



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Curso de Engenharia Ambiental



FERNANDO TONIAZZO

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR *OPEN LOOP* E UM BANCO
DE DADOS DE POSICIONAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO DE FRANCISCO
BELTRÃO – PARANÁ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Francisco Beltrão

2021

FERNANDO TONIAZZO

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR *OPEN LOOP* E UM BANCO
DE DADOS DE POSICIONAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO DE FRANCISCO
BELTRÃO – PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Bertoldo.

Francisco Beltrão

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão



Curso de Engenharia Ambiental

TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR OPEN LOOP E
UM BANCO DE DADOS DE POSICIONAMENTO SOLAR NO
MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PARANÁ**

por

FERNANDO TONIAZZO

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 18:20 horas, do dia 19 de maio de 2021, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Banca Avaliadora:

Prof. Dr. Guilherme Bertoldo
(Presidente da Banca)

Prof. Dr. Jonas Joacir Radtke
(Membro da Banca)

Prof. Dr. Marcelo Bortoli
(Membro da Banca)

Denise Andréia Szymczak
(Professora Responsável pelo TCC)

Wagner de Aguiar
(Coordenador do Curso de Engenharia Ambiental)

“O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

Dedico este trabalho aos estudantes inquietos na busca pelo conhecimento e que detém a curiosidade de expandir suas ideias além dos padrões convencionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Guilherme Bertoldo pela orientação, apoio e confiança no estudo. Também ao professor Dr. Jonas Joacir Radtke pelo apoio no desenvolvimento do projeto. A minha família pelo apoio e a minha namorada por toda atenção e força nos momentos difíceis. Por fim e não menos importante a todos os professores e colegas que proporcionaram e ainda irão proporcionar a difusão do conhecimento na área de engenharia ambiental.

“Quem nunca errou nunca experimentou
nada novo”. (Albert Einstein)

Toniazzo, Fernando. **DESENVOLVIMENTO DE UM SEGUIDOR SOLAR OPEN LOOP E UM BANCO DE DADOS DE POSICIONAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO**. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, Brasil, 2021.

RESUMO: O trabalho em questão teve por objetivos desenvolver um seguidor solar microcontrolado e gerar dados para auxiliar no posicionamento de coletores solares no município de Francisco Beltrão, Paraná. Os cálculos referentes à orientação dos coletores são baseados na metodologia de Duffie & Beckman (2006), a qual determina coordenadas angulares do posicionamento solar e do posicionamento de superfícies de captação solar. O posicionamento do seguidor solar foi auxiliado por um microcontrolador Arduino, o qual gerencia dois motores de passo responsáveis pela movimentação de dois eixos de rotação. A estrutura do seguidor solar foi constituída de material metálico para suportar o peso e acondicionar os motores responsáveis pela sua dinâmica. Os dados de posicionamento tiveram como referência o município de Francisco Beltrão (26,05S, 53,04W) e foram apresentados os ângulos de azimute e de inclinação de superfície coletora em função do tempo (das 6h às 18h). Os resultados para caracterização do posicionamento de coletores solares em Francisco Beltrão mostram que o valor médio anual de inclinação ao meio dia, aproxima-se do grau de inclinação sugerido na literatura para sistemas fixos que é igual ao grau de latitude local para cada região. Quanto ao modelo matemático, o mesmo apresentou valores de precisão satisfatórios, com diferença relativa média de 0,25% para azimute solar e 0,23% para altitude solar quando comparado com outros autores. O seguidor solar se mostrou preciso ao posicionamento em relação ao anteparo luminoso, o qual manteve a perpendicularidade em relação ao plano de instalação e o sombreamento circular manteve-se ao longo da trajetória solar.

Palavras-chave: Energia solar, rastreador solar, posicionamento de coletores solares.

Toniazzo, Fernando. **DEVELOPMENT OF AN OPEN LOOP SOLAR TRACKER AND A SOLAR POSITIONING DATABASE IN THE MUNICIPALITY OF FRANCISCO BELTRÃO**. 50f. Graduation Course in Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná. Francisco Beltrão, Brazil, 2021.

ABSTRACT: The work in question aimed to develop a microcontrolled solar tracker and generate data to assist in the positioning of solar collectors in the city of Francisco Beltrão, Paraná. The calculations referring to the orientation of the collectors are based on the methodology of Duffie & Beckman (2006), which determines angular coordinates of the solar positioning and the positioning of solar collector surfaces. The positioning of the solar tracker was aided by an Arduino microcontroller, which manages two stepper motors responsible for moving two axes of rotation. The structure of the solar tracker was made of metallic material to support the weight and condition the engines responsible for its dynamics. The positioning data was based on the municipality of Francisco Beltrão (26.05S, 53.04W) and the angles of azimuth and inclination of the collecting surface as a function of time (from 6 am to 6 pm) were presented. The results for the characterization of the positioning of solar collectors in Francisco Beltrão show that the average annual value of inclination at noon, approaches the degree of inclination suggested in the literature for fixed systems that is equal to the degree of local latitude for each region. As for the mathematical model, it presented satisfactory precision values with average relative differences of 0.25% for solar azimuth and 0.23% for solar altitude when compared with other authors. The solar tracker proved to be accurate when positioned in relation to the luminous bulkhead, which maintained the perpendicularity in relation to the installed plane and the circular shading was maintained throughout the solar trajectory.

Keywords: Solar energy, solar tracker, positioning of solar collectors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de sistema de rastreamento solar: fixo, inclinado com eixo simples e de dois eixos.	17
Figura 2 – Sistema de controle dos rastreadores solares.....	18
Figura 3 – Movimento de rotação e translação da Terra ao redor do Sol com destaque na inclinação do eixo N-S.....	21
Figura 4 – Representação da posição do Sol em relação ao plano horizontal com destaques nos ângulos de referência.....	23
Figura 5 – Orientação de uma superfície inclinada em relação a horizontal.....	24
Figura 6 – Placa Arduino.....	29
Figura 7 – Motor de passo (NEMA 17).	30
Figura 8 – Ângulos do azimute solar em função da altitude solar de janeiro a dezembro.....	32
Figura 9 – Variação do posicionamento solar no solstício de inverno entre as 7:00AM e 6:00 PM.	33
Figura 10 – Mudanças acentuadas nos valores azimutais das 10AM as 2PM no solstício de verão em Francisco Beltrão.....	33
Figura 11 – Ângulos azimutais (curva tracejada) e de Inclinação de superfície (barras verticais) coletora em função do tempo de janeiro a junho.....	35
Figura 12 – Ângulos azimutais (curva tracejada) e de Inclinação de superfície (barras verticais) em função do tempo de junho a dezembro.....	37
Figura 13 – Média anual de Ângulos de Inclinação de Superfície para três horários diários.....	39
Figura 14 – Vista em perspectiva do arco em “U”.....	40
Figura 15 – Vista frontal do arco em “U”.....	41
Figura 16 – Eixo vertical sustentado pelos mancais da estrutura em “U”.....	41
Figura 17 – Sistema de redução de coroa e pinhão.....	42
Figura 18 – Matriz de calibração do posicionamento solar.....	43
Figura 19 – Eixo horizontal (azimutal).....	43
Figura 20 – Eixo horizontal acoplado com redução e motor de passo.....	44
Figura 21 – Vista lateral direita com dispositivos eletrônicos acoplados.....	45
Figura 22 – PCI confeccionada para interligação dos componentes eletrônicos.	45

Figura 23 – Display com dados em tempo real.	46
Figura 24 – Rastreador solar Helius em operação.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da placa Arduino®.....	29
Tabela 2 – Comparação dos dados gerados e dados da HELIOTEC* para o mês de fevereiro (dia 32).....	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AM	Antes do meio dia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
cc	Corrente contínua
GMT	Greenwich mean time
East	Leste
N	Norte
Noon	Meio dia solar
S	<i>South</i> (Sul)
PM	Pós meio dia
PCI	Placa de circuito impresso
PV/T	Fotovoltaico e térmicos
W	<i>West</i> (Oeste)

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}$	Graus
C++	Linguagem de programação tipo C++
kW	Quilowatt
kWh.m ⁻²	Quilo Watt hora por metro quadrado
δ	Declinação solar
E	Equação do tempo
ω	Hora angular
α	Altitude solar
θ_z	Ângulo zenital
γ_s	Azimute solar
γ	Ângulo azimutal da superfície
β	Ângulo de inclinação da superfície
θ	Ângulo de incidência solar
n	Dia juliano
ST	<i>Solar time</i> (Hora solar)
st	<i>Standart time</i> (Hora padrão)
Lst	Meridiano padrão para o fuso horário local
Lloc	Longitude da localização em questão (graus oeste)
B	Variável adimensional que depende do dia do ano
Φ	Latitude
Hsn	Horário de Sol nascente
TD	Insolação diária

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Sistema de Rastreamento Solar.....	17
3.2 Radiação solar.....	19
3.3 Direção dos feixes de radiação.....	20
3.3.1 Ângulos da Geometria Solar.....	22
3.4 Microcontroladores.....	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Cálculo da geometria solar.....	26
4.2 Instrumentação e desenvolvimento do seguidor solar.....	29
4.3 Dados de posicionamento de coletores solares para Francisco Beltrão.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5.1 Modelo matemático (código C++) e geração de dados.....	31
5.2 Seguidor solar e validação do modelo matemático.....	31
5.3 Orientação de coletores solares.....	32
5.4 Funcionamento do rastreador solar HELIUS SOLAR TRACKER.....	39
5.4.1 Estrutura superior.....	40
5.4.2 Estrutura inferior.....	43
6. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial tem crescido anualmente. A dependência energética e o consumismo estão atrelados ao desenvolvimento da sociedade moderna. O aumento da densidade demográfica torna-se um parâmetro que influencia no aumento da demanda energética, uma vez que a mesma é instrumento indispensável na manutenção da qualidade de vida (ANEEL, 2008).

Neste contexto, a geração de energia torna-se um desafio cada vez mais difícil em países que detém uma matriz de energia baseada em fontes convencionais e pouco variadas.

Concomitantemente, o aumento do consumo de energia também propicia meios incentivadores de pesquisas de tecnologias alternativas de novas matrizes energéticas. Tais matrizes envolvem fontes renováveis e aplicações mais eficientes no esforço para redução da oferta de combustíveis não renováveis. Neste contexto, de acordo com Luiz (2013) a energia solar é uma das principais fontes de energia para o desenvolvimento sustentável.

A energia solar, fonte de energia limpa, possui um enorme potencial no território brasileiro, o qual apresenta média anual da radiação solar global, relativamente alta. Índices de irradiação solar global que incidem em qualquer região do território brasileiro ultrapassam os índices de incidência solar dos países da União Europeia, onde projetos que utilizam fontes de energia solar são fortemente executados com incentivos governamentais (PEREIRA, 2006).

Tendo em vista a importância das pesquisas na área de eficiência energética e aplicações de fontes alternativas de energia, considerando que no município de Francisco Beltrão não há estudos sobre o posicionamento de coletores solares, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um rastreador solar, bem como um banco de dados para o posicionamento de coletores fixos, ambos visando a otimização do aproveitamento energético.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um seguidor solar com um microcontrolador Arduino e desenvolver um banco de dados para posicionamento de coletores solares em Francisco Beltrão.

2.2 Objetivos específicos

- i) Elaborar um código em C++ (linguagem de programação) para implementar um modelo matemático de posicionamento solar;
- ii) Montar e testar um protótipo do seguidor solar para validar o modelo;
- iii) Tabular dados para o posicionamento de coletores solares no município de Francisco Beltrão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de Rastreamento Solar

Os sistemas de rastreamento solar são comumente chamados de seguidores solares, pois monitoram o posicionamento do Sol durante sua trajetória com certo grau de precisão. Os seguidores solares são usados na geração de energia elétrica (sistemas fotovoltaicos) e aquecimento de água (coletores solares), como também em sistemas integrados que atuam como aquecedores solares e módulos fotovoltaicos (PV/T), fornecendo calor a um fluido e ao mesmo tempo gerando energia elétrica. Os sistemas integrados atuam retirando e aproveitando o calor das células fotovoltaicas evitando a perda de eficiência na geração elétrica causada pelo aumento de temperatura no módulo PV (RUSTEMLI *et al.*, 2013). O mecanismo de rastreamento deve ser confiável e capaz de seguir a trajetória do sol (RUSTEMLI *et al.*, 2010). A Figura 1 exemplifica o estado de operação dos sistemas de rastreamento.

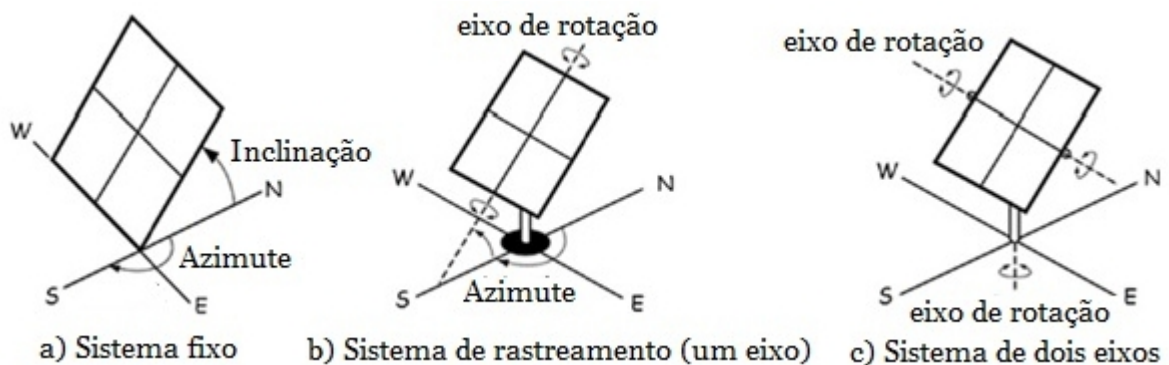


Figura 1 – Representação esquemática de sistema de rastreamento solar: fixo, inclinado com eixo simples e de dois eixos.

Fonte: SEDONA, 2014 (Adaptado pelo autor).

Na Figura 1a, o sistema fixo é orientado na horizontal (azimute) e vertical (altitude solar), e assim permanece. Por outro lado, há os sistemas de rastreamento solar automatizados, os quais podem ser classificados amplamente como de eixo simples (Figura 1b) e de dois eixos (Figura 1c). Os seguidores azimutais têm apenas um eixo de rotação (geralmente de leste a oeste) enquanto os seguidores de eixo duplo têm dois eixos de rotação, sendo um de referência a leste-oeste (azimutal) e outro norte-sul (variando a altitude solar).

Em relação ao sistema de controle, os seguidores solares podem ser categorizados como *closed loop* e *open loop* (Figura 2).

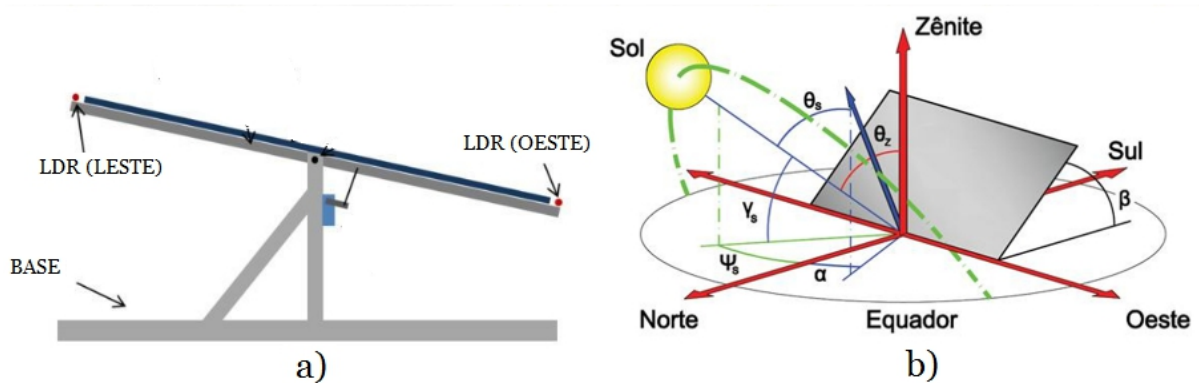


Figura 2 – Sistema de controle dos rastreadores solares.
Fonte: www.use2e.wordpress.com (Adaptado pelo autor).

Enquanto o *closed loop* (Figura 2a) usa fotosensores para orientação dos coletores solares, o *open loop* (Figura 2b) é baseado em cálculos matemáticos da trajetória solar. Contudo, os sistemas híbridos são compostos pelos sistemas *closed loop* e *open loop*, de modo que, a vantagem do sistema de rastreamento que utiliza controle *open loop* comparado com o *closed loop* é que, o mesmo não depende das condições climáticas e opera independentemente da nebulosidade onde o sistema *closed loop* geralmente falha (MOUSAZADEH *et al.*, 2009; RUSTEMLI *et al.*, 2013).

Segundo Sungur (2009), com um seguidor de eixo duplo pode-se obter um aumento de energia de 42,6% em sistemas fotovoltaicos com orientação solar comparado a sistemas com inclinação fixa. Todavia, segundo Ahmad *et al.* (2013), em um dia ensolarado e isento de nebulosidade o percentual pode chegar a 91,97% de ganho de energia comparado a sistemas fixos. Resultados mostram que, mesmo em dias nublados esse aumento pode chegar a 50% na geração de energia e ainda há estudos que mostram que mesmo em períodos chuvosos há um aumento de um índice de 90,42% (AHMAD *et al.*; 2013; KELLY & GIBSON, 2011).

Os sistemas de rastreamento apesar de custosos podem apresentar um ínfimo consumo de energia. Ahmad (2013) apresenta valores de consumo dos atuadores de $6,6 \cdot 10^{-2} \text{ Wh.m}^{-2}$ (5% da energia gerada), ou seja, tais motores de rastreamento operam por poucos períodos do dia, atuam apenas em função dos graus de rotações necessários para posicionamento. Segundo Mousazadeh *et al.* (2009), o consumo de energia por dispositivos de rastreamento resulta de 2-3% da

energia gerada, sendo que não é recomendado o uso de tais sistemas para pequenos painéis solares em função da alta perda de energia nos sistemas de posicionamento. Abdallah (2004) ressalta que o consumo de energia pelos motores de posicionamento é menor do que 2% da energia total gerada. Alves e Cagnon (2010) determinam um índice de consumo energético de 0,1% em relação a quantidade de energia gerada a mais pelo rastreamento solar do sistema, a qual varia em torno de 53%. O consumo dos motores de rastreamento pode variar de sistema para sistema, principalmente em função do peso a ser deslocado por cada atuador.

3.2 Radiação solar

A maioria das fontes de energia, tais como hidráulica, eólica, biomassa, combustíveis fósseis e energia dos oceanos são provenientes da energia solar (forma indireta). Quanto a utilização de forma direta como fonte de energia térmica, a energia solar pode ser empregada para o aquecimento de fluidos e ambientes tanto quanto para geração de potência mecânica ou elétrica. Ainda, pode ser convertida diretamente em energia elétrica pela característica de alguns materiais, dentre eles destacam-se o efeito termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL 2013).

Em relação a utilização da radiação solar térmica, o aproveitamento é feito por intermédio de coletores ou concentradores solares. Quanto ao primeiro, são mais utilizados para o aquecimento de fluidos em setores comerciais (hotéis, restaurantes, clubes etc.) e residenciais, ambos para o aquecimento de água. No meio rural, seu uso é empregado no aquecimento de água para banho e calefação (em áreas mais frias), lavagem e esterilização de pocilgas ou criadouros e secagem de grãos. Sobre os concentradores, sua aplicação é destinada a geração de vapor e secagem de grãos por atingir maiores temperaturas (ANEEL, 2013; ORTIZ, 2005).

Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2013), a conversão direta de energia solar em energia elétrica realizada pelos efeitos termoelétrico e fotovoltaico, ocorre pelo calor e luz solar (respectivamente) sobre determinados materiais, tais como os semicondutores. No efeito termoelétrico, há o surgimento de uma diferença de potencial provocada pela junção de dois metais em condições

específicas. No fotovoltaico, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica por meio da utilização de células solares. Na agricultura, os sistemas fotovoltaicos são aplicados na eletrificação rural para criação de animais, bombeamento e dessalinização de água e iluminação em locais distantes da rede elétrica convencional (ORTIZ, 2005).

No Brasil, a energia solar para o aquecimento de água é mais frequente nas regiões Sul e Sudeste, devido as características climáticas, enquanto a geração fotovoltaica tem maiores aplicações nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica (ANEEL, 2013).

3.3 Direção dos feixes de radiação

A radiação solar incidente na superfície terrestre depende de alguns fatores. Além das condições climáticas (nebulosidade, umidade relativa), a energia solar total incidente depende da posição solar ao longo do tempo e a latitude geográfica. Isto ocorre, devido a inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e ao movimento de translação que descreve a trajetória elíptica que a Terra percorre ao redor do Sol, como mostrado na Figura 3 (ANEEL, 2013).

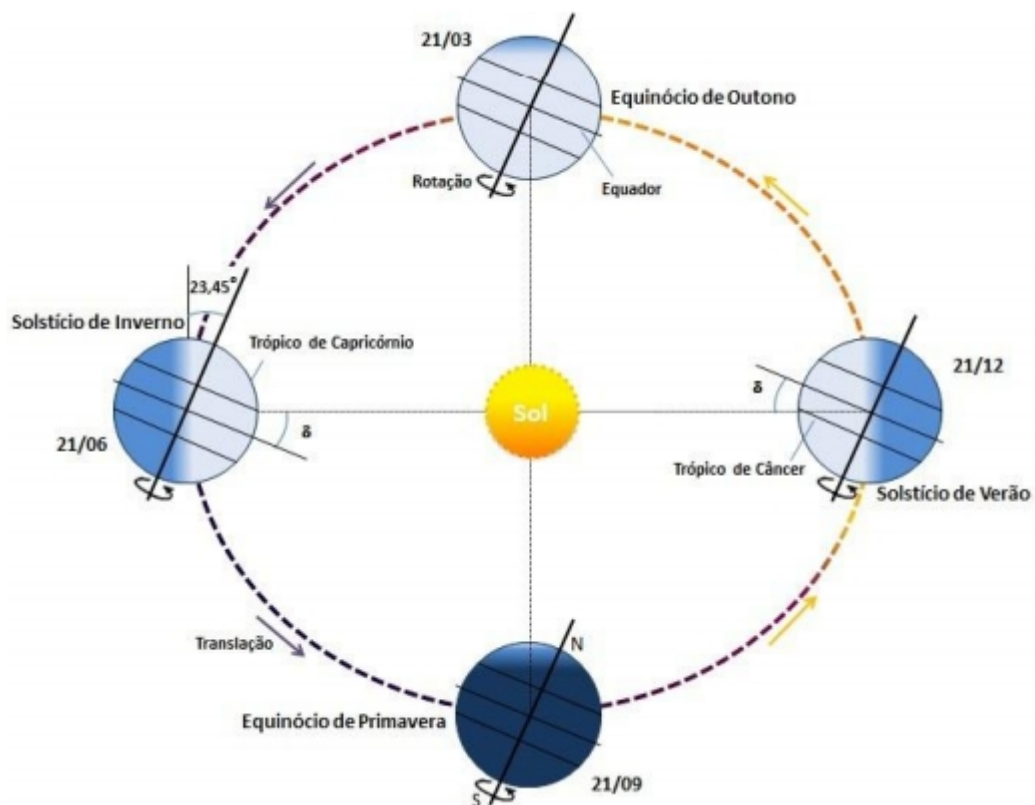


Figura 3 – Movimento de rotação e translação da Terra ao redor do Sol com destaque na inclinação do eixo N-S.
Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

Nota-se na Figura 3, que o ângulo de inclinação entre eixo da Terra em relação ao plano normal à elipse, é de aproximadamente $23,45^\circ$. Este ângulo é denominado como Declinação Solar (δ), e juntamente com o movimento de translação da Terra origina as estações do ano. De acordo com o movimento aparente do Sol (ao meio dia solar) ao longo do ano, percebe-se que o ângulo entre os raios solares e o plano do Equador varia de $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$ nos dias 21 de dezembro e 21 de junho, respectivamente. Tais ângulos são positivos ao Norte e negativos ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro e 21 de março os raios se alinham com o plano do Equador tornando o valor de declinação solar nulo ($\delta=0$).

Ainda, em relação a Figura 3, observa-se que a variação da duração dos dias ao longo do ano para determinada localidade depende da declinação solar, ou seja, em localidades no hemisfério Sul (solstício de verão) verifica-se dias mais longos e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre a duração dos dias é sempre igual e nas suas proximidades a variação é pequena (PINHO & GALDINO, 2014).

Outro parâmetro que é relacionado ao movimento de rotação da Terra é a Hora Solar (Solar Time), que é baseada no movimento angular aparente do Sol através do céu, de tal modo que o meio dia solar é o momento que o Sol cruza o meridiano do observador. Segundo Duffie & Beckman (2006), a hora solar é a hora ou tempo usado em todas as relações de ângulos solares e não deve ser confundida com a hora relógio local. Para a utilização da hora solar, são necessárias duas correções. A primeira é uma correção constante para a diferença na longitude entre o meridiano do observador (longitude) e o meridiano no qual se baseia na hora local padrão¹ (o Sol leva 4 minutos para atravessar 1° de longitude). A segunda correção é em relação a Equação do Tempo (E), a qual leva em conta a perturbação na taxa de rotação da Terra que afeta o tempo que o Sol atravessa o meridiano do observador.

Por fim, o Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω), cujo procedimento de cálculo será apresentado em breve, refere-se ao deslocamento angular solar Leste-Oeste do meridiano local devido a rotação da Terra em seu eixo de 15° por hora (PINHO & GALDINO, 2014).

Conhecendo os parâmetros como a declinação solar e a hora solar, pode-se estimar o posicionamento de coletores solares em função do movimento aparente do Sol ao longo do dia e do ano.

3.3.1 Ângulos da Geometria Solar

O movimento aparente do Sol em relação a superfície terrestre pode ser descrito através dos ângulos mostrados na Figura 4.

¹ Para encontrar o meridiano padrão local, multiplique a diferença do tempo entre a hora padrão local e o GMT (Greenwich Mean Time) por 15.

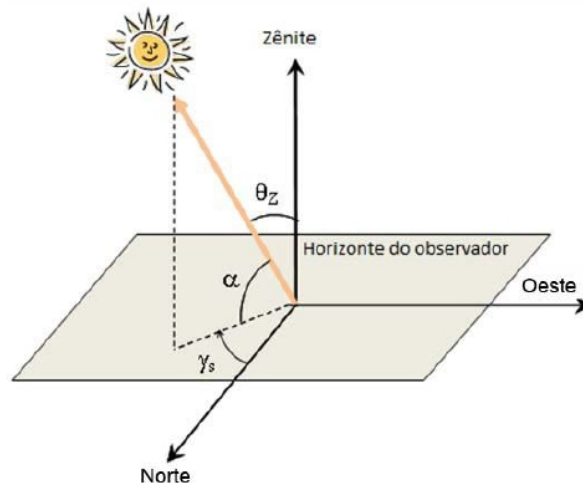


Figura 4 – Representação da posição do Sol em relação ao plano horizontal com destaques nos ângulos de referência.
Fonte: Pinho & Galdino, 2014.

Nota-se na Figura 4, os ângulos de Altitude Solar (α), Zenital (θ_z) e Azimute Solar (γ_s). Tais ângulos representam a trajetória solar considerando o movimento aparente do Sol em relação ao horizonte do observador.

De acordo com Duffie & Beckman (2006), o ângulo de altitude solar é definido como o ângulo entre a projeção horizontal e o raio solar incidente, o qual complementa o Ângulo Zenital ($\theta_z + \alpha = 90^\circ$).

O Ângulo Zenital, refere-se ao ângulo entre a vertical (Zênite) e o raio solar incidente, em outras palavras, representa a diferença angular entre o feixe de radiação numa superfície horizontal.

Quanto ao Azimute Solar ou Ângulo Azimutal do Sol, define-se como ângulo entre as projeções dos raios solares na horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). Neste valor angular, o Norte geográfico é tomado como referência a 0° (hemisfério Sul), caso contrário, o Sul é tomado como 0° (hemisfério Norte). Dessa forma, por convenção adota-se valores de ângulos de azimutes solares positivos quando a projeção se encontra à direita do Sul (a Leste) e negativos à esquerda, ou a Oeste ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$) (PINHO & GALDINO, 2014).

Além dos ângulos de orientação da posição solar, há ângulos que caracterizam a posição de uma superfície em relação ao plano horizontal, mostrados na Figura 5.

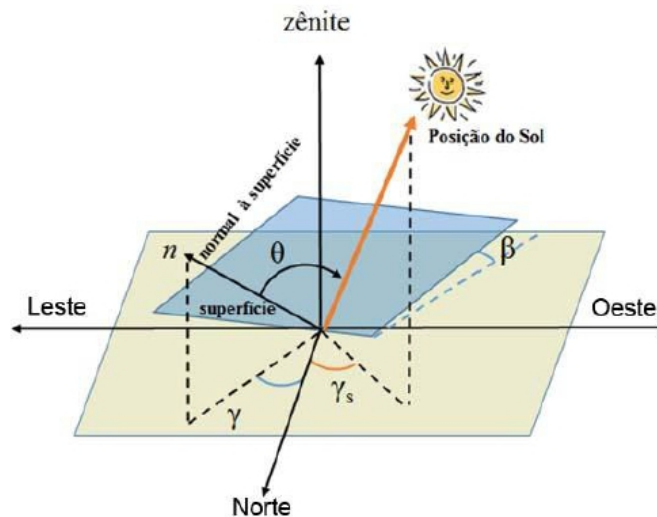


Figura 5 – Orientação de uma superfície inclinada em relação a horizontal.
Fonte: Pinho & Galdino, 2014.

De acordo com a Figura 5, os ângulos γ , β e θ são denominados Ângulo Azimutal da Superfície, Ângulo de Inclinação da Superfície e Ângulo de Incidência Solar, respectivamente. Segundo Pinho & Galdino (2014), o Ângulo Azimutal da Superfície refere-se ao ângulo entre a projeção normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul (obedece as mesmas convenções do azimute solar). Quanto ao ângulo de inclinação da superfície, compreende ao ângulo entre a superfície em questão e a horizontal ($0^\circ < \beta < 180^\circ$). Neste contexto, ângulos maiores que 90° indicam que a face frontal da superfície está voltada para baixo, favorecendo o sombreamento.

Conhecendo-se o ângulo de incidência pode-se orientar as superfícies de captação para o melhor aproveitamento da energia solar, de tal forma a manter uma perpendicularidade entre o ângulo dos raios solares e plano de inclinação das superfícies coletoras.

3.4 Microcontroladores

Segundo Penido e Trindade (2013), um microcontrolador pode ser caracterizado como um computador de um único *chip*, o qual contém um processador, memória, periféricos de entrada e saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, entre outros.

Os microcontroladores foram uma evolução natural dos circuitos digitais, em virtude dos mesmos apresentarem alta complexidade. Dessa forma, tornou-se mais simples, barato e compacto substituir a lógica das portas digitais por conjuntos de processadores e *softwares* (PENIDO E TRINDADE, 2013).

Atualmente, há vários tipos de microcontroladores no mercado. Entretanto, o microcontrolador Arduino vem se destacando por sua versatilidade, simplicidade e economia. Segundo McRoberts (2011), o Arduino é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Em outras palavras, o Arduino é um sistema que interage com seu ambiente por meio de hardware e software (plataforma embarcada).

Para se programar um Arduino, é necessário usar um software no qual se edita um código na linguagem de programação compreendida pelo microcontrolador, geralmente na linguagem C. Essa interface, permite que seja criado um conjunto de instruções passo a passo, onde o usuário descreve quais ações deseja que o microcontrolador realize (MCROBERTS, 2013).

Atualmente, há vários projetos utilizando microcontroladores. No que tange o uso de energia solar, alguns trabalhos foram desenvolvidos em relação ao controle de posicionamento de coletores solares (RIBEIRO *et al.*, 2012; TOMAZZONI *et al.*, 2014; DUARTE *et al.*, 2015). Tais trabalhos se resumem no desenvolvimento de seguidores solares, os quais apresentam um sistema de rastreamento solar baseado no uso de microcontroladores para geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Cálculo da geometria solar

A caracterização do posicionamento de coletores solares teve como base o município de Francisco Beltrão (latitude 26,05°S, longitude 53,04°W e altitude 650m), situado numa região de clima subtropical segundo a classificação de Koppen, possui verões quentes (>22°C), invernos amenos (> -3°C), insolação anual de 2334 horas e média anual de radiação solar de 2,30 kWh.m⁻² (IAPAR, 2013).

A metodologia para o cálculo do posicionamento de coletores solares foi baseada em Duffie & Beckman (2006). Tal metodologia se resume em equações astronômicas de geometria solar.

Dessa forma, o cálculo da declinação solar, que diz respeito ao ângulo de inclinação da Terra, usado para determinar o ângulo de incidência solar é dado pela Equação 1 (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\delta = 23,45^\circ \text{sen} \left(2\pi \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad [^\circ] \quad (1)$$

onde:

n = Número que designa o dia do ano, que varia de 1 (1 de janeiro) a 365 (31 de dezembro).

A Hora Solar, usada na maioria das equações da geometria solar é representado pela Equação 2:

$$ST - st = 4 \cdot (Lst - Lloc) + E, \quad [\text{min}] \quad (2)$$

sendo:

ST = Solar Time (min);

st = standard time (min);

Lst = meridiano padrão para o fuso horário local (°);

Lloc = longitude da localização em questão (graus oeste 0°<L<360°);

E = Equação do Tempo (min).

O parâmetro E (Equação 2), refere-se à equação do tempo, a qual pode ser calculado pela Equação 3. Tal parâmetro refere-se à diferença entre a hora relógio e a hora solar:

$$E = 229,2 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B - 0,032077 \cdot \sin B - 0,014615 \cdot \cos 2 \cdot B - 0,04089 \cdot \sin 2 \cdot B), \quad [\text{min}] \quad (3)$$

onde:

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad [\text{adimensional}] \quad (4)$$

Outros ângulos importantes na geometria solar são os ângulos de altitude solar, ângulo zenital e azimute solar (α , θ_z e γ_s). Esses ângulos descrevem a trajetória solar em termos geométricos, apresentando a localização do Sol num plano horizontal e vertical e podem ser calculados, respectivamente pelas Equações 5, 6, e 8 (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z. \quad [^\circ] \quad (5)$$

Logo:

$\theta_z = \hat{\text{Ângulo Zenital}}$.

O Ângulo Zenital, que determina o zênite solar é calculado pela Equação 6:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad [^\circ] \quad (6)$$

Sendo:

$\phi = \text{latitude local};$

$\delta = \text{declinação solar}.$

A Hora Angular (ω), que determina o tempo em termo angulares é essencial para o cálculo do azimute solar e pode ser calculada pela equação 7 (PINHO & GALDINO, 2014):

$$\omega = (HS - 12) \cdot 15^\circ \quad [^\circ] \quad (7)$$

A Equação 8 descreve o cálculo do azimute solar, o qual é o ângulo de referência no plano horizontal (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\gamma_s = \mp \left[\cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cdot \cos \phi} \right) \right]. \quad [^\circ] \quad (8)$$

O sinal positivo se aplica se ω for positivo e o sinal negativo se ω for negativo.

Para determinar a direção da incidência solar, usada para otimização do posicionamento de superfícies de captação, é necessário conhecer o Ângulo de Incidência (θ), o qual é a relação angular entre os raios solares e a normal à superfície de captação. O mesmo pode ser calculado pela Equação 9 (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad [^\circ] \quad (9)$$

Por fim, para determinar o início e fim do trajeto percorrido pelo Sol, é necessário conhecer o horário de Sol nascente (hsn) e horário de Sol poente (hsp). Os cálculos referentes a tais horários são apresentados nas Equações 10 e 11:

$$hsn = \frac{(12 - \frac{TD}{2})}{60} \quad [\text{min}] \quad (10)$$

$$hsp = \frac{(12 + \frac{TD}{2})}{60} \quad [\text{min}] \quad (11)$$

O termo TD diz respeito ao tempo de insolação diária, o qual é apresentado pela Equação 12.

$$TD = \left(\frac{2}{15} \right) \cdot \cos^{-1} (- \tan \phi \times \tan \delta) \times 60 \quad [\text{min}] \quad (12)$$

4.2 Instrumentação e desenvolvimento do seguidor solar

O código desenvolvido para programação do microcontrolador foi editado no software Codeblocks e a linguagem de programação em C++. A interface entre o código e o seguidor solar foi feita por intermédio de uma placa eletrônica microprocessada (Arduino), a qual teve a função de controlar a movimentação do seguidor solar via motores de passo. A Figura 6 apresenta o microcontrolador Arduino.

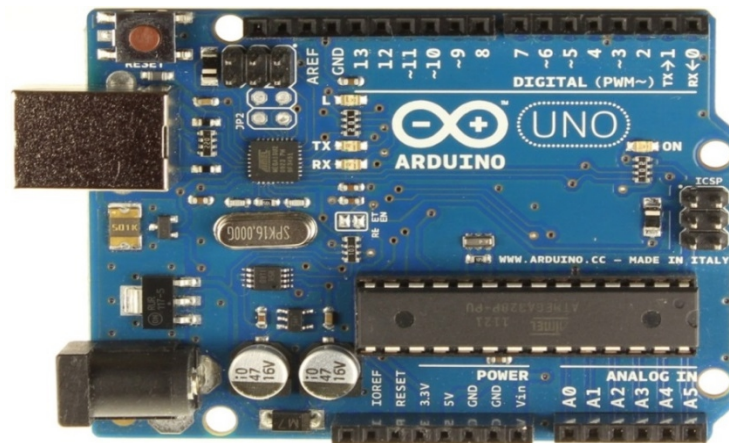


Figura 6 – Placa Arduino.
Fonte: www.arduino.cc.

As especificações da placa são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações da placa Arduino®

Microcontrolador	ATmega328
Tensão operacional	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos E/S digitais	14 (6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente CC por pino E/S	40 mA
Corrente CC para o pino 3,3V	50 mA
Flash Memory	32 KB (0,5 utilizadas pelo bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: www.arduino.cc.

O seguidor solar foi projetado no software Autocad e sua movimentação feita por intermédio de dois motores de passo (Figura 7).

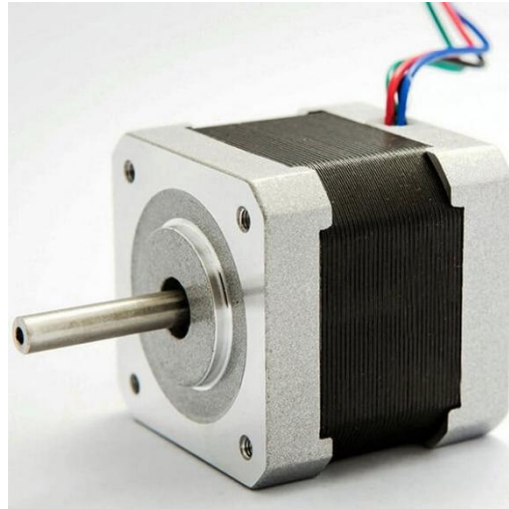


Figura 7 – Motor de passo (NEMA 17).
Fonte: www.adrobotica.com

O seguidor solar foi testado a campo no município de Francisco Beltrão e sua validação foi baseada na perpendicularidade entre o feixe de luz solar e o plano do coletor solar. Caso haja a referida perpendicularidade, o feixe de luz solar atravessa um orifício e incide sobre uma marcação em um anteparo. O desvio da luz com relação a esta marcação indicará o erro do posicionamento.

4.3 Dados de posicionamento de coletores solares para Francisco Beltrão

Os dados de posicionamento tiveram como referência o município de Francisco Beltrão (26,05S, 53,04W) e foram apresentados os ângulos de azimute e de inclinação de superfície coletora em função do tempo (das 6h às 18h). Os resultados para caracterização do posicionamento de coletores solares em Francisco Beltrão foram apresentados em gráficos para o primeiro dia de cada mês. Ainda, alguns dados foram apresentados sobre valores médios de inclinação de superfícies de captação para casos onde os coletores solares fixos são utilizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modelo matemático (código C++) e geração de dados

A partir do modelo matemático de Duffie & Beckman (2006), implementado em um código C++, foram calculados os ângulos necessários para o posicionamento do seguidor solar em função do dia do ano e da hora relógio. O código usa as coordenadas geográficas de Francisco Beltrão, mas pode ser facilmente ajustado para qualquer outra localidade.

Ainda com o código em C++, foi construído um banco de dados para posicionamento de coletores. Os dados são apresentados na forma de gráficos que apresentam os ângulos de altitude de inclinação das superfícies coletoras e do azimute solar em um período de 12 horas (das 6:00 as 18:00) com intervalos de uma hora. Devido à enorme quantidade de dados, os resultados foram apresentados na forma de gráficos para o primeiro dia de cada mês. O código fonte não será disponibilizado neste trabalho pois está passando por processo de pedido de patente.

5.2 Seguidor solar e validação do modelo matemático

O seguidor solar desenvolvido foi capaz de rastrear a trajetória solar de modo coerente com os resultados teóricos previstos no modelo matemático. Além disso, o seu funcionamento apresentou precisão conforme análise apresentada na Tabela 2 e teve sua operação realizada de forma automatizada sem qualquer intervenção manual.

Por fim, o erro de posicionamento do seguidor solar nos testes a campo foi feito a partir da orientação de feixes de luz do Sol em uma matriz previamente posicionada, de tal forma que os raios solares incidentes mantenham ao longo do tempo perpendicularidade preestabelecida na estrutura do sistema proposto.

5.3 Orientação de coletores solares

Os resultados apresentados a seguir mostram o/a posicionamento/orientação de coletores solares ao longo do dia (6:00 até as 18:00), para os doze meses do ano, considerando o primeiro dia de cada mês. Os parâmetros especificados foram o azimute solar, altitude solar e inclinação do coletor.

A Figura 8 mostra os valores angulares do azimute solar em função da altitude solar de janeiro a dezembro (considerando o dia 1º de cada mês). As curvas pontilhadas representam os meses de janeiro a junho (decréscante), enquanto as contínuas os meses de julho a dezembro (crescente). Os dados da Figura 8 foram obtidos através do modelo matemático proposto.

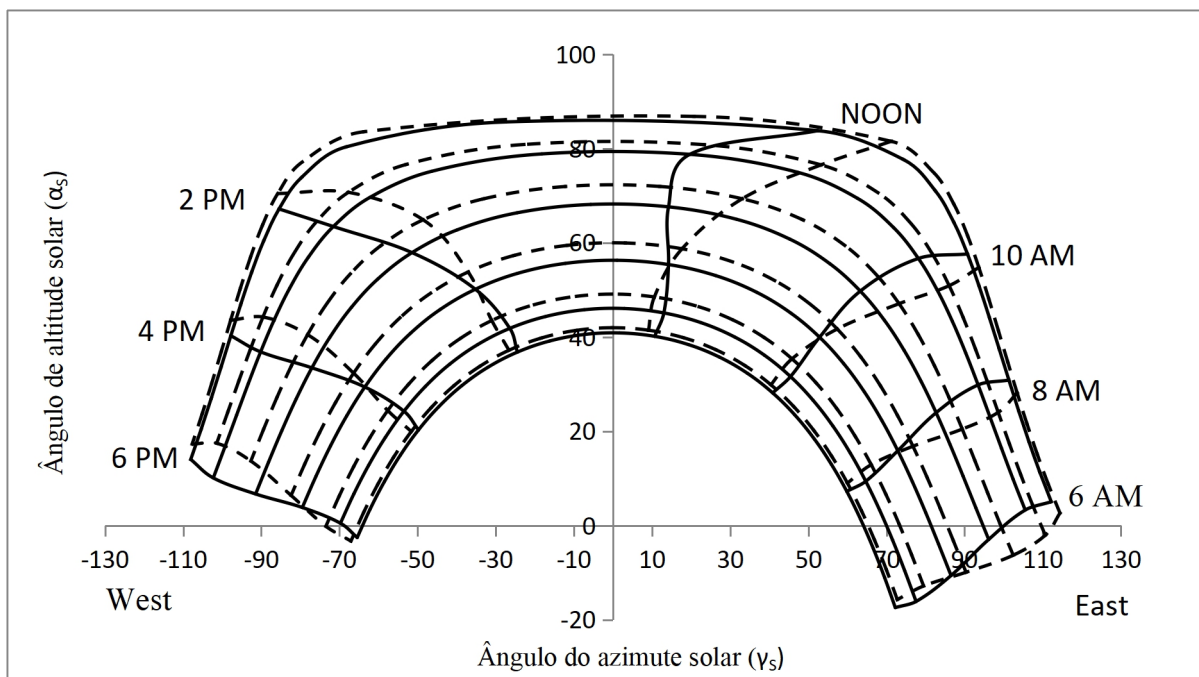


Figura 8 – Ângulos do azimute solar em função da altitude solar de janeiro a dezembro. (Linhas pontilhadas representam os meses de janeiro a junho, enquanto as linhas contínuas os meses de julho a dezembro).

Fonte: Acervo do Autor.

Na Figura 8, percebe-se que as curvas (altitude solar em função do azimute solar) tendem a ter um comportamento com menores taxas de variação de inclinação quando se aproximam do solstício de inverno (períodos mais frios). Além disso, é possível identificar os horários de nascer e pôr do Sol nos pontos nos quais as curvas tocam o eixo horizontal. Nos meses de inverno o nascer do Sol ocorre posteriormente as 6:00 AM e a ocorrência do pôr-do-sol por volta das 6:00 PM. O

comportamento da trajetória solar nos meses frios, se resume na variação dos valores de altitude solar acima de 0° (a Leste) ao limite inferior de 40° , variando os valores azimutais de Leste a Oeste e posteriormente no decréscimo de altitude solar após o ápice (meio dia solar) até 0° novamente no fim do dia. Fato que, resulta em dias com períodos menores de insolação, ou seja, há menos horas de exposição solar conforme mencionado por Pinho & Galdino (2014).

A Figura 9 exemplifica o período de insolação (de hora em hora para Francisco Beltrão) para o início do solstício de inverno representado pelo sombreado da trajetória solar incidida em um coletor com concentrador cônico orientado para o zênite ($\beta=0$).

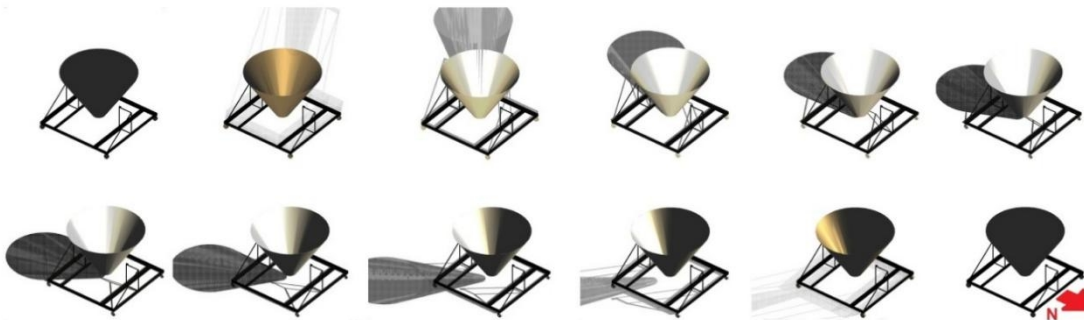


Figura 9 – Variação do posicionamento solar no solstício de inverno entre as 7:00 AM e 6:00 PM.

Fonte: Acervo do autor.

Nos meses que se aproximam ao solstício de verão, há uma variação brusca nos valores dos ângulos azimutais para horários entre 12:00 e 2:00 PM, principalmente nos meses de dezembro e janeiro (Figura 8). Notam-se, nesse período, variações de até aproximadamente 180° nos valores de azimuth solar. A Figura 10 exemplifica essa variação brusca nos valores azimutais para a localidade em estudo.



Figura 10 – Mudanças acentuadas nos valores azimutais das 10 AM as 2 PM no solstício de verão em Francisco Beltrão.

Fonte: Acervo do Autor.

Em altitudes menores, como em locais perto da linha do Equador (1°S), há variações consideráveis no ângulo azimutal (em torno de 180°) a ponto dos coletores solares ficarem ora orientados com seu plano de captação voltados para o polo Sul, ora voltados para o norte. Isto ocorre devido à latitude ser menor do que o ângulo de inclinação do eixo terrestre ($1^{\circ} < 23,45^{\circ}$). No período de 21 de dezembro na cidade de Belém (PA), o valor de $\gamma_s = 180^{\circ}$, ou seja, período em que a orientação dos coletores é voltada para o Sul (CAMPOS & ALCANTARA, 2012).

As variações no azimute solar também ocorrem em outros países tropicais. No hemisfério Norte, por exemplo, em pequenas latitudes observou-se para o mês de setembro uma variação ao meio dia de 30° em menos de 10 minutos (AHMAD *et al.*, 2013).

Ainda, em relação à Figura 8 percebe-se que o nascer do Sol ($\alpha \geq 0$) ocorre antes das 6:00 AM, seguido de maiores valores de altitude solar (ao meio dia solar) e tem-se o Sol poente em horários posteriores as 6:00 PM. Dessa forma, vale ressaltar que dias com maior número de horas de insolação são encontrados nesses meses. Neste contexto, é notável que nas curvas pontilhadas (decrecente), a relação de hora relógio (padrão) e altitude solar demonstram que o nascer do Sol ocorre cada vez mais tarde de janeiro a junho, por outro lado, o pôr-do-Sol ocorre cada vez mais cedo.

No entanto, o cenário muda considerando as curvas contínuas (crescente) que representam os meses de julho a dezembro, onde conclui-se de forma contrária a relação exemplificada anteriormente. Estas considerações reforçam que no hemisfério Sul no solstício de inverno tem-se dias com menor período de insolação e no solstício de verão dias com maior tempo de exposição solar conforme influência da declinação solar. Tais discussões em relação à Figura 8, não levam em consideração a mudança de horário, a qual no Brasil denomina-se “horário de Verão”.

A Figura 11 mostra o posicionamento de coletores solares no período de janeiro a junho (primeiro dia de cada mês), considerando os ângulos de inclinação e azimutes de superfície baseado na trajetória solar. As curvas pontilhadas mostram os ângulos azimutais, enquanto as barras verticais a inclinação da superfície coletora.

A partir do mês de junho, há mudanças na tendência de amplitude e variações dos valores angulares de inclinação conforme ilustrado na Figura 12.

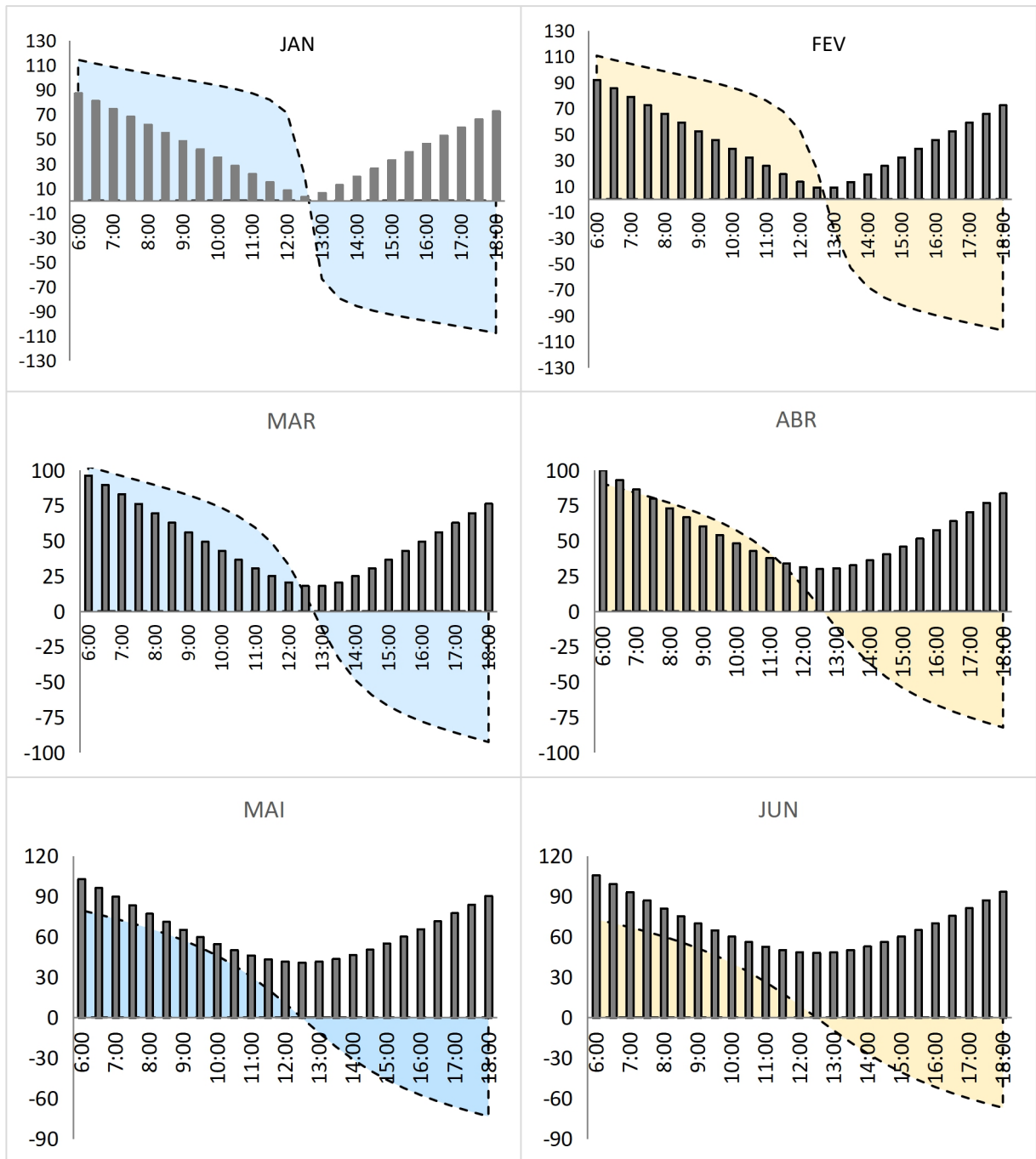


Figura 11 – Ângulos azimutais (curva tracejada) e de Inclinação de superfície (barras verticais) coletora em função do tempo de janeiro a junho.

Fonte: Acervo do Autor.

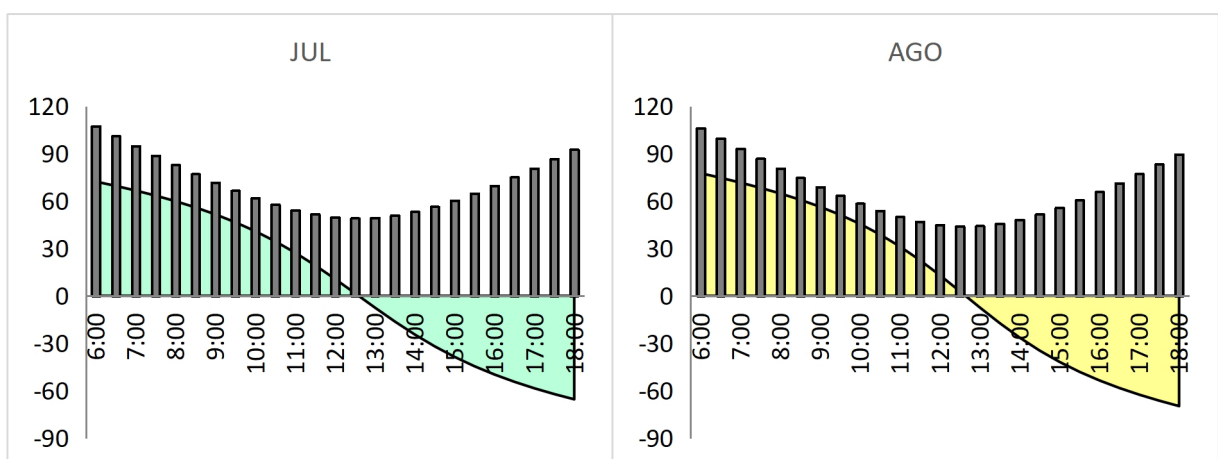
Em relação a Figura 11, as considerações quanto aos valores angulares dos azimutes são semelhantes ao da Figura 8 (período de janeiro a junho). Verifica-se maiores variações entre o valor máximo e mínimo do ângulo de inclinação dos coletores solares nos meses de janeiro a março comparado aos meses seguinte (até junho). Por exemplo, em janeiro, o menor valor de inclinação da placa coletora é de

8° (ao meio dia), enquanto no mês de junho o valor mínimo é de aproximadamente 50°.

Os valores do ângulo β ao meio dia para os meses de janeiro a julho são relativamente pequenos, apesar de serem os maiores apresentados. Ahmad *et al.* (2013), apresenta valores máximos de inclinação ao meio dia igual a 60° para pequenas altitudes no hemisfério Norte.

Nos meses de abril a junho a tendência de aumento da amplitude se propaga mantendo valores menores de inclinação ao meio dia, seguido das 6:00 PM e 6:00 AM. No entanto, há uma suavidade nas variações ao longo do dia para os ângulos de inclinação, a qual é mantida até o mês de junho. Percebe-se a partir do mês de março valores de $\beta > 90^\circ$, devido ao Sol neste período estar abaixo da linha do horizonte, em outras palavras, os valores de altitudes solares são negativos, ou seja, ainda não houve o nascer do Sol ou o mesmo já se pôs. Obviamente, não há a necessidade de orientação de posicionamento de superfícies de captação em períodos antecedentes ao nascer do Sol, tanto quanto posteriores ao pôr-do-Sol. De qualquer maneira, valores de inclinação como mencionados anteriormente ($>90^\circ$), podem servir de referência para identificação de início ou término de trajetória para orientação de posicionamento de superfícies coletoras.

A Figura 12 mostra os ângulos azimutais e de inclinação de superfície coletora em função do tempo de junho a dezembro.



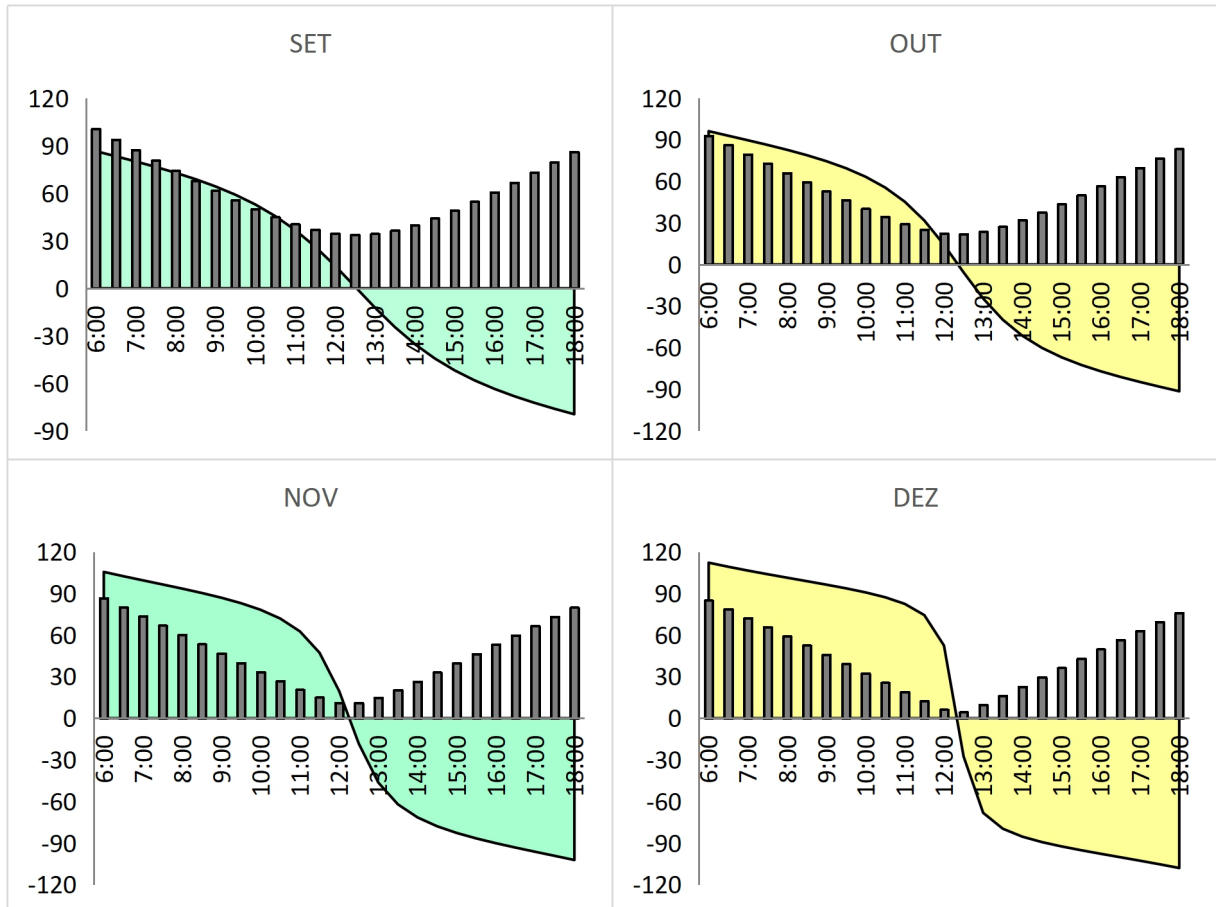


Figura 12 – Ângulos azimutais (curva tracejada) e de Inclinação de superfície (barras verticais) em função do tempo de junho a dezembro.

Fonte: Acervo do Autor.

Em relação a Figura 12, é notável que a distribuição dos valores de inclinação nos meses de julho a setembro não sofrem grandes variações, exceto pela queda homogênea da amplitude, a qual apresenta uma diminuição gradual semelhante para os horários mensurados. A partir de outubro até dezembro, percebe-se uma tendência para inclinações menores ao meio dia, com valores aproximados variando de 22 a 6°, e valores maiores nos extremos horários de 75 a 90°. Essa tendência de distribuição nos valores de inclinação é semelhante a apresentada nos meses de janeiro a março, porém, enquanto nos meses de out-dez há uma variação decrescente, para os meses de jan-mar a variação apresenta-se de forma crescente.

Apesar das variações cíclicas para os valores de azimute e altitude solar ao longo do ano, selecionou-se 32º dia do ano (dia 1 de fevereiro) para comparar os resultados obtido do modelo deste trabalho com dados da Heliotec. Tal comparação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação dos dados gerados e dados da HELIOTEC* para o mês de fevereiro (dia 32)

Hora local	Hora solar	AZIMUTE SOLAR		ALTURA SOLAR		%AZ ¹	%ALT ²
		A	R	A	R		
06:30	05:44	107,47	107,4	4,26	4,314	0,0654	1,2562
07:00	06:14	104,42	104,353	10,74	10,797	0,0642	0,5309
07:30	06:44	101,5	101,439	17,31	17,367	0,06	0,3319
08:00	07:14	98,66	98,591	23,94	24,005	0,0703	0,2718
08:30	07:44	95,8	95,734	30,63	30,693	0,0687	0,2046
09:00	08:14	92,86	92,781	37,35	37,414	0,0849	0,1718
09:30	08:44	89,69	89,611	44,09	44,153	0,088	0,1423
10:00	09:14	86,13	86,04	50,83	50,888	0,1047	0,114
10:30	09:44	81,87	81,752	57,53	57,59	0,1443	0,1044
11:00	10:14	76,28	76,135	64,15	64,207	0,1898	0,0883
11:30	10:44	68,03	67,823	70,57	70,623	0,3036	0,0749
12:00	11:14	53,59	53,258	76,48	76,522	0,6192	0,0543
12:30	11:44	23,83	23,292	80,82	80,815	2,2596	0,0059
13:00	12:14	22,41	-22,793	80,91	80,847	1,7108	0,0782
13:30	12:44	52,9	-53,017	76,67	76,586	0,2211	0,1096
14:00	13:14	67,67	-67,697	70,78	70,697	0,0405	0,1167
14:30	13:44	76,06	-76,056	64,37	64,285	0,0054	0,1324
15:00	14:14	81,7	-81,694	57,76	57,67	0,0069	0,1563
15:30	14:44	86	-85,994	51,05	50,968	0,0074	0,1602
16:00	15:14	89,58	-89,571	44,32	44,233	0,0098	0,1958
16:30	15:44	92,75	-92,745	37,58	37,495	0,0055	0,2273
17:00	16:14	95,71	-95,7	30,86	30,773	0,0108	0,2827
17:30	16:44	98,56	-98,557	24,17	24,085	0,0033	0,3531
18:00	17:14	101,41	-101,405	17,53	17,446	0,0051	0,4772
Média						0,2562	0,235

Fonte: Heliotec e acervo do Autor.

Notas:

*Dados amostrados para a localização (-26S; 56W).

A – Dados azimutais do autor.

R – Dados azimutais da referência.

(1) – Diferença percentual dos azimutes solares.

(2) – Diferença percentual das alturas solares.

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram que, há uma diferença percentual média de aproximadamente 0,25% e 0,23% nos valores de azimute e altitude solar, respectivamente.

A fim de ilustrar as variações de inclinação de superfície, a Figura 13 mostra valores de β para o horário de pico de radiação solar (considerado das 10:00 AM as 14:00 PM) ao longo do ano, assim como uma média anual para cada horário mencionado.

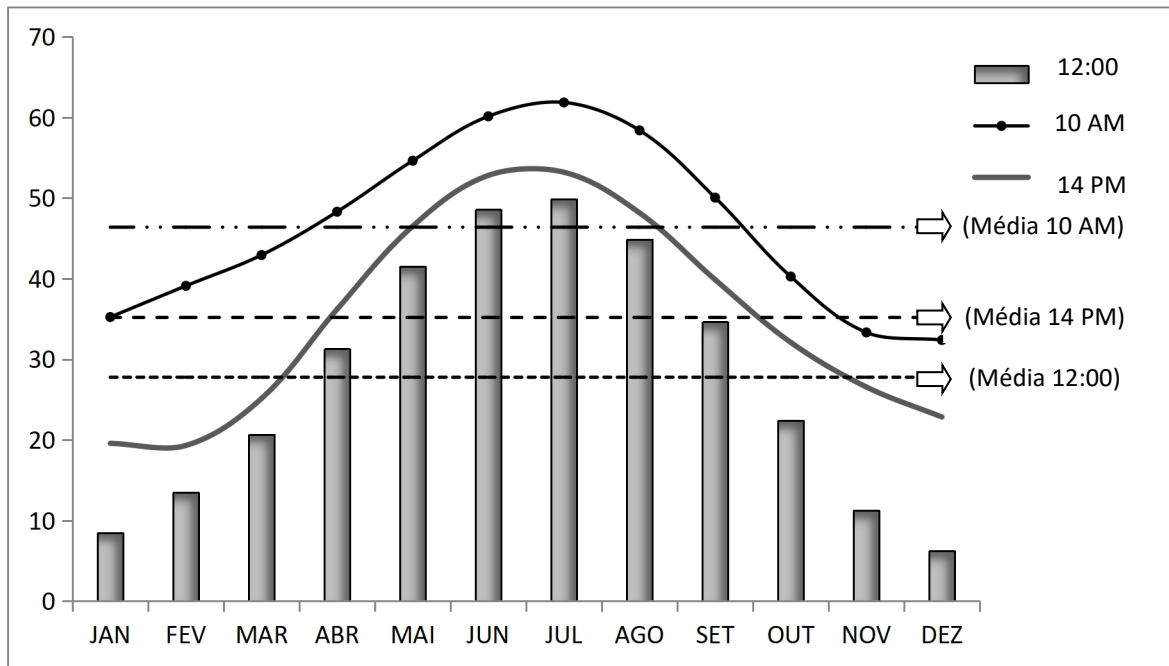


Figura 13 – Média anual de Ângulos de Inclinação de Superfície para três horários diários.

Fonte: Acervo do autor.

Nota-se na Figura 13, valores maiores de inclinação para os meses mais frios (jun-ago) as 10:00 AM, e menores para os meses mais quentes (jan e dez) ao meio dia. Tais considerações podem servir de orientações para sistemas fixos, onde estima-se uma faixa considerável para aproveitamento de energia solar sem rastreamento solar.

Por fim, o valor médio ao meio dia apresentado ($\sim 27^\circ$) é próximo ao estipulado para instalação de sistemas fixos, que estimam um grau de inclinação igual a latitude local, nesse caso (latitude de Francisco Beltrão) igual a 26° . No entanto, segundo Pinho & Galdino (2014), pequenas variações nas inclinações de módulos fotovoltaicos não resultam em grandes mudanças de energia gerada anualmente, sendo admissível uma inclinação de $\pm 10^\circ$.

5.4 Funcionamento do rastreador solar HELIUS SOLAR TRACKER

O posicionamento do rastreador solar é baseado na movimentação de dois eixos, os quais são caracterizados como: eixo horizontal (movimento oeste - leste) e eixo vertical (norte - sul). Tal movimentação é possibilitada pelo auxílio de um

microcontrolador Arduino, o qual realiza o gerenciamento de dois motores de passo responsáveis pela movimentação dos dois eixos de rotação.

O seguidor solar desenvolvido é capaz de rastrear a trajetória solar com base nos resultados teórico previstos em um modelo matemático. O seu funcionamento opera de forma automatizada sem qualquer intervenção manual. Além disso, a calibração do posicionamento é feita a partir da orientação de feixes de luz do Sol em uma matriz previamente alocada, de tal forma que os raios solares incidentes mantenham ao longo do tempo perpendicularidade preestabelecida na estrutura do sistema proposto. Segue informações das partes que compõem o rastreador, dividida em estrutura inferior e superior.

5.4.1 Estrutura superior

A estrutura superior do rastreador solar é composta por um arco de força em forma de “U” fabricado com perfis de alumínio, que sustenta o eixo de rotação vertical que serve de suporte a uma placa solar fotovoltaica usada para o teste do equipamento. O arco de força pode ser visualizado na Figura 14.

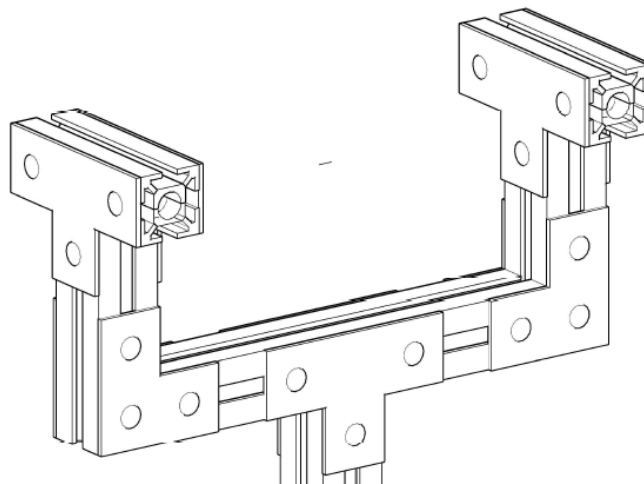


Figura 14 – Vista em perspectiva do arco em “U”.
Fonte: Acervo do Autor.

A mesma estrutura mostrada na Figura 14 pode ser vista sob a vista frontal na Figura 15.

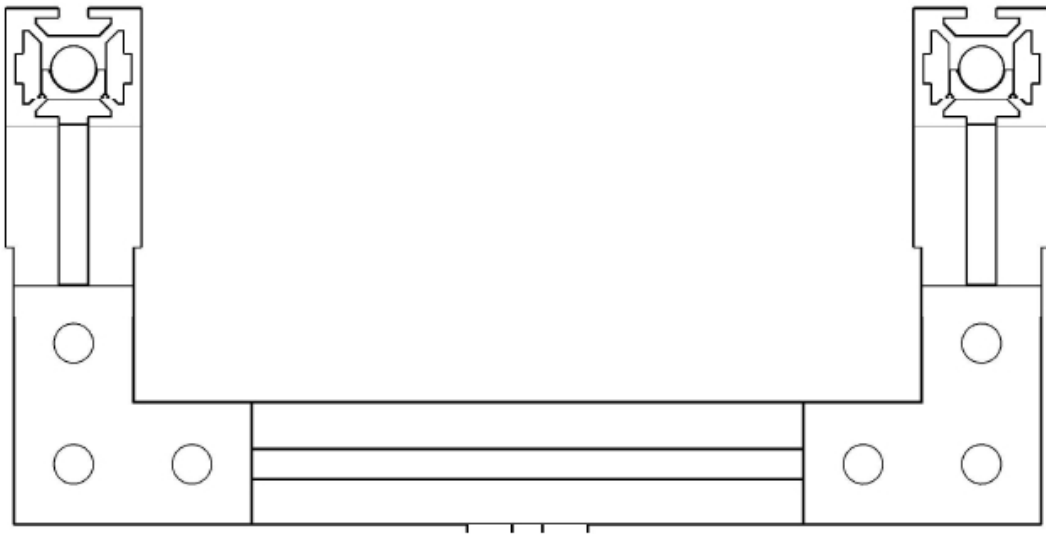


Figura 15 – Vista frontal do arco em “U”.
Fonte: Acervo do Autor.

Em cada extremidade do arco de força em “U” é acoplado um mancal que centraliza um eixo que é responsável pela movimentação vertical, conforme pode ser visto na Figura 16.



Figura 16 – Eixo vertical sustentado pelos mancais da estrutura em “U”.
Fonte: Acervo do Autor.

No eixo responsável pela rotação vertical, um sistema de redução é acoplado para garantir a precisão em baixa rotação do motor de passo usada na movimentação deste eixo. Este sistema de redução é um conjunto de coroa e pinhão, o qual estabelece a relação de transmissão entre o motor e o eixo numa escala de 1/20. O conjunto de redução pode ser visto na Figura 17.

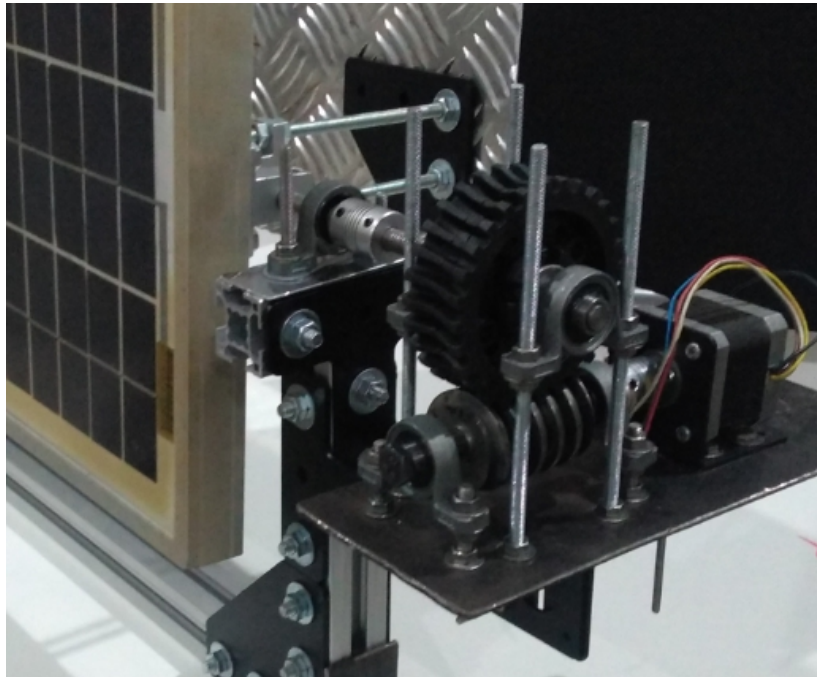


Figura 17 – Sistema de redução de coroa e pinhão.
Fonte: Acervo do Autor.

Ainda, na parte superior do arco estão instalados uma chave fim de curso (desligamento e regulagem) e um dispositivo de calibração para orientação do rastreador solar. O sistema de calibração posicionado na parte superior da placa fotovoltaica serve para conferência visual da efetividade do rastreamento solar, o qual se baseia no efeito retilíneo da luz e pode ser percebido de forma empírica no sombreamento de uma matriz previamente posicionada (Figura 18).

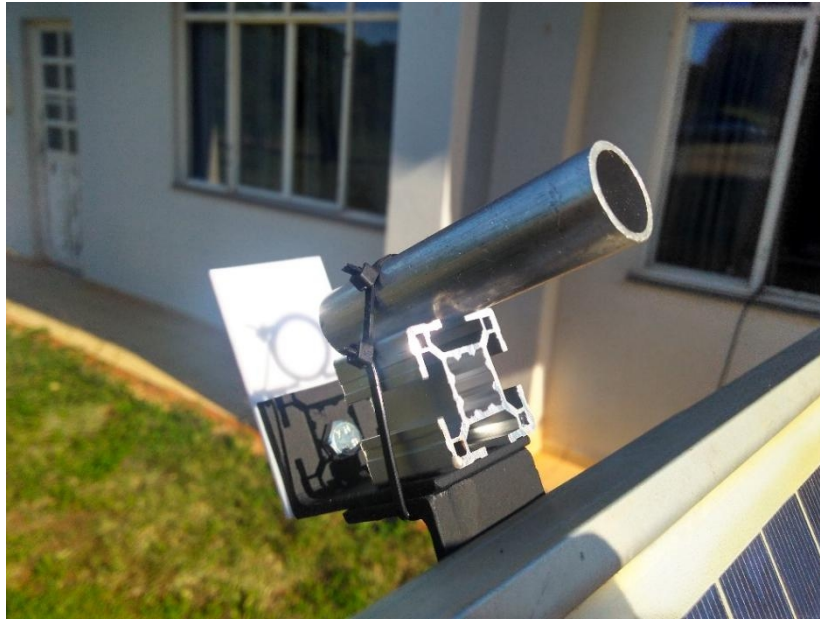


Figura 18 – Matriz de calibração do posicionamento solar.
Fonte: Acervo do Autor.

5.4.2 Estrutura inferior

A parte inferior do rastreador solar é composta por vigas e pilares construídos com perfis de alumínio formando uma estrutura retangular, a qual sustenta o eixo de rotação horizontal, motor de passo, chave fim de curso e o painel de componentes eletrônicos. O eixo principal do rastreador solar opera sob dois mancais de sustentação para realizar a rotação horizontal conforme pode ser visto na Figura 19.

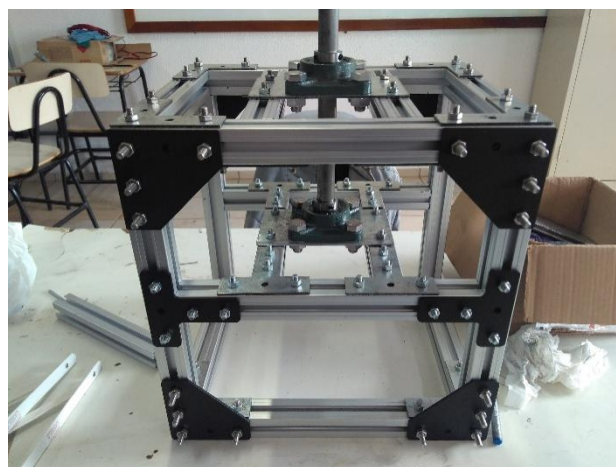


Figura 19 – Eixo horizontal (azimutal).
Fonte: Acervo do Autor.

O eixo horizontal, assim como o eixo responsável pela movimentação vertical, é dotado de um acoplamento com um redutor de velocidade movido por um motor de passo, conforme pode ser observado na Figura 20.

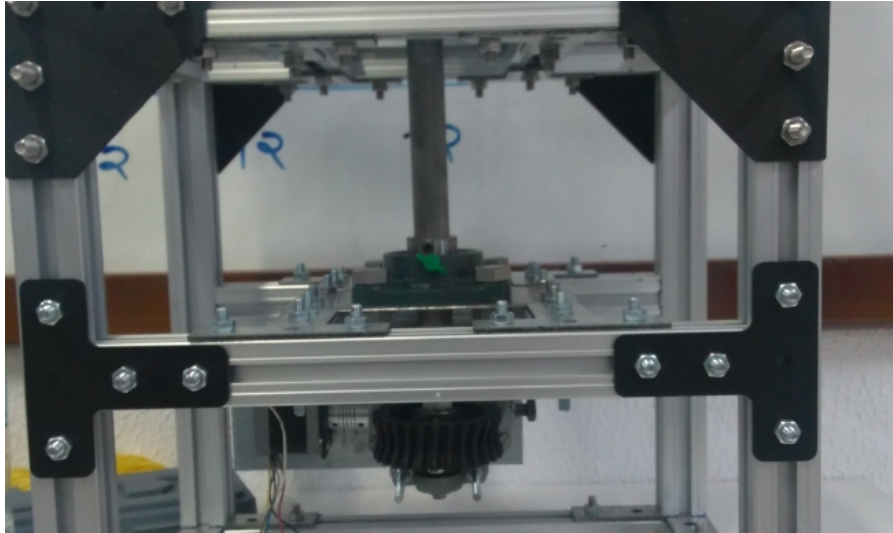


Figura 20 – Eixo horizontal acoplado com redução e motor de passo.
Fonte: Acervo do Autor.

Este eixo é auxiliado por uma chave fim de curso que protege contra movimentações contínuas em um único sentido a ponto de causar rompimento de condutores elétricos interconectados na parte inferior do sistema.

Na parte lateral direita encontra-se uma placa de acrílico transparente, a qual acondiciona os componentes eletrônicos responsáveis pelo gerenciamento e acionamento dos motores de passo, tais como: interruptor liga/desliga, fusível de proteção, fonte cc e microcontrolador (Figura 21).

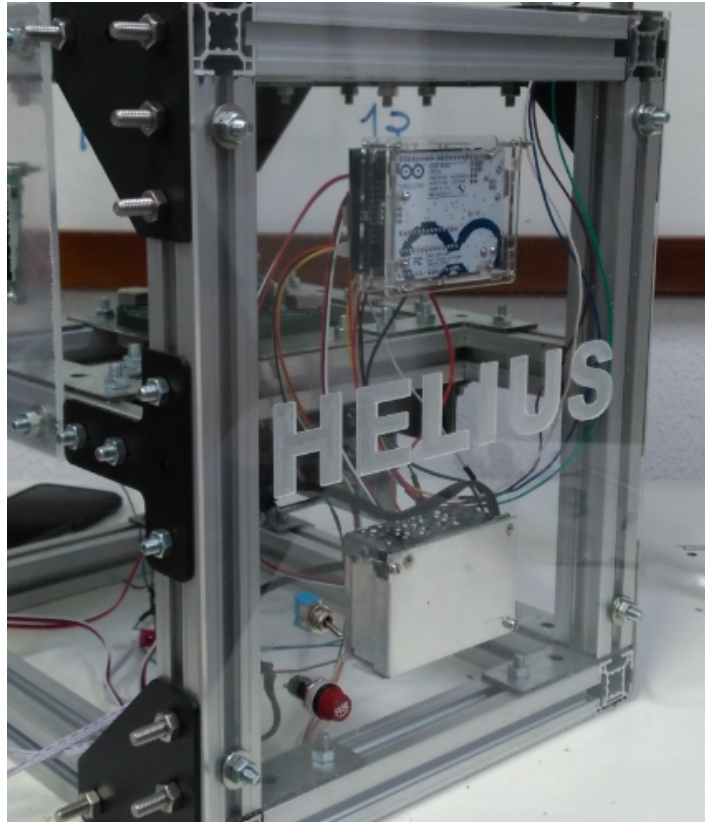


Figura 21 - Vista lateral direita com dispositivos eletrônicos acoplados.
Fonte: Acervo do Autor.

Para gerenciamento dos motores de passo, foi necessária a construção de uma PCI (placa de circuito impresso) para facilitar a interconexão e acondicionamento de alguns componentes eletrônicos (Figura 22).

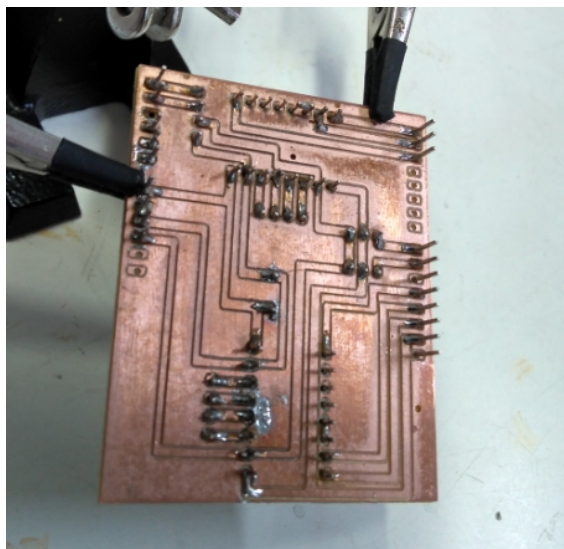


Figura 22 – PCI confeccionada para interligação dos componentes eletrônicos.
Fonte: Acervo do Autor.

Na parte frontal da estrutura inferior, foi instalado um display que auxilia na leitura dos dados atualizados em relação aos valores de posicionamento solar e data/hora, conforme pode ser visto na Figura 23.

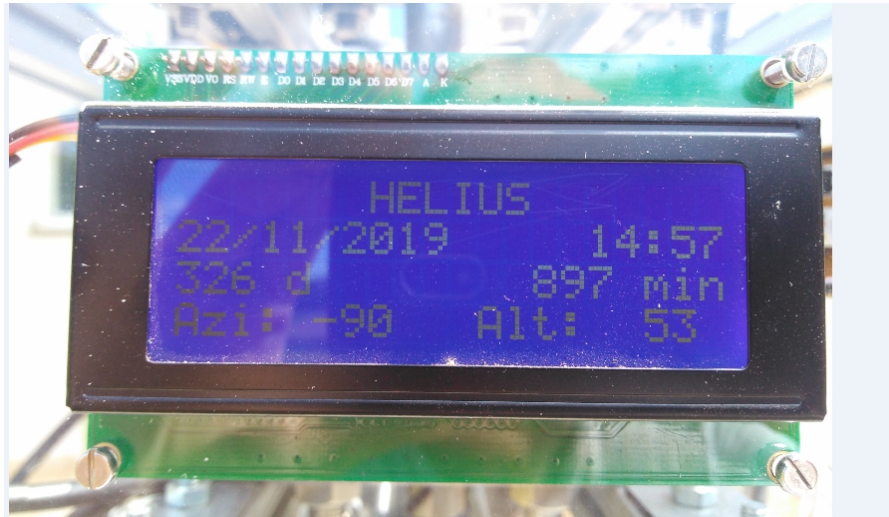


Figura 23 – Display com dados em tempo real.
Fonte: Acervo do Autor.

A Figura 24 apresenta o rastreador solar em operação.



Figura 24 – Rastreador solar Helius em operação.
Fonte: Acervo do Autor.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se neste trabalho que o modelo teórico confirmou variações cíclicas do ângulo de inclinação de superfícies coletoras (para o município de Francisco Beltrão), demonstrando menores valores de inclinação para os meses de verão (mínimo de 8°) e maiores valores para os meses de inverno (mínimo de 40°) para os horários com maior índice de radiação solar (meio dia solar). Todavia, em relação a trajetória solar, há uma tendência de inclinações menores próximo ao meio dia para todos os meses do ano em função da altitude solar. O valor médio anual de inclinação ao meio dia aproxima-se do valor de inclinação sugerido na literatura para sistemas fixos, o qual é igual ao valor de latitude local para cada região. Ainda sobre o modelo matemático, o mesmo apresentou valores percentuais relativo de 0,25% para azimute solar e 0,23% para altitude solar em comparação com outro banco de dados.

O código desenvolvido foi capaz de posicionar o protótipo rastreador solar nomeado como Helius Solar Tracker para a localidade de Francisco Beltrão. Para demais localidades, deve-se apenas informar a nova posição geográfica contendo latitude e longitude, destacando que não foi efetuado medições em outras localidade, pois não fazia parte do objetivo deste trabalho.

Quanto ao protótipo construído, o rastreador solar se mostrou preciso no posicionamento de uma placa solar coletora, pois o anteparo manteve seu plano perpendicular em relação aos raios solares incidentes para todo período de insolação. A confirmação do posicionamento se deu em virtude do sombreamento circular do dispositivo de calibração luminoso.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia solar**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf). Acesso em 05 de Jul. 2013.

_____, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Consumo de energia**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf. Acesso em 20 de Jun. 2018.

ABDALLAH, S. **The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics**. Energy Conversion and Management 2004;45:1671–9.

AHMAD, S.; SHAFIE, S.; AB KADIR, M. Z. A.; AHMAD, N. S. **On the effectiveness of time and date-based sun positioning solar collector in tropical climate: A case study in Northern Peninsular Malaysia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013; 28: 635-642.

ALVES, A. F.; CAGNON, J. A. **Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. Revista Energia na Agricultura, Botucatu, 2010. 25(2): 1-19.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. **Cálculo da direção de incidência dos raios solares na cidade de Belém através do software Matlab**. Anais do 10º Seminário Anual de Iniciação Científica da UFRA, 2012.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar: Princípios e Aplicações**, CEPEL, 2006, 26 p.

DUARTE, D. M. M.; SILVA, F. E. M.; NETO, J. A. N. **Sistema seguidor solar microcontrolado**. Revista Principia, nº 27, dezembro de 2015.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2006. p. 324-329.

EUROPEAN DATABASE FOR DAYLIGHT AND SOLAR RADIATION. Disponível em: <http://www.satel-light.com/core.htm>. Acesso em dez de 2013.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. 94 p. v.4: Série sustentabilidade.

HELIOTEC – Equipamentos didáticos. **Simuladores da Trajetória Aparente do Sol**. Disponível em: < <http://www.heliodon.com.br/>>. Acesso em: nov. de 2014.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. **Médias históricas de temperatura do ar em estações do IAPAR**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>>. Acesso em abr. de 2013.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. San Diego: Elsevier, 2009. p. 53-54.

KELLY, N. A.; GIBSON, T. I. **Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days**. *Solar Energy*, 2001; 85(1): 111-25.

LUIZ, A. M. **Energia solar e preservação do meio ambiente**. São Paulo: LF editorial, 2013. 255 p.

MCRBERTS, M. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec Editora, 2011.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBLI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13(8):1800–18.

ORTIZ, L. S. (Coord.) **Energias renováveis sustentáveis: uso e gestão participativa no meio rural**. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra, 2005. 68 p.

PENIDO, E. C. C.; TRINDADE, R. S. **Microcontroladores**. Ouro Preto: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Rede e-tec Brasil, 2013.

PEREIRA, E. B, et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL, 2014. 530 p.

RIBEIRO, S. C.; PRADO, P. P. L.; GONÇALVES, J. B. **Projeto e desenvolvimento de um rastreador solar para painéis fotovoltaicos**. IX SEGET, 2012.

RUSTEMLI, S.; DINCER, F.; UNAL, E.; KARAASLAN, M.; SABAH, C. **The analysis on sun tracking and cooling systems for fotovoltaic panels**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 22: 598-603.

RUSTEMLI, S.; DINCADAM, F.; DEMIRTAS, M. **Performance comparison of the sun tracking system and fixed system in the application of heating and lighting**. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2010;35(2B):171–83.

SEDONA. **Types of mounting-systems**. Disponível em: [/http://sedonasolartechnology.com/types-of-mounting-systems/S](http://sedonasolartechnology.com/types-of-mounting-systems/S). Acesso em: dez de 2014.

SUNGUR, C. **Multi-axes sun-tracking system with PLC control for fotovoltaic panels in Turkey**. *Renewable Energy*, 2006; 34(4): 1119-25.

TOMAZZONI, L. F. B.; HAYAKAWA, R. A.; SCARTAZZIN, L. S. **Desenvolvimento do seguidor solar aplicado em placas fotovoltaicas**. 4º SEI: IFSC, 2014.

WALISIEWICZ, M. **Energia alternativa:** solar, eólica, hidrelétrica e de biocombustíveis. São Paulo: Publifolha, 2008. 72 p.