partir daí em malha aberta até que haja algum distúrbio. Caso a sombra ainda se faça presente, haverá uma diferença nos LDRs, que irão novamente reposicionar o seguidor, onde ele ficará até

dar o intervalo de tempo estipulado, ou até que haja uma mudança na luminosidade tal que os LDRs ativem os servos para uma nova posição.

O fluxograma do sistema de controle está representado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do sistema de controle desenvolvido



3.4 PROTOTIPAGEM

Os pontos avaliados e as respectivas escolhas para a construção do protótipo foram os seguintes:

- Contornar sombreamentos: Uso de sensores LDR;
- Melhor eficiência: Seguidor com 2 eixos;
- Precisão: Equação da posição do Sol;
- Baixo custo: Componentes eletrônicos simples e microcontrolador Arduino UNO.

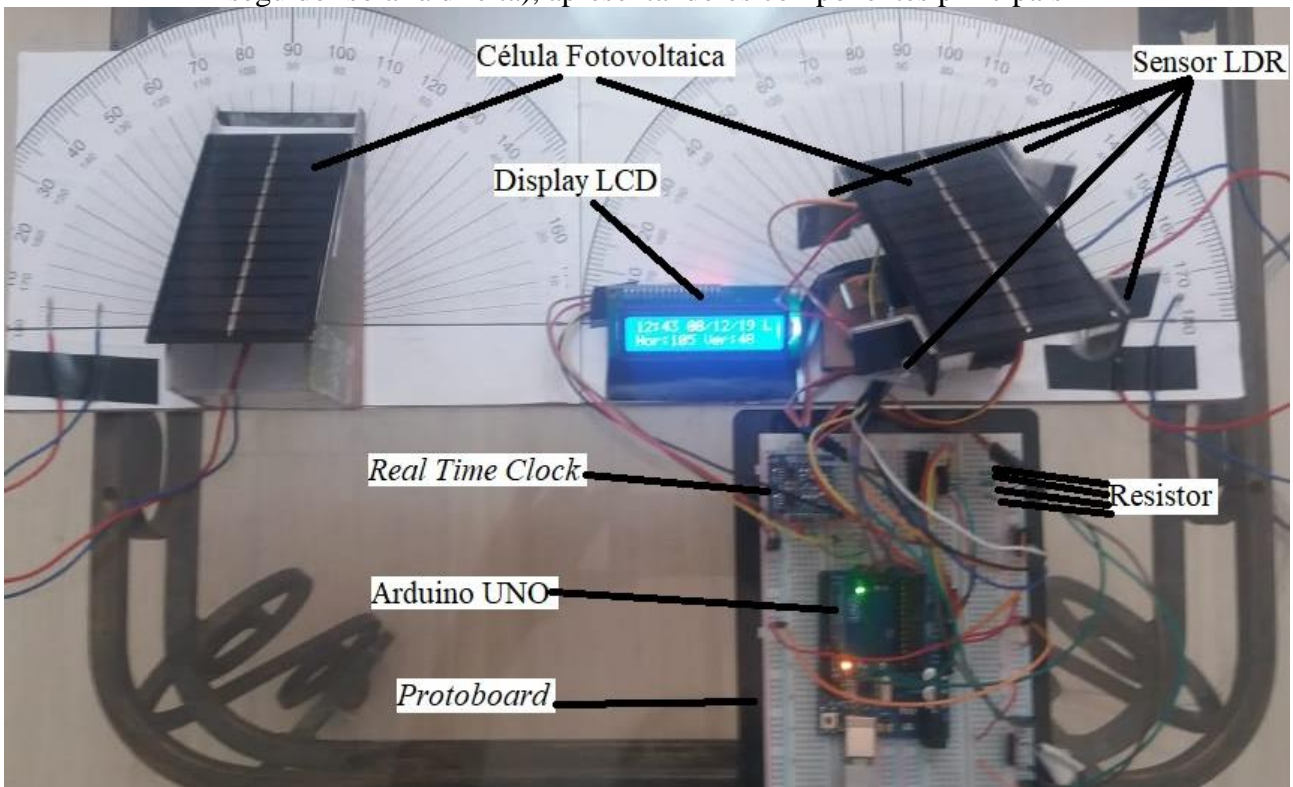
A estrutura foi feita em madeira devido ao seu baixo custo com apenas uma pequena chapa em “L” de aço para maior rigidez. Nela foram fixados dois servomotores 9g, com 180° de rotação e torque de 2,5 kg/cm, escolhidos por serem leves e por terem o torque necessário para fazer as movimentações, um para o azimute, posicionado embaixo, outro para a inclinação, posicionado em cima do primeiro, por intermédio de uma pequena placa de madeira. A este servomotor de cima, por meio de uma pequena chapa de aço com formato de “L”, se fixou uma célula fotovoltaica, à qual

foram anexados 4 sensores LDR, um em cada canto (em cima, à direita TR e à esquerda TL; embaixo, à direita DR, à esquerda DL). Cada um dos sensores foi ligado em série a uma resistência de $1000\ \Omega$. Em cada ligação foi disposto um *jumper* diretamente para uma entrada analógica de um microcontrolador Arduino UNO. Essa ligação funciona como um divisor de tensão, e cada uma das 4 entradas analógicas mede a tensão (em valores de 0 a 1023) resultante da variação de resistência de cada LDR com a luz, de maneira independente, podendo-se então realizar as avaliações dos valores dos LDRs e compará-los, de modo a identificar a direção na qual o sistema deve se deslocar na busca de maior luminosidade (e/ou menor sombreamento).

Esse microcontrolador também é responsável pelos cálculos da posição do Sol, utilizando dados de data e hora de um RTC (*real time clock*), por imprimir os valores de data, hora e posição dos servomotores em um display LCD, e também de fazer a movimentação destes servos quando necessário. Toda parte eletrônica foi organizada em uma *protoboard*.

Após a montagem, foram feitas medidas de alinhamento utilizando régua e transferidor, e os ângulos de correção foram adicionados no código. Tal código foi testado para alguns valores do mapa de caminho solar, sendo concordante com os valores escolhidos. O mapa é apresentado na Figura A1 do anexo A. O protótipo é mostrado na Figura 8 e a lista completa de componentes é apresentada na Tabela A1 do apêndice A.

Figura 8 – Protótipo desenvolvido com as duas células para fazer a comparação (fixa à esquerda, seguidor solar à direita), apresentando os componentes principais



3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizado inicialmente um teste preliminar, apenas com as células, para avaliar e ter uma noção inicial das tensões geradas, assim como suas variações devido tanto aos alinhamentos das células com os raios solares, como pelas perdas devido ao efeito do sombreamento, e também se ambas as células estavam apresentando resultados de geração energética iguais em condições iguais. Este teste, que foi realizado em um horário que permitisse grande diferença de ângulo

azimutal entre a posição de uma célula fixa e o Sol, consistiu em medir a tensão de uma célula perpendicular aos raios solares (o que se chamou posição “ótima”) e então medir a tensão aplicando um sombreamento de 50% da área da célula. Em seguida, o mesmo procedimento foi repetido, mas desta vez com a célula rotacionada em 90° de azimute a partir da posição “ótima”. Depois, foi executado, em posição “ótima”, a medição da tensão gerada por duas células ligadas em série, e, logo em seguida, aplicando um sombreamento de 50% de sua área.

A plataforma montada para o procedimento experimental consistiu em uma placa de madeira com um transferidor impresso para o alinhamento, na qual foram apoiados o seguidor solar e a célula fixa, esta última com inclinação igual à latitude local (30° em Porto Alegre), como são normalmente montados os painéis fotovoltaicos fixos, segundo Pinho e Galdino (2014). A preparação para o experimento consistiu em posicionar a plataforma de modo que esta ficasse alinhada com a direção horizontal utilizando um nível de bolha e voltada ao norte verdadeiro utilizando uma bússola, fazendo a correção adequada devido à declinação magnética (-17° 7' em Porto Alegre, 21/11/2019).

O experimento consistiu em tomar as medidas da geração energética das duas células para compará-las em duas situações:

- Para eficiência, foram medidas as correntes geradas, com 100% de luminosidade;
- Para os efeitos do sombreamento, foram medidas as tensões geradas, com 100% de luminosidade e com um sombreamento parcial de 50% da área das células, produzido ao introduzir um aparato entre os raios solares e a superfície das células.

Tais medições foram realizadas a cada 15 minutos, com o auxílio de um multímetro.

A partir deste experimento foram avaliadas as eficiências do seguidor em comparação com a célula fixa, tanto na situação normal como no caso do sombreamento. Com esses dados pode-se avaliar se o seguidor desenvolvido cumpriu seu objetivo, ao verificar se houveram aumentos de geração de corrente no primeiro caso, e as perdas de tensão gerada de cada um no segundo caso, fazendo a diferença relativa entre eles para ver quanto destas perdas foram reduzidas (ou não) pelo reposicionamento da célula. A eficiência é calculada pela Equação 10 e a redução das perdas pela Equação 11, apresentadas a seguir.

$$\varepsilon = \frac{\text{corrente gerada (seguidor)} - \text{corrente gerada (célula fixa)}}{\text{corrente gerada (seguidor)}} \cdot 100\% \quad (10)$$

onde ε é a eficiência do protótipo frente à célula fixa.

$$\eta = \frac{\text{perda relativa (célula fixa)} - \text{perda relativa (seguidor)}}{\text{perda relativa (célula fixa)}} \cdot 100\% \quad (11)$$

onde η é o percentual de redução das perdas, e as perdas relativas são obtidas pela Equação 12.

$$\text{perda relativa} = \frac{\text{tensão gerada caso normal} - \text{tensão gerada caso sombreamento}}{\text{tensão gerada caso normal}} \cdot 100\% \quad (12)$$

4. RESULTADOS

4.1 TESTES PRELIMINARES

O teste preliminar, feito às 16:30h para haver um ângulo de azimute significativo, apresentou os valores de 6,93 V para célula fotovoltaica perpendicular aos raios solares, contra 6,60 V para a mesma célula defasada em 90° do azimute solar, o que indica que as diferenças esperadas para o teste principal devem estar por volta de 0,30 V com relação aos valores de tensão obtidos pelo seguidor solar contra os valores obtidos pela célula fixa. Também foi obtido o valor de 6,63 V para a célula em posição ótima, mas com sombreamento de 50% de sua área, indicando que os valores

de perdas por sombreamento esperados, sem os ajustes de posição, são de aproximadamente 0,30 V. Caso o seguidor desenvolvido operasse apenas em malha aberta, esse resultado de 0,30 V de perda por sombreamento também seria esperado.

Kumar e Suryanarayana (2014), que obtiveram diferenças de tensão parecidas, explicam que a diferença significativa, nesse caso, está na corrente e, conseqüentemente, na potência gerada. Sendo assim, para o cálculo de eficiência do seguidor com relação à geração energética, foram utilizadas as correntes geradas como parâmetro de comparação, enquanto que para as perdas devido ao sombreamento, foram utilizadas as diferenças das tensões geradas como parâmetro de comparação, dada a dificuldade prática de medir as correntes no caso de sombreamento.

Outro resultado preliminar foi o teste com as duas células ligadas em série, em posição ótima, obtendo 13,51 V, e então, aplicando o sombreamento em uma das células, correspondendo aos 50% da área total, obteve-se um valor de 12,22 V, apresentando assim uma perda de tensão gerada de 1,29 V. Essa diferença corresponde a quatro vezes a perda da célula isolada, indicando que a queda na geração de tensão, quando em sombreamento e sem diodo, não é linear, sendo mais severa nos painéis do que se apresenta nas células isoladas.

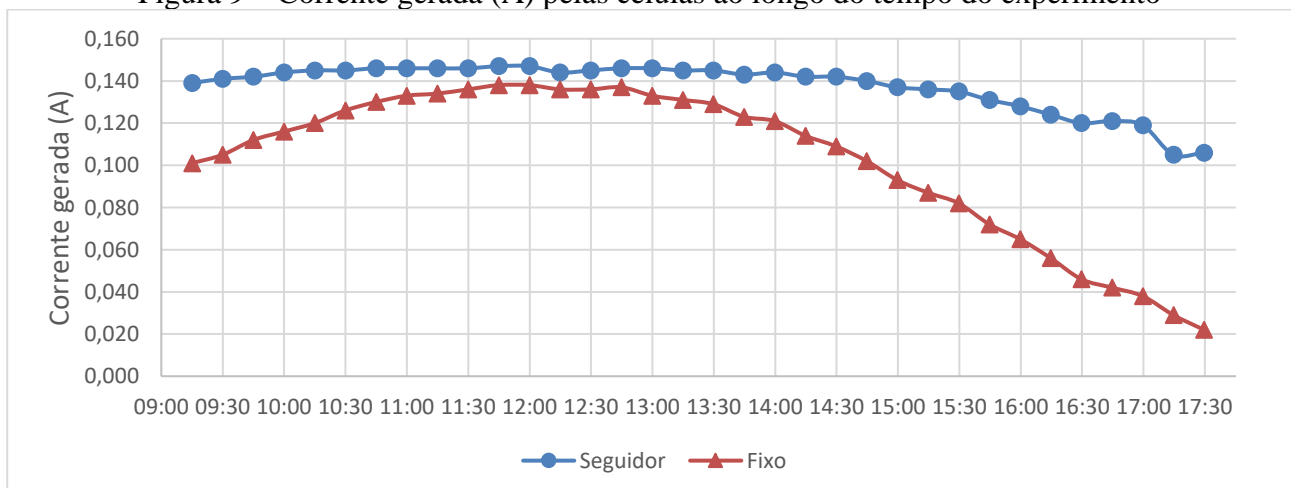
Apesar de ser relativamente pequena essa diferença de tensão, vale lembrar que estes são resultados para uma célula isolada e um “painel” de duas células, enquanto que painéis comerciais têm em torno de 60 a 72 células cada, e um sistema fotovoltaico conta com vários painéis, fazendo com que a união de todas estas pequenas diferenças, somada a hipótese levantada das perdas não serem lineares em painéis com sombreamento, seja significativa.

4.2 EXPERIMENTO PRINCIPAL

O experimento principal teve seu início às 09:15h. A partir deste horário, as medidas de tensão e corrente geradas pela célula fotovoltaica ligada ao seguidor solar e pela célula fixa foram tomadas em intervalos de 15 minutos, até às 17:30h. Ambas células foram testadas previamente ao experimento para não haver diferenças. Os resultados do experimento principal foram os seguintes:

Para o caso normal, ou seja, sem sombreamento nas células, obteve-se um **aumento médio de 27,11% na geração de corrente** pela célula no seguidor quando comparada à tensão gerada pela célula fixa, sendo este valor mais significativo pela manhã e no final da tarde, quando a defasagem do ângulo azimutal entre a célula fixa e o Sol é maior, com uma sequência de 68,07%, 72,38% e 79,25% de aumento de corrente gerada na célula do seguidor, nas últimas três medidas. Este resultado demonstra o êxito em alcançar a primeira parte do objetivo do trabalho, de aumentar sua eficiência em relação à uma célula fixa. Os resultados das correntes geradas pelas duas células, ao longo do tempo, estão compilados na Figura 9, e são apresentados na Tabela B1 do apêndice B.

Figura 9 – Corrente gerada (A) pelas células ao longo do tempo do experimento



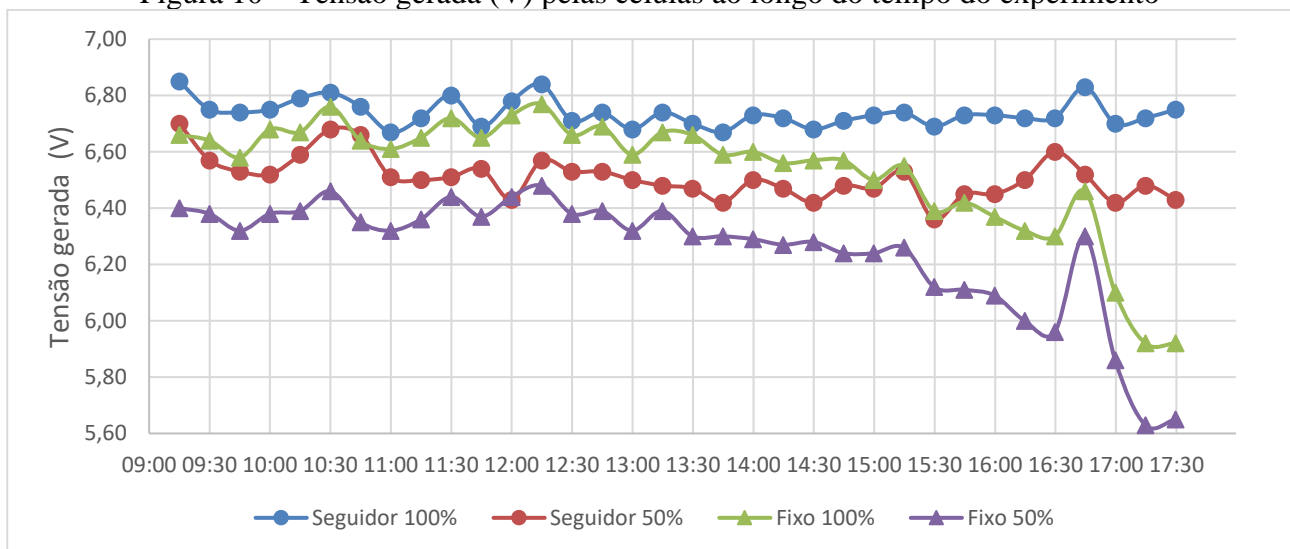
Os resultados obtidos para as tensões geradas no caso normal quando comparadas as tensões geradas no caso de sombreamento apresentaram uma **redução média de 20,45% nas perdas por sombreamento** da célula fotovoltaica presente no seguidor solar desenvolvido, quando comparada às perdas da célula fixa. Este resultado demonstra o êxito em alcançar a segunda parte do objetivo do trabalho, de reduzir as perdas por sombreamento.

Além disso, contribui-se para a literatura, pois conforme mencionado na seção 2.5, são raros os trabalhos experimentais na parte de sombreamento, e em especial, pela simulação de Alonso-Garcia et al. (2005) cuja conclusão foi que um sombreamento é mais severo quando atinge células de diferentes *strings*, e dado que o sombreamento pode se dar em qualquer direção, tem-se agora disponível uma estratégia de controle para diminuir o efeito do sombreamento via reposicionamento da célula fotovoltaica (que pode também ser aplicado a painéis), ao invés de apenas tentar diminuir os efeitos das perdas, evitando esse caso das diferentes *strings*.

Vale repetir o que fora discutido no tópico anterior, que apesar das perdas de tensão gerada, em termos absolutos serem baixas, estes resultados se tratam de uma célula isolada. Se for aplicado a um sistema fotovoltaico, com vários painéis, que contém cada um muitas células, e considerando que as perdas destes por sombreamento são mais severas, então uma redução nas perdas desta magnitude (20,45%), passa a ser, de interesse econômico, dado o alto custo dos sistemas, tanto para as áreas que sofrem com sombreamento pela sua disposição em relação a obstáculos na vizinhança, como também para as regiões em que os efeitos das nuvens são relevantes no desempenho do sistema.

Os resultados das tensões geradas pelas duas células, tanto no caso normal como para o caso de sombreamento, ao longo do tempo, estão compilados na Figura 10, e são apresentados na Tabela B1 do apêndice B.

Figura 10 – Tensão gerada (V) pelas células ao longo do tempo do experimento



4.3 ERROS E INCERTEZAS

Os erros e incertezas presentes no trabalho são:

- Erros de montagem do protótipo, uma vez que as peças da estrutura em madeira contém defeitos no paralelismo; dos servomotores que não permitem o alinhamento adequado devido às ranhuras presentes no encaixe entre o eixo e o acoplamento; no alinhamento dos componentes, e seu desvio devido ao peso próprio e ainda pela ação dos diversos *jumpers* ligados à célula fotovoltaica do seguidor por causa dos LDRs.
- Erros de calibração, dado que foram feitos com réguas e transferidores;

- Erros na instalação da plataforma no local de teste, que por si não era regular, e cujos ajustes foram feitos com um nível de bolha, e o alinhamento com uma bússola com resolução de 2°;
- Erros na medição, pois havia sempre algum intervalo de tempo entre estas, já que foram realizadas quatro medidas por vez, permitindo alguma variação na incidência solar.
- Incerteza quanto à medida do multímetro Hikari HM 1000 que apresenta $\pm (1,2\% + 2D)$ para uma faixa de 20 mA com resolução de 10 μ A e $\pm (1\% + 2D)$ para uma faixa de 20 V com resolução de 10 mV.

5. CONCLUSÃO

Conforme apresentado, o objetivo deste trabalho é o de buscar desenvolver um seguidor solar, cujo sistema de controle em malha fechada permitisse não apenas aumentar sua eficiência na geração de energia com a precisão de posicionamento perpendicular aos raios solares via equação da rota solar, mas também que fosse capaz de contornar o problema de eventuais sombreamentos, reduzindo suas perdas ao fazer as correções necessárias no posicionamento das células. O experimento apresentou os seguintes resultados:

Para o caso normal, ou seja, sem sombreamento nas células, obteve-se um **aumento médio de 27,11% na geração de corrente** pela célula fotovoltaica no seguidor quando comparada à corrente gerada pela célula fixa, sendo este valor mais significativo no final da tarde.

Para o caso em sombreamento de 50% da área das células, comparando as perdas de geração de tensão em ambas placas, o protótipo apresentou uma **redução média de 20,45% nas perdas por sombreamento**.

As sugestões para trabalhos futuros são:

- Reproduzir este trabalho utilizando um módulo fotovoltaico (ao invés de uma célula isolada), para obter valores médios mais próximos dos sistemas instalados reais, e para tanto, projetar uma estrutura mais robusta, diminuindo os erros de montagem;
- Instalar um circuito integrado MPU (com acelerômetro e giroscópio) para se obter a posição do seguidor automaticamente, evitando assim a calibração manual com régua e transferidores, assim como a posição correta sem o uso de níveis e bússolas, que tem pouca precisão e/ou baixa resolução;
- Instalar medidores de tensão, corrente e potência ao sistema, permitindo medições mais acuradas, com intervalos mais curtos de tempo para a simulação do sombreamento, e também um sistema de aquisição de dados para ter um histórico de medidas muito maior, gerando um gráfico com valores mais aproximados da realidade;
- Realizar um estudo acerca da relação de energia consumida pelos servomotores para a movimentação do sistema com o aumento de energia gerada pelos seguidores solares, de modo a identificar quando vale a pena fazer a movimentação destes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH, S. **“The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics”**. 2004. Energy Conversion and Management. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Applied Science University, Jordan.
- ABDALLAH, S.; NIJMEH, S. **“Two axes sun tracking system with PLC control”**. 2004. Energy Conversion and Management, 45(11-12), 1931–1939. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Applied Science University, Jordan.
- ABREU, S. L. **“Desenvolvimento de um sistema de aquecimento solar compacto utilizando termossifões bifásicos”**. 155 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- ALONSO-GARCIA, M. C. et al. **“Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays”**. 2005. Renewable Energy, 31(12), 1986–1993. CIEMAT - División de Energías Renovables, Madrid, Spain.
- ALONSO-GARCIA, M. C. et al. **“Experimental study of mismatch and shading effects in the characteristic of a photovoltaic module”**. 2006. Solar Energy Materials and Solar Cells, 90(3), 329–340. CIEMAT - División de Energías Renovables, Madrid, Spain.
- BIDRAM, A. et al. **“Control and Circuit Techniques to Mitigate Partial Shading Effects in Photovoltaic Arrays,”** in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 2, no. 4, pp. 532-546, 2012.
- DOLARA, A. et al. **“Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules”**. 2013. Energy, 55, 466–475.
- DIEDRICH, V. A. **“Geração distribuída baseada em um sistema fotovoltaico”**. 71 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- HIKARI, Site do suporte. **“Manual de instruções do multímetro digital Hikari HM 1000”**. <<http://www.hikariferramentas.com.br/suporte/download-center/>> Acesso em 02/12/2019.
- IMHOFF, J. **“Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos”**. 146 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- ISHAQUE, K.; SALAM, Z. **“A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition”**. 2013. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1–1.
- KAJIHARA, A.; HAKAWA, T. **“Model of Photovoltaic Cell Circuits under Partial Shading”**. 2005 IEEE International Conference on Industrial Technology.
- KALOGIROU, S. A. **“Design and construction of a one-axis sun-tracking system”**. 1996. Solar Energy, 57(6), 465–469.

KUMAR, V. S.; SURYANARAYANA, S. “**Automatic dual axis sun tracking system using LDR sensor**”. 2014. International Journal of Current Engineering and Technology.

LASNIER, F.; ANG, T. G. “**Photovoltaic Engineering Handbook**”. 1st Edition, CRC Press. Boca Raton, 1990.

LIRA, J. R. V. “**Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação**”. 82 fls. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

LOPES, R. J. C. “**Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**”. 128 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, Lisboa, 2013.

MAGNETIC DECLINATION <<http://www.magnetic-declination.com/>> Acessado em 21/11/2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Publicações e indicadores. “**Balanco energético nacional**” <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico-nacional>> Acessado em 08/10/2019.

NETO, A. F. C. P.; et al. “**Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centrais fotovoltaicas conectadas à rede**”. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2010.

OGATA, K.; “**Engenharia de Controle Moderno**”. Pearson Prentice Hall, Brasil, 5ª edição, 2010.

OLIVEIRA, M. M. “**Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal**”. 138 fls. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**”.

CRESESB. Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES, Rio de Janeiro, 2014.

SHAMS EL-DEIN, M. Z.; et al. “**Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses**”. 2013. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4(1), 145–153.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. “**Fundamentos de circuitos elétricos**”. 5 ed, AMGH, Porto Alegre, 2013.

TANNHAUSER, E. S. “**Desenvolvimento de uma plataforma Inteligente para Apoio de Painéis Fotovoltaicos**”. 26 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

Universidade de Oregon “**Sun path chart**” <<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>> Acessado em 13/11/2019.

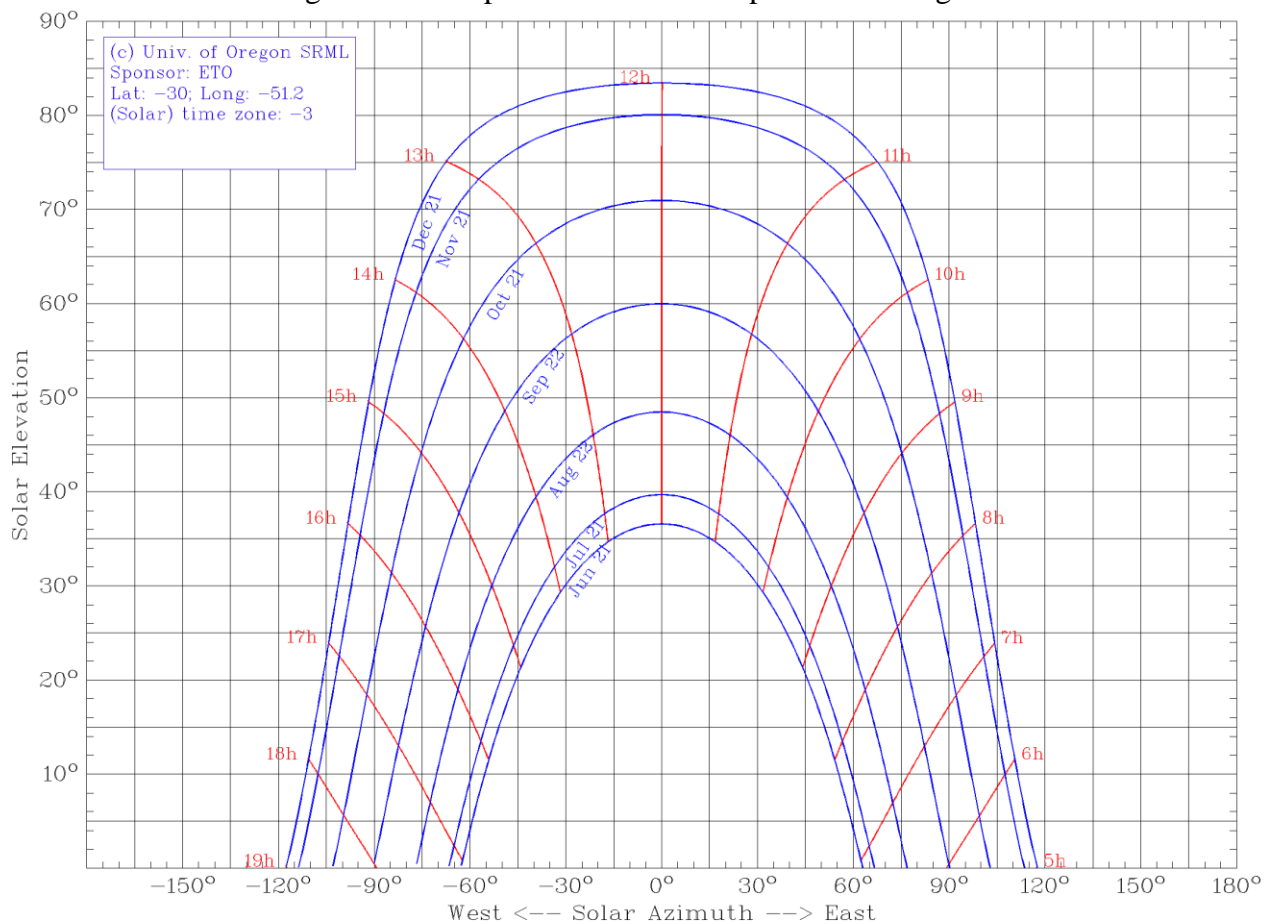
WANG, Y.-J.; HSU, P.-C. “**Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules**”. 2010. IET Renewable Power Generation, 4(3), 272.

NOMENCLATURA

SIGLA	SIGNIFICADO	UNIDADE
δ	Declinação solar	° (graus)
θ_z	Zênite solar	° (graus)
ω	Ângulo horário	° (graus)
ϕ	Latitude local	° (graus)
α	Altitude ou elevação solar	° (graus)
γ_s	Azimuth solar	° (graus)
Γ	Ângulo auxiliar	° (graus)
ε	Eficiência em geração energética	% (percentual)
η	Redução das perdas por sombreamento	% (percentual)
TSV	Tempo solar verdadeiro	horas
LCT	Hora local	horas
LC	Longitude corrigida	° (graus)
Et	Equação do tempo	minutos
TR	LDR do canto superior direito (Top Right)	Volts
TL	LDR do canto superior esquerdo (Top Left)	Volts
DR	LDR do canto inferior direito (Down Right)	Volts
DL	LDR do canto inferior esquerdo (Down Left)	Volts
T	Soma dos LDRs superiores	Volts
D	Soma dos LDRs inferiores	Volts
R	Soma dos LDRs à direita	Volts
L	Soma dos LDRs à esquerda	Volts
LDR	Resistor dependente de luz (Light dependant resistor)	-----
RTC	Relógio de hora real (Real time clock)	-----

ANEXO A – MAPA DE CAMINHO DO SOL PARA PORTO ALEGRE

Figura A1 – Mapa de caminho solar para Porto Alegre



Fonte: Universidade de Oregon

APÊNDICE A – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS

Tabela A1 – Lista de materiais utilizados na fabricação do protótipo

QTD	MATERIAL
2	Célula fotovoltaica 6V
1	Microcontrolador Arduino UNO
1	<i>Real Time Clock (RTC)</i>
1	Display LCD 16x2 com módulo I2C
2	Servomotor 9g
4	Sensor LDR
4	Resistor 1000 Ω
1	<i>Protoboard</i>
1	Fonte 6V 150 mA para os servomotores
1	Cabo USB A/B para o Arduino
diversos	<i>Jumper</i>
1	Chapa de aço em "L"
1	Chapa de madeira para base
1	Pequena placa de madeira
1	Fitas: dupla face, isolante e adesiva

APÊNDICE B – RESULTADOS DO EXPERIMENTO PRINCIPAL

Tabela A2 – Resultados do experimento principal

Horário	SEGUIDOR			FIXO			EFICIÊNCIA	
	Corrente (A)	Tensão (V) 100%	Tensão (V) 50%	Corrente (A)	Tensão (V) 100%	Tensão (V) 50%	Corrente (%)	Redução perdas (%)
09:15	0,139	6,85	6,70	0,101	6,66	6,40	27,34	43,91
09:30	0,141	6,75	6,57	0,105	6,64	6,38	25,53	31,90
09:45	0,142	6,74	6,53	0,112	6,58	6,32	21,13	21,15
10:00	0,144	6,75	6,52	0,116	6,68	6,38	19,44	24,13
10:15	0,145	6,79	6,59	0,120	6,67	6,39	17,24	29,83
10:30	0,145	6,81	6,68	0,126	6,76	6,46	13,10	56,98
10:45	0,146	6,76	6,66	0,130	6,64	6,35	10,96	66,13
11:00	0,146	6,67	6,51	0,133	6,61	6,32	8,90	45,32
11:15	0,146	6,72	6,50	0,134	6,65	6,36	8,22	24,93
11:30	0,146	6,80	6,51	0,136	6,72	6,44	6,85	-2,35
11:45	0,147	6,69	6,54	0,138	6,65	6,37	6,12	46,75
12:00	0,147	6,78	6,43	0,138	6,73	6,44	6,12	-19,80
12:15	0,144	6,84	6,57	0,136	6,77	6,48	5,56	7,85
12:30	0,145	6,71	6,53	0,136	6,66	6,38	6,21	36,19
12:45	0,146	6,74	6,53	0,137	6,69	6,39	6,16	30,52
13:00	0,146	6,68	6,50	0,133	6,59	6,32	8,90	34,23
13:15	0,145	6,74	6,48	0,131	6,67	6,39	9,66	8,11
13:30	0,145	6,70	6,47	0,129	6,66	6,30	11,03	36,49
13:45	0,143	6,67	6,42	0,123	6,59	6,30	13,99	14,83
14:00	0,144	6,73	6,50	0,121	6,60	6,29	15,97	27,24
14:15	0,142	6,72	6,47	0,114	6,56	6,27	19,72	15,85
14:30	0,142	6,68	6,42	0,109	6,57	6,28	23,24	11,82
14:45	0,140	6,71	6,48	0,102	6,57	6,24	27,14	31,76
15:00	0,137	6,73	6,47	0,093	6,50	6,24	32,12	3,42
15:15	0,136	6,74	6,53	0,087	6,55	6,26	36,03	29,63
15:30	0,135	6,69	6,36	0,082	6,39	6,12	39,26	-16,74
15:45	0,131	6,73	6,45	0,072	6,42	6,11	45,04	13,84
16:00	0,128	6,73	6,45	0,065	6,37	6,09	49,22	5,35
16:15	0,124	6,72	6,50	0,056	6,32	6,00	54,84	35,34
16:30	0,120	6,72	6,60	0,046	6,30	5,96	61,67	66,91
16:45	0,121	6,83	6,52	0,042	6,46	6,30	65,29	-83,25
17:00	0,119	6,70	6,42	0,038	6,10	5,86	68,07	-6,22
17:15	0,105	6,72	6,48	0,029	5,92	5,63	72,38	27,09
17:30	0,106	6,75	6,43	0,022	5,92	5,65	79,25	-3,95
Médias	0,138	6,74	6,51	0,103	6,53	6,25	27,11	20,45