



Instituto Politécnico  
de Castelo Branco  
Escola Superior  
de Tecnologia

# Solar Tracking System design based on Astronomical Equations

**Marco Benjamim Mendes**

Orientador

Prof. Adjunto Luís P. C. Neto, PhD

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, no âmbito da unidade curricular de Projeto Final do 3º ano do curso de licenciatura em Engenharia das Energias Renováveis, para cumprimento dos requisitos obrigatórios de avaliação.

Julho 2023



## Composição do júri

Presidente do Júri:

Paula Cristina Alves Pereira

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Arguente:

José António da Costa Salvado

Professor Auxiliar, Universidade da Beira Interior

Orientador:

Luís Paulo Coelho Neto

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco



## **Agradecimentos**

Ao professor Luís Neto pela sua orientação, dedicação e partilha de conhecimentos durante a realização deste projeto.

À minha esposa, filhos, pais, irmãos e restantes familiares, pelo carinho e encorajamento que demonstraram durante estes três anos de estudo.

Aos meus amigos mais próximos que demonstram ser um pilar que fortaleceu esta caminhada escolar.

A todos, muito obrigado.



## **Resumo**

O principal objetivo deste projeto foi o de desenvolver um protótipo de seguimento solar tendo por base as equações astronómicas que descrevem o movimento aparente do Sol.

O sistema é constituído por dois eixos independentes que permitem manter, em cada instante e com toda a exatidão, um painel solar fotovoltaico perpendicular ao Sol, independentemente das condições atmosféricas.

Ambos os eixos são acionados por motores de passo e o controlo dos motores é feito através de um microprocessador Arduino que calcula a posição do sol a partir de equações astronómicas, ficando a cargo a orientação de um dos eixos o Azimute Solar e outro eixo a Altura solar.

Todo o sistema funciona de modo automático, apenas sendo necessário que, da primeira vez, se introduzam os valores das coordenadas geográficas e da hora local.

## **Palavras-chave**

Seguidor Solar de dois eixos, Equações Astronómicas, Motores de Passo, Arduino



## **Abstract**

The main objective of this project was to develop a solar tracking prototype based on the astronomical equations that describe the Sun's apparent motion.

The system consists of two independent axes that allow maintaining, at every instant and with all accuracy, a photovoltaic solar panel perpendicular to the Sun, regardless of atmospheric conditions.

Both axes are activated by stepper motors and the control of the motors is done through an Arduino microprocessor that calculates the position of the sun through astronomical equations, one axis being the Solar Azimuth and the other axis the Solar Height.

The whole system works automatically, being only necessary to enter the values of the geographic coordinates and local time for the first time.

## **Keywords**

Dual Axis Solar Tracker, Astronomical Equations, Stepper Motors, Arduino



## Índice geral

1. Introdução.....	3
1.1. Introdução ao projeto .....	3
1.2. Contexto e motivação .....	3
1.3. Estrutura do Relatório .....	4
2. Conceitos básicos de geometria solar .....	9
2.1. O sol e o seu contributo para a humanidade.....	9
2.2. Distância Terra-Sol.....	9
2.3. Equinócios e Solstícios.....	10
2.4. Parâmetros da geometria solar .....	11
2.4.1. Número-dia .....	11
2.4.2. Ângulo-dia .....	11
2.4.3. Declinação Solar .....	12
2.4.4. Trajetória do sol ao longo do ano .....	13
2.4.5. Hora Local.....	14
2.4.6. Tempo Solar Verdadeiro .....	14
2.4.7. Ângulo Horário .....	15
2.4.8. Equação do tempo .....	16
2.4.9. Altura Solar .....	16
2.4.10. Zénite Solar .....	17
2.4.11. Azimute Solar .....	18
2.4.12. Latitude.....	18
2.4.13. Longitude.....	19
2.4.14. Hora de Verão .....	19
2.4.15. Nascer e pôr-do-sol.....	20
2.4.16. Duração do dia .....	21
2.5. Conclusão .....	21
3. Seguidores Solares.....	25
3.1. O que é um seguidor solar.....	25
3.2. Vantagens (e inconvenientes) de um seguidor solar .....	25
3.3. Tipos de seguidores solares.....	26

3.3.1. Seguidores solares ativos.....	26
3.3.2. Seguidores solares Passivos.....	28
3.4. Métodos para controlar seguidores solares.....	29
3.4.1. Seguimento sem sensores.....	29
3.4.2. Seguimento com sensores.....	29
3.4.3. Seguimento com visão artificial.....	30
3.5. Em conclusão .....	30
4. Protótipo de seguidor solar .....	35
4.1. Objetivo .....	35
4.2. Estrutura.....	36
4.3. Motores de passo.....	40
4.4. Sensores de fim de curso .....	42
4.5. Arduino.....	43
4.6. <i>Software</i> Desenvolvido.....	47
4.7. Testes preliminares.....	54
5. Conclusão .....	59
5.1. Breve resumo do trabalho realizado .....	59
5.2. Apreciação do trabalho desenvolvido .....	59
5.3. Dificuldades e Limitações.....	60
5.4. Melhorias a fazer .....	60
Referências bibliográficas .....	63

## Índice de Figuras

Figura 1: Movimento anual da terra em torno do sol. ....	10
Figura 2: Esquema da variação da Declinação Solar ao longo do ano. ....	13
Figura 3: Trajetórias Solares .....	13
Figura 4: Mapa de fusos horários. ....	14
Figura 5: Ângulo horário. ....	16
Figura 6: Representação dos ângulos do Azimute, Zénite e a Altura Solar. ....	18
Figura 7: Latitude e Longitude. ....	19
Figura 8: Hora de Verão em Portugal e no Mundo. ....	20
Figura 9: Eficiência de rastreamento para diferentes ângulos de incidência. ....	25
Figura 10: Esquema comparativo entre um sistema solar fotovoltaico fixo e um sistema solar fotovoltaico com seguidor solar. ....	26
Figura 11: Seguidor de eixo horizontal. ....	27
Figura 12: Seguidor solar de eixo vertical. ....	27
Figura 13: Seguidor solar de dois eixos. ....	28
Figura 14: Seguidor solar passivo. ....	29
Figura 15: Sensor foto resistente. ....	30
Figura 16: Funcionamento do Gimbal. ....	36
Figura 17: Exemplo de peças obtidas por quinagem. ....	37
Figura 18: Exemplo de uma ligação por soldadura a Alumínio. ....	37
Figura 19: Base (ou pé) da estrutura (esquema inicial e fotografia final) ....	38
Figura 20: Estrutura principal (esquema inicial e fotografia final) ....	38
Figura 21: Exemplo de um suporte de fixação do painel solar fotovoltaico ....	39
Figura 22: Veio Central .....	39
Figura 23: Acoplamento do veio central (esquema inicial e fotografia final). ....	40
Figura 24: Motores de Passo. ....	40
Figura 25: Esquema elétrico de motores de passo. ....	41
Figura 26: Fotografia de um dos motores de passo utilizados neste projeto. ....	42
Figura 27: Sensor fim de curso. ....	42
Figura 28: Localização dos dois sensores de fim de curso. ....	43
Figura 29: Modelos de placas Arduino .....	43
Figura 30: Placa Arduino Uno R3. ....	46

Figura 31: Vista superior do RTC .....	46
Figura 32: Vista inferior do RTC .....	46
Figura 33: Esquema TIP120 .....	47
Figura 34: Esquema de prototipagem completo.....	47
Figura 35: Diagrama conceptual do sistema implementado .....	48
Figura 36: Fluxograma de Funcionamento. ....	49
Figura 37: Diagrama de estado do sistema implementado.....	49
Figura 38: Diagrama de Caso de Uso do sistema.....	50
Figura 39: Cálculo do acumulado .....	51
Figura 40: Amostragem do dia 31 de julho de 2023.....	55
Figura 41: Protótipo Final.....	56

## Nomenclatura

$E_0$	[km]	Fator de Correção da Excentricidade da Órbita da Terra
$E_t$	[minutos]	Equação do Tempo
$L_{Local}$	[graus]	Longitude local
$L_{Ref^a}$	[graus]	Longitude de referência
$r_0$	[km]	Distância média Sol-Terra (1 UA = 149 597 890 $\pm$ 500 km)
dn	[-]	Número-dia
HL	[hh:mm:ss]	Hora Local (local hour)
TSV	[hh:mm:ss]	Tempo solar verdadeiro (true solar value)
UA	[km]	Unidade Astronómica
$r$	[km]	Distância Sol-Terra num determinado dia do ano

## Símbolos gregos

$\theta_z$	[graus]	Ângulo de Zénite solar
$\eta_T$	[%]	Eficiência de rastreamento percentual
$\varpi_{sr}$	[graus]	Ângulo horário de Nascer do Sol
$\varpi_{ss}$	[graus]	Ângulo horário de Pôr do Sol
$\Gamma$	[graus]	Ângulo-dia
$\alpha$	[graus]	Altura Solar
$\delta$	[graus]	Declinação Solar
$\theta$	[graus]	Ângulo de incidência
$\psi$	[graus]	Azimuth Solar
$\phi$	[graus]	Latitude do local
$\varpi$	[graus]	Ângulo Horário

## Subscritos

$sr$	---	<i>Sunrise (nascer do Sol)</i>
$ss$	---	<i>Sunset (pôr dos Sol)</i>

