

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA COMPONENTE DIRETA DA RADIAÇÃO SOLAR

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Peterson Augusto Ferreira (Unifesp, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: peterson.augusto@unifesp.br

Dr. Waldeir Amaral Vilela (LAS/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: waldeir@las.inpe.br

Junho de 2016

RESUMO

Uma das formas de se estudar a distribuição espectral da radiação solar é utilizar um seguidor solar combinado e a um sistema de aquisição de espectro. Basicamente um seguidor solar consiste em uma plataforma com um sensor que acompanha o movimento do Sol ao longo do dia e ao longo do ano. Ao longo do dia o sistema se desloca de Leste a Oeste para acompanhar o movimento de rotação da Terra e ao longo do ano o sistema se desloca de Norte a Sul para acompanhar o movimento de translação do planeta, de forma que está sempre apontando o sensor diretamente para o Sol.

Neste trabalho de Iniciação Científica foi desenvolvido um protótipo de um seguidor solar de dois eixos, que permite que seja acoplado um sistema de aquisição de espectro, de forma que seu uso possa contribuir para que sejam adquiridos dados para formação de um banco de dados de espectro da radiação solar direta.

Palavras-chave: Seguidor solar, Energia solar, Espectro Solar

Sumário

1-INTRODUÇÃO.....	4
2-OBJETIVOS.....	6
3-A RADIAÇÃO SOLAR.....	6
4-A DECLINAÇÃO SOLAR E SEU MOVIMENTO.....	7
5-O HORARIO SOLAR APARENTE, TEMPO SOLAR MÉDIO E A EQUAÇÃO DO TEMPO.....	9
6-ÂNGULOS SOLARES.....	10
7-A PLATAFORMA ARDUINO.....	11
8-SERVO MOTOR.....	12
9 - DESENVOLVIMENTO DO SEGUIDOR.....	13
10 - O PROTÓTIPO.....	15
11 - CONCLUSÃO.....	17

1-INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental para suprir necessidades do homem moderno, mas seu processo de obtenção na maioria dos países tem alta dependência da utilização de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural). Para alguns países que apresentam grande disponibilidade de potencial hidrológico, como é o caso do Brasil a principal fonte de energia elétrica são as usinas hidroelétricas.

Os combustíveis fósseis são recursos finitos, e seu uso contribui para o aquecimento global, devido aos gases liberados no processo para obter energia desses combustíveis. E as usinas hidroelétricas apresentam alto impacto ambiental devido à necessidade de grandes reservatórios de água e ainda possuir o inconveniente da dependência com os ciclos de chuvas. Esses e outros aspectos fazem com que a utilização de fontes alternativas de energia, limpas e renováveis se torne cada vez mais importante.

Entre as fontes de energia alternativas, uma que tem se destacado no cenário mundial é a energia solar, em especial a energia solar fotovoltaica. Devido as suas inúmeras vantagens, como por exemplo, o Sol ser uma fonte de energia perene e inesgotável, e as usinas solares poderem ser instaladas próximas aos centros consumidores. A energia solar também poder ser obtidas em lugares remotos (comunidades indígenas ou rurais isoladas) fora do alcance da rede de energia elétrica comercial.

A fração da radiação solar que, sem sofrer desvios de sua trajetória, atravessa a atmosfera e atinge o solo é conhecida como componente da radiação solar direta. Com o conhecimento da intensidade e distribuição dessa radiação é possível avaliar os recursos solares para usinas termoeletricas e fotovoltaicas concentradas. Essas usinas utilizam concentradores solares (lentes ou espelhos) para concentrar a radiação solar em uma área reduzida onde está contido um fluido para aquecimento ou uma célula solar especial.

Para a energia solar fotovoltaica poder ser explorada com eficiência no Brasil é

necessário o domínio tecnológico e conhecer o potencial solar fotovoltaico no país, um dos fatores pouco estudado é a variabilidade espectral da radiação solar local e sua influência nas diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos. Por isso, tornou-se crucial conhecer o espectro solar para as diversas regiões brasileira. O potencial solar fotovoltaico está relacionado às condições climáticas e às condições de irradiação de cada região, que só são corretamente determinados se houver um monitoramento contínuo da irradiação solar no local onde se pretende instalar o sistema de captação. (VILELA, 2010).

Atualmente os sistemas fotovoltaicos que apresentam maior rendimento são os que utilizam concentradores solares (lentes e espelhos), capazes de concentrar a radiação solar direta sobre células de pequena área e alta eficiência, tornando o conhecimento dessa radiação necessário.

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de medida espectral para a radiação solar direta, utilizando um seguidor solar combinado a um dispositivo de medição de radiação solar. Um seguidor solar consiste em um dispositivo que acompanha o movimento do Sol ao longo do dia, se deslocando de Leste a Oeste para acompanhar o movimento de rotação da Terra e ao longo do ano deslocando de Norte a Sul para acompanhar o movimento de translação do planeta, de forma que está sempre apontando o sensor de medida espectral acoplado diretamente para o Sol. Ou seja, o ajuste da posição do sensor espectral de acordo com o movimento aparente do astro.

O protótipo apresenta dois eixos controlados por servomotores e um microcontrolador, que calcula a posição do Sol através de equações que modelem a trajetória do mesmo, utilizando as coordenadas geográficas (latitude e longitude), hora e data local. E essa posição é dada através de dois ângulos: azimute e ângulo de altitude, que são reproduzidos pelos servos motores para posicionar o sensor espectral. Esse sensor deve estar sempre apontado para o Sol para que a radiação solar captada seja unicamente da região do disco solar e da região vizinha denominada circunsolar. Para garantir que a radiação provenha unicamente do disco solar o sensor é acoplado a um

tubo colimador, que possui o ângulo de visão muito pequeno ($< 5^\circ$).

2-OBJETIVOS

Este relatório tem como objetivo principal mostrar as atividades de pesquisa de Iniciação Científica onde foi desenvolvido um protótipo de um sistema de medida espectral da radiação solar direta para atender à necessidade de um projeto de pesquisa do INPE que estuda a variabilidade espectral da radiação solar. Para determinar a posição do Sol são utilizadas equações que preveem o movimento aparente do astro, para isso o sistema utiliza um processador de dados (plataforma Arduino), e dois servos motores para movimentar a plataforma do sensor (radiômetro espectral) de forma a manter a focalização do sensor ao se movimentar seguindo o movimento solar e constantemente ser ajustado ao longo do dia e do ano.

3-A RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol através de ondas eletromagnética, por envolver o transporte de energia por meio de campos elétricos e magnéticos. Esse tipo de energia apresenta elevado potencial de utilização em sistemas fotovoltaicos, como é o caso da energia elétrica obtida através de painéis fotovoltaicos. (VILELA, 2010)

Nem toda a radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre consegue chegar ao nível do solo, uma parte é refletida de volta ao espaço ou absorvida pela atmosfera. A radiação que penetra a atmosfera pode ser dividida em duas componentes, uma é direta e outra é difusa, a soma das componentes direta e difusa é denominada de radiação global, conforme Figura 1. (KREIDER, 1981).

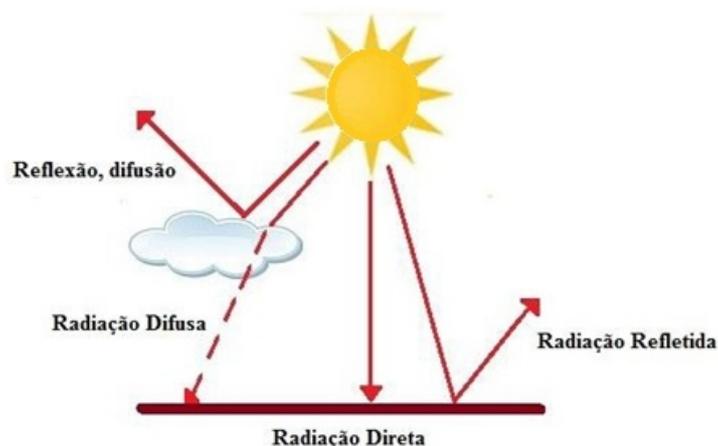


Figura 1 – Componentes da radiação que atingem a Terra

No Brasil, os valores de irradiação solar global anual incidente em qualquer região do seu território na horizontal (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da Europa, como por exemplo, Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²). (MARTINS, 2008) Nesses países existem projetos para aproveitamento de recursos de energia solar que vem sendo desenvolvidos em grande escala, com fortes incentivos governamentais, algo semelhante poderia ser aplicado no Brasil.

4-A DECLINAÇÃO SOLAR E SEU MOVIMENTO

Ao considerar a Terra como centro de uma esfera, um círculo imaginário pode ser feito considerando a órbita do Sol. O plano delimitado por este círculo é conhecida como eclíptica e essa esfera como esfera celeste. Na Figura 2 podemos observar uma representação dessa esfera, onde é representado a eclíptica e o equador celeste (círculo máximo em que o prolongamento do equador da Terra intercepta a esfera celeste).

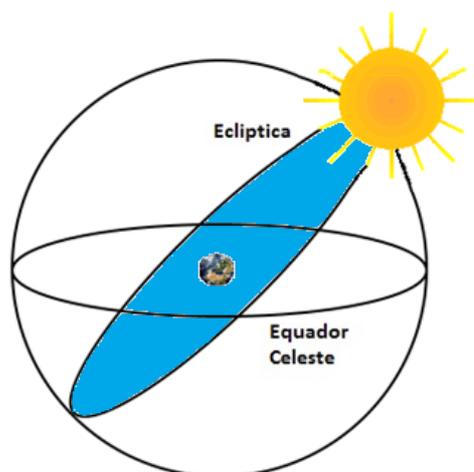


Figura 2 – A Esfera Celeste ¹

A Terra tem como movimentos principais rotação e translação, ao realizar o movimento de translação descreve uma trajetória elíptica no plano da eclíptica, e sofre inclinações que variam de $\pm 23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial terrestre, como representado na Figura 3. (MARTINAZZO, 2004). Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo do ano.

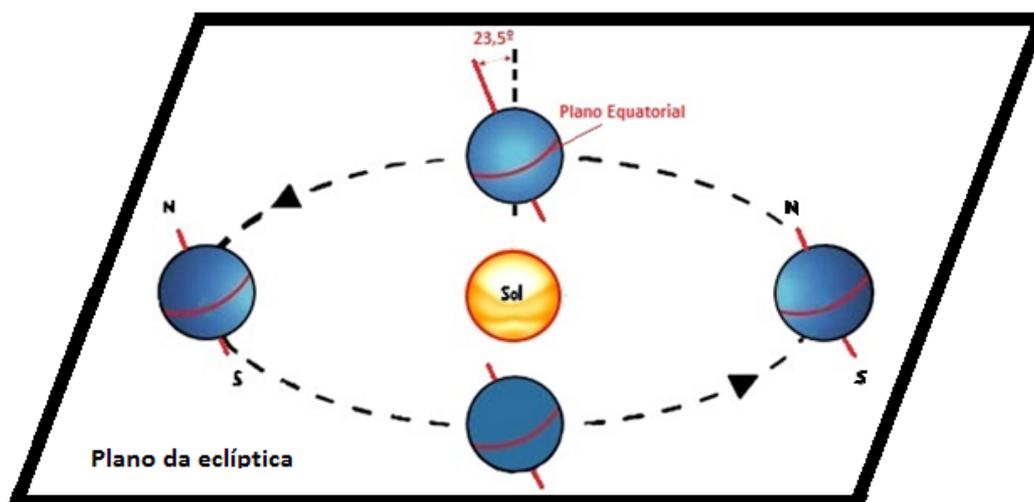


Figura 3 – Trajetória elíptica do Sol e sua declinação

Esses movimentos fazem com que em determinada época do ano, a luz solar

incida com maior intensidade sobre o hemisfério norte e, na outra parte do ano, incida com maior intensidade sobre o hemisfério sul, evento conhecido como solstício e ocorre nos dias 23/06 e 22/12. E também temos a época, que a luz solar incide de maneira igual sobre os dois hemisférios, caracterizando o equinócio (21/03 e 23/09). (VILELA, 2010)

Essa declinação é dada em ângulos e por convenção é positiva a partir do equinócio de março e negativa durante os meses seguintes até o equinócio de setembro. Ela é representada por δ e varia de acordo com o dia do ano e dentro dos limites estabelecidos: $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. Um dos meios de calculá-la é utilizando a equação a seguir, onde “nd” é número de dia do ano, ou seja, ele representa o número de dias do ano transcorridos, como, por exemplo, dia 2 de fevereiro seria o 33º dia do ano: (CARRUTHERS, 1990):

$$\delta = (0.322003 - 22.984 * \cos(2*\pi * ((nd-1)/365.0)) - 0.357898 * \cos(2*(2*\pi * ((nd-1)/365.0))) - 0.14398 * \cos(3*(2*\pi * ((nd-1)/365.0))) + 3.94638 * \sin(2*\pi * ((nd-1)/365.0)) + 0.019334 * \sin(2*(2*\pi * ((nd-1)/365.0))) + 0.05928 * \sin(3*(2*\pi * ((nd-1)/365.0))) \text{ (Equação 1)}$$

5-O HORARIO SOLAR APARENTE, TEMPO SOLAR MÉDIO E A EQUAÇÃO DO TEMPO

O horário solar utiliza o movimento diário do Sol, basicamente é a hora medida em um relógio solar, e considera o meio-dia como o momento da passagem do astro pelo meridiano local.

Já o tempo solar médio, representa um movimento de um Sol fictício, que se move ao longo do equador celeste. O Sol verdadeiro se move ao longo da Eclíptica, com velocidade angular constante, de modo que os dias solares médios são iguais entre si. O mesmo não acontece com os dias solares verdadeiros, que não são iguais entre si porque o movimento do Sol na eclíptica não tem velocidade angular constante. ² O tempo solar aparente sofre variações durante o ano, que pode ter atrasos ou adiantamentos em relação ao horário solar aparente.

Para efeitos de cálculos da posição do Sol, é utilizada uma equação que relaciona essa diferença, conhecida como equação do tempo (ψ), que é definida como a diferença (em função do dia do ano) entre o tempo lido a partir de um relógio de Sol (horário solar) e o tempo solar médio. ¹ Essa diferença é resultado da combinação do efeito da excentricidade da órbita terrestre com a inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à eclíptica e pode ser calculada utilizando a equação a seguir: (CARRUTHERS, ET. AL. 1990)

$$\psi = (5.0323 - 100.976 * \text{sen}(279.134 + 0.985647 * nd) + 595.275 * \text{sen}(2*(279.134 + 0.985647 * nd)) + 3.6858 * \text{sen}(3*(279.134 + 0.985647 * nd)) - 12.47 * \text{sen}(4*(279.134 + 0.985647 * nd)) - 430.847 * \text{cos}((279.134 + 0.985647 * nd) (279.134 + 0.985647 * nd)) + 12.5024 * \text{cos}(2*(279.134 + 0.985647 * nd)) + 18.25 * \text{cos}(3*(279.134 + 0.985647 * nd)))$$

(Equação 2)

6-ÂNGULOS SOLARES

Para a determinação da posição do Sol, são utilizados ângulos que usam o raio incidente do Sol e os eixos cardeais Norte-Sul e Leste-Oeste, para esse trabalho podemos destacar alguns deles:

ψ - Ângulo de Zênite – É o ângulo formado entre a projeção da radiação solar em relação à normal do plano horizontal.

ω - Ângulo Horário – É o ângulo formado pela projeção normal de uma superfície horizontal e o polo celeste. Vale 15° para cada hora pela manhã e soma 15° a cada hora da tarde e vale 0° ao meio dia solar verdadeiro.

θ - Ângulo solar de Altitude ou elevação– É o ângulo entre a linha horizontal e a linha do Sol. Esse ângulo pode ser calculado utilizando umas das equações de Szokolay: (SZOKOLAY, 1996)

$$\varphi = \arcsen((\text{sen}(\delta) * \text{sen}(\text{latitude})) + (\text{cos}(\delta) * \text{cos}(\text{latitude}) * \text{cos}(\omega))) \quad (\text{Equação 3})$$

α - **Ângulo de Azimute solar** – É o ângulo formado pela linha que indica o pólo norte e a projeção da radiação solar direta sobre o plano horizontal. Esse ângulo pode ser calculado utilizando a equação a seguir: (SZOKOLAY, 1996)

$$\alpha = \arccos((\cos(\text{latitude}) * \sin(\delta)) - (\cos(\delta) * \sin(\text{latitude}) * \cos(\omega)) / \cos(\theta)); \text{ (Equação 4)}$$

A Figura 4 ilustra os principais ângulos utilizados neste trabalho:

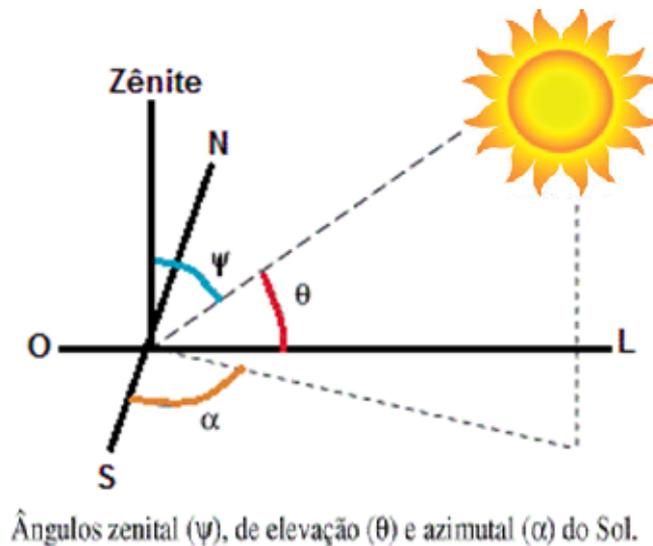


Figura 4 – Ângulos Solares utilizados no Seguidor Solar

7-A PLATAFORMA ARDUINO

Arduíno é uma plataforma de prototipagem eletrônica baseada na flexibilidade de hardware e software, destinado a qualquer pessoa interessada em desenvolver projetos e criar objetos em um ambiente interativo. (arduino.cc, 2016, tradução) Para programar essa plataforma é utilizado o IDE do Arduino, um software livre para escrever o código na linguagem que o Arduino compreende. Esse programa permite que depois de escrito, o upload do programa para o Arduino, executará as instruções desse programa, interagindo com o que estiver conectado a ele. Esses programas são conhecidos como: sketches.

Ao Arduino pode ser conectado, displays (mostradores) de matriz de pontos,

botões, LEDs, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, receptores GPS entre outros. E pode ter suas funções ampliadas, usando extensões apropriadas chamadas de Shields, que são simplesmente conectados a ele.

Existem várias versões de placas Arduino, elas são atrativas por serem acessíveis, flexíveis, ter baixo custo e serem fáceis de se usar. A mais popular é o Arduino Uno, graças a sua versatilidade. Devido à quantidade de pinos que ele possui (apresenta um chip padrão de 28 pinos, ligado a um soquete de circuito integrado) e ao seu tamanho reduzido. Na Figura 5, o Arduino Uno pode ser visualizado, com algumas de suas partes identificadas.

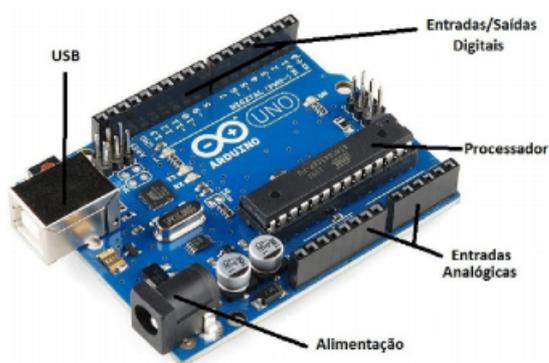


Figura. 5 - Arduino Uno e suas principais partes

8-SERVO MOTOR

O servo motor é um dispositivo usado quando se deseja movimentar algo de forma precisa e controlada, e possui a capacidade de movimentar o seu braço até uma posição e mantê-lo, mesmo quando sofre uma força em outra direção. Graças basicamente a um potenciômetro que é controlado por um circuito de controle, que aciona o motor visando uma posição pré-determinada. Demonstrando na Figura 6.

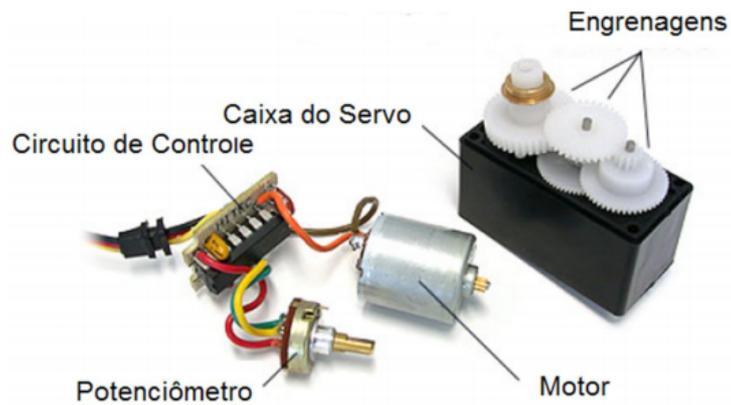


Figura. 6 – Servo motor e suas partes ⁴

9 - DESENVOLVIMENTO DO SEGUIDOR

Utilizando as equações descritas neste relatório, foi possível criar um código para ser utilizado na placa Arduino, que ao ser combinado a servos motores e a um *real time clock* (RTC), calcula a trajetória do Sol (em função do tempo), utilizando a latitude, longitude, fuso horário e hora local. A posição é dada por dois ângulos, o azimute e a altitude solar, conforme demonstrado na Figura 7, além de fornecer o horário em que o Sol nasce e se põem.

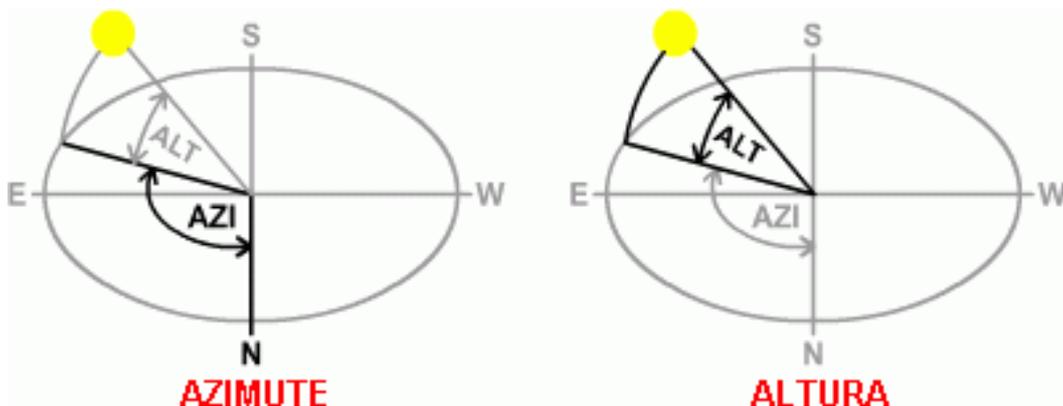


Figura. 7 – Azimute e Altura solar ⁴

A seguir são exibidas simulações feitas para a cidade de São José dos Campos,

com coordenadas $23^{\circ} 10' 44''$ S, $45^{\circ} 53' 13''$ W, para o dia 01/06/2016. A primeira simulação se trata do ângulo de azimute (Figura 8) e a segunda do ângulo de altitude (Figura 9). O nascer do Sol nesse dia segundo a simulação foi as 06:40 e o pôr-do-Sol foi as 17:21. Para esse mesmo dia a previsão do CPTEC/INPE, foi para o nascer do Sol 06:41:10 e para o pôr-do-Sol foi as 17:22:32. Demonstrando que existe pouca diferença entre os resultados, indicando que o código é uma boa aproximação.

Em relação aos gráficos, o gráfico de azimute tem um formato de duas meias parábolas combinadas, isso se deve ao fato de considerar o Norte como zero graus no círculo trigonométrico. Já o gráfico de altitude solar tem formato de uma parábola completa. Comportados esperados, pois o Sol, tem um movimento parabólico, para a referência adotada. Também, era esperado que o ponto mais alto da parábola do gráfico de altitude, fosse perto do meio-dia onde o Sol estaria a pino, e isso realmente foi observado.

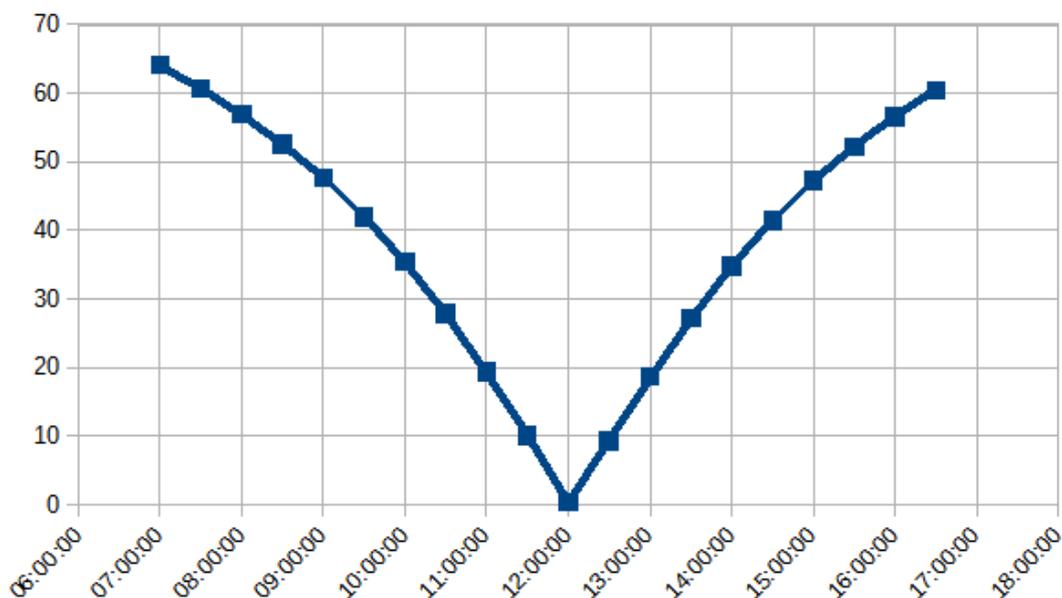


Figura. 8 – Azimute para SJC – 01/06/2016

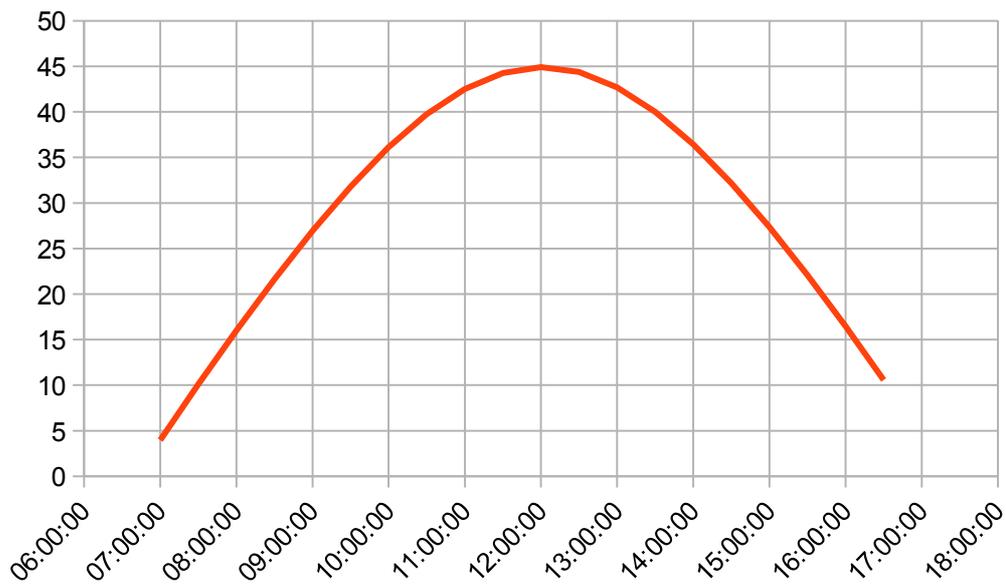


Figura. 9 – Ângulo de altitude para SJC – 01/06/2016

As referências dos ângulos utilizadas para o programa são apresentadas na Figura 10.

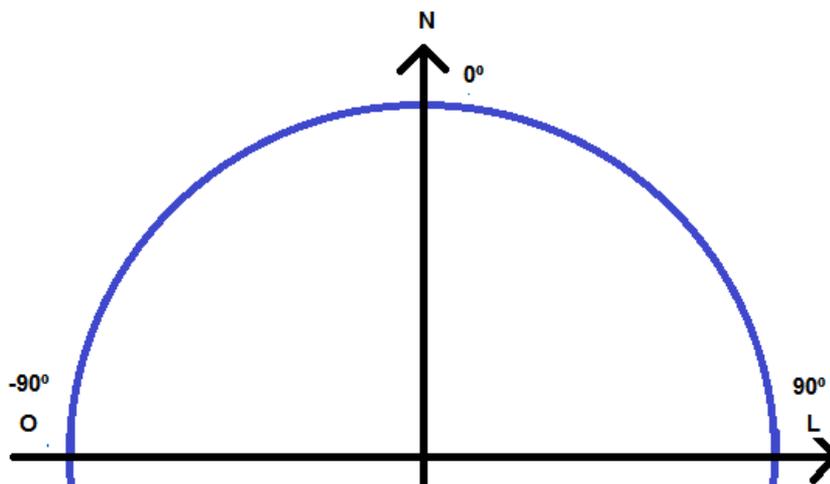


Figura. 10 – Referências dos ângulos para o programa do seguidor solar

10 - O PROTÓTIPO

Nas Figura 11 é apresentado o protótipo, que utiliza dois servos motores com 15 kg/cm para 6 V cada (torque suficientes para movimentar o sensor acoplado a base

colimadora) além de uma base giratória Pan Tilt de metal.

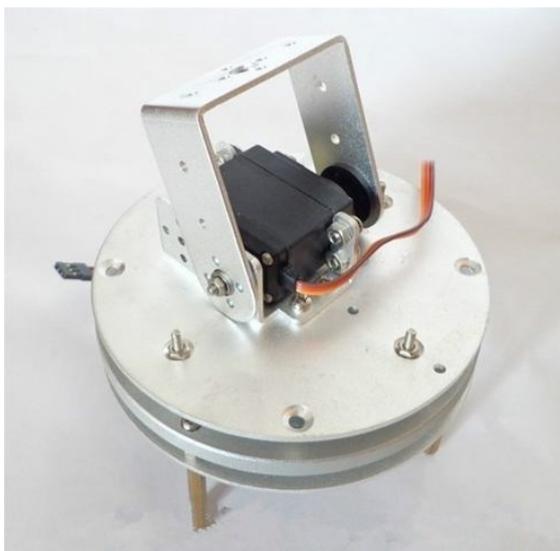


Figura 11 – PAN/TILT de metal

Essa base junto aos servos motores permitem que os ângulos calculados pelo programa no Arduino (azimute e ângulo de altura) sejam reproduzidos. O sistema também apresenta uma pequena caixa de plástico (Figura 12), onde a placa Arduino foi fixada, junto ao modelo RTC, com um visor que mostra a hora local e o horário de nascimento e pôr do Sol.



Figura 12 –Caixa plástica com visor

Foram feitos testes práticos para testar se realmente o seguidor está acompanhando o movimento aparente do Sol, o teste consistia em visualizar a sombra de um parafuso acoplado ao seguidor em uma superfície circular, também acoplada (Figuras 13 e 14). Como o seguidor sempre aponta para o Sol e está alinhado ao mesmo, a sombra do parafuso não deveria ser visualizada. Nesse teste foi possível perceber que o sistema já é funcional, mas algumas adaptações ainda são necessárias no programa, pois ainda o alinhamento não está totalmente correto, ainda existia um pouco de sombra do parafuso na superfície..

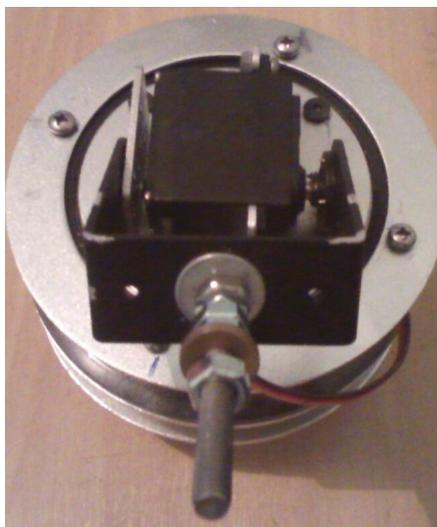


Figura 13 e 14 – Seguidor solar com parafuso e superfície circular

Também são necessárias adaptações na parte física em si, para proteger o sistema da chuva e intempéries, pois o mesmo deve ficar exposto ao ambiente externo para realizar as medidas do espectro de radiação solar.

11 - CONCLUSÃO

Um seguidor solar comercial é de alto custo o que dificulta a sua aquisição na maioria dos projetos de pesquisa científicas que não dispõem de muito recurso financei-

ro, por isso este projeto de Iniciação Científica foi de grande relevância para o estudo da variabilidade espectral da radiação solar direta, pois demonstrou ser possível desenvolver um seguidor solar de baixo custo com materiais e componentes disponíveis no mercado nacional.

Um protótipo do sistema foi montado em uma base giratória Pan Tilt de metal, que apresenta dois servos motores de forma que os ângulos fornecidos pelo programa para o Sol possam ser reproduzidos pelo sistema. Ele utiliza a plataforma Arduino que apresenta grandes vantagens em relação a outros sistemas de controle devido principalmente a facilidade de programação e a sua flexibilidade em termos de aplicação. Neste projeto o Arduino tem a função de controlar os servos motores, utilizando fórmulas que modelam a trajetória do Sol através de ângulos. E tendo como parâmetros de entrada a latitude, longitude, fuso horário e hora local. E também fornecer o horário em que o Sol nasce e se põem, além do programa ser facilmente alterado para atender outras necessidades.

Porém, algumas adaptações ainda são necessárias no programa e na parte física em si, para proteger o sistema da chuva e intempéries do meio ambiente, pois o mesmo deve ficar exposto ao ambiente externo para realizar as medidas do espectro solar.

11- AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao meu orientador Dr. Waldeir Amaral Vilela (LAS/CTE/INPE, Orientador) pela ajudar em minhas dúvidas, confiança e paciência.

12-REFERÊNCIAS

12.1-Teses e Artigos:

- **VILELA, W. A.** Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - SP, 2010.

- **HAAG, R.**, Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar Sobre o Território Brasileiro Através de Análise Multiinstrumental. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre, 1RS, 2012;
- **KREIDER, J. F; KREITH, F.** Solar energy handbook. New York: McGraw-Hill Book Company, 1981;
- **MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S.** Solar Energy scenarios in Brazil, part one: resource assessment. Energy Policy, v. 36, n. 8, p. 2843-2854, 2008;
- **CARRUTHERS D, ULOTH C AND ROY G. G.**, An Evaluation of Formulae for Solar Declination and the Equation of Time, Research Report No RR17, School of Architecture, the University of Western Australia, 1990;
- **SZOKOLAY, S. V.** Solar Geometry, PLEA NOTES #1, The University of Queensland Printery, Brisbane, 1996

12.2-Sites:

1. **Medidas de Tempo:** <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2016/tempo/tempo.htm> (acesso 14/05/2016)
2. **A Eclíptica:** http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat_long/cap5.asp (acesso 14/05/2016)
3. **Astros:** <http://astro.if.ufrgs.br/esf.htm> (acesso 15/05/2016)
4. **Arduino:** <http://arduino.cc> (acesso 15/05/2016)