



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Conceção de um protótipo de Helióstato

Daniel Alexandre Silva Moreira

(aluno nº 20230294)

Orientador

Luís P. C. Neto, Prof. Adjunto, PhD

Trabalho de Projeto Final apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis, realizado sob a orientação científica do Professor Adjunto Doutor Luís Paulo Coelho Neto do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Setembro 2026

Composição do júri

Presidente do júri

Professora Doutora, Paula Cristina Alves Pereira (Arguente)

Vogais

Professor Doutor, José Nunes (Arguente)

Professor Adjunto, Escola Superior Agrária de Castelo Branco

Professor Doutor Luís Paulo Coelho Neto (Orientador)

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio, compreensão e incentivos constantes ao longo do meu percurso académico. A sua presença e apoio foram fundamentais para ultrapassar os momentos mais exigentes desta caminhada.

Aos meus amigos e colegas pelos momentos partilhados, pela motivação e pelo apoio demonstrado ao longo desta etapa, contribuindo para tornar este percurso muito mais especial.

Dedico este trabalho também a todos os professores em particular, ao meu professor orientador, Luís Neto, que contribuíram para a minha formação académica e pessoal.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e contributo de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Luís Neto, pela proposta do projeto, pela orientação prestada ao longo do seu desenvolvimento, pela disponibilidade demonstrada e pelos conhecimentos transmitidos, que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Agradeço igualmente a todos os docentes do curso de Engenharia das Energias Renováveis, pelos conhecimentos e competências transmitidos ao longo da minha formação académica, os quais contribuíram significativamente para a realização deste projeto.

Resumo

Este projeto consistiu no desenvolvimento de um sistema de seguimento solar do tipo helióstato, realizado por Daniel Alexandre Silva Moreira sob a orientação do Professor Luís P. C. Neto, como requisito para a obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis na Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

O objetivo principal foi conceber e construir um protótipo funcional capaz de orientar de forma automática um espelho, de modo a refletir continuamente a radiação solar incidente para um alvo fixo. Para tal, o sistema calcula a posição do Sol recorrendo a equações astronómicas (considerando parâmetros como a declinação solar, a equação do tempo, o ângulo horário, a altura solar e o azimute solar) e aplica a Lei da Reflexão para determinar o vetor normal do espelho.

A estrutura mecânica de dois eixos (rotação horizontal Este-Oeste e inclinação vertical) foi inspirada nos sistemas de câmaras de segurança PTZ. Face a limitações técnicas e ferramentas em falta para o fabrico da estrutura inicialmente planeada em alumínio, optou-se pela reutilização de peças de um tambor de impressora (veios de aço, rolamentos de baixo atrito, rodas dentadas e suportes metálicos), assegurando um funcionamento robusto e sem folgas.

A componente eletrónica é coordenada pelo microcontrolador Arduino Uno. O movimento é acionado por dois motores de passo bipolares JOY-IT NEMA17-04 controlados por drivers DRV8825 com configuração de *microstepping* a 1/16, o que garante uma precisão angular de 0,1125°.

O protótipo integra ainda:

- Um módulo RTC para a data e hora em tempo real;
- Um módulo GPS Velleman WPI 430 para recolher as coordenadas de latitude e longitude;
- Sensores fim-de-curso (*microswitches*) para a calibração inicial e determinação da posição de referência (*homing*);
- Um display LCD 20x4 para monitorização das variáveis;
- Um *buzzer* para emitir um sinal acústico a cada atualização de dados;
- Uma fonte ATX de computador com condensadores eletrolíticos de 100µF adicionados para mitigar ruídos e oscilações elétricas induzidas pelos motores.

O algoritmo foi desenvolvido em C++ no Arduino IDE. Este recalcula e ajusta a posição do espelho a cada 30 segundos. Por motivos de segurança mecânica, se a altura solar for igual ou inferior a 15°, o movimento é bloqueado e o sistema executa automaticamente a rotina de *homing*.

Os testes e validação global ocorreram na Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco. Ensaios progressivos confirmaram a consistência dos cálculos matemáticos. No teste global de 7 de julho de 2026, às 11:13:39 (com elevação

solar de $55,58^\circ$ e azimute de $-70,47^\circ$), os motores posicionaram fisicamente o espelho na elevação de $32,34^\circ$ e azimute de $-24,13^\circ$, iluminando com sucesso um alvo fixo posicionado exatamente a Sul.

As principais dificuldades prenderam-se com a precisão dos furos na estrutura mecânica, o corte do espelho e o alinhamento manual com o eixo Norte-Sul magnético na instalação.

Como melhorias futuras, o autor propõe a integração de uma bússola eletrónica, comunicação sem fios para monitorização remota e controlo manual por joystick.

Palavras-chave

Helióstato, Seguimento solar, Arduino Uno, Motores de passo, Equações astronómicas.

Abstract

This project involved the development of a heliostat-type solar tracking system, carried out by Daniel Alexandre Silva Moreira under the supervision of Professor Luís P. C. Neto, as a requirement for the award of a bachelor's degree in Renewable Energy Engineering at the School of Technology of the Castelo Branco Polytechnic Institute.

The main objective was to design and build a functional prototype capable of automatically orienting a mirror to continuously reflect incident solar radiation onto a fixed target. To this end, the system calculates the position of the Sun using astronomical equations (considering parameters such as solar declination, the equation of time, the hour angle, solar altitude and solar azimuth) and applies the Law of Reflection to determine the normal vector of the mirror.

The two-axis mechanical structure (horizontal east-west rotation and vertical tilt) was inspired by PTZ security camera systems. Given technical limitations and a lack of tools required to manufacture the initially planned aluminium structure, it was decided to reuse parts from a printer drum (steel shafts, low-friction bearings, gear wheels and metal brackets), ensuring robust, play-free operation.

The electronics are controlled by an Arduino Uno microcontroller. Movement is driven by two JOY-IT NEMA17-04 bipolar stepper motors controlled by DRV8825 drivers configured for 1/16 microstepping, which ensures an angular accuracy of 0.1125° .

The prototype also incorporates:

- An RTC module for real-time date and time;
- A Velleman WPI 430 GPS module to collect latitude and longitude coordinates;
- Limit switches (microswitches) for initial calibration and determining the reference position (homing);
- A 20x4 LCD display for monitoring variables;
- A buzzer to emit an audible signal with each data update;
- An ATX computer power supply with 100 μ F electrolytic capacitors added to mitigate noise and electrical oscillations induced by the motors.

The algorithm was developed in C++ using the Arduino IDE. It recalculates and adjusts the mirror's position every 30 seconds. For mechanical safety reasons, if the solar elevation angle is 15° or less, movement is blocked and the system automatically performs the homing routine.

The electronic component is controlled by an Arduino Uno microcontroller. The movement is driven by two JOY-IT NEMA17-04 bipolar stepper motors controlled by DRV8825 drivers set to a 1/16 microstepping configuration.

Testing and overall validation took place at the Castelo Branco School of Technology. Progressive tests confirmed the consistency of the mathematical calculations. In the comprehensive test on 7 July 2026, at 11:13:39 (with a solar elevation of 55.58° and an azimuth of -70.47°), the motors physically positioned the mirror at an elevation of 32.34° and an azimuth of -24.13° , successfully illuminating a fixed target positioned exactly due south.

The main difficulties related to the precision of the holes in the mechanical structure, the cutting of the mirror and the manual alignment with the magnetic north-south axis during installation.

As future improvements, the author proposes the integration of an electronic compass, wireless communication for remote monitoring and manual control via a joystick.

Keywords

Heliostat, Solar Tracking, Arduino Uno, Stepper Motors, Astronomical Equations.

Índice geral

1. Introdução (motivação e objetivos)	1
1.1. Introdução ao projeto	1
1.2. Contexto e motivação	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodologia	3
1.5. Estrutura do relatório	3
2. Trajetória e coordenadas solares	4
2.1. Posição do Sol	4
Equação do tempo	7
Ângulo Horário	8
Altura Solar	9
Azimute Solar	10
Nascer e Pôr do Sol	11
Ângulo de incidência de um raio solar numa superfície plana	12
Ângulo de incidência de um raio solar numa superfície inclinada e com orientação	13
Orientação do Helióstato	14
3. Helióstatos	19
3.1. O que é e para que serve um Helióstato	19
3.2. Tipos de Helióstato	19
Espelho plano	19
Linear Fresnel	20
Cilíndrico Parabólico	20
Disco Parabólico	21
3.3. Aplicações práticas de Helióstatos	21
3.4. A eficiência em função da posição do Sol e da posição do helióstato em relação ao recetor	25
4. Conceção e construção de protótipo de helióstato	27
4.1. Estrutura	28
4.2. Componentes eletrónicos	31
Motor de passo	31
Driver controlador de passos	33
Microcontrolador Arduino Uno	35
Módulo RTC	36

Módulo GPS.....	37
Sensores Fim-de-Curso	38
Display LCD	38
Buzzer.....	39
Alimentação	40
Ligação dos componentes	42
Programa	43
5. Teste do helióstato	45
5.1. Testes do cálculo da posição solar e orientação do espelho	45
5.2. Testes global do helióstato	47
6. Conclusões.....	52
6.1. Conclusões	52
6.2. Apreciação	52
6.3. 8Dificuldades e limitações.....	53
6.4. Melhorias futuras	53
6.5. Conclusão final	53
Bibliografia.....	55

Índice de figuras

Figura 1: Distância Sol-Terra.....	5
Figura 2: Gráfico sinusoidal da declinação.....	6
Figura 3: Gráfico sinusoidal da declinação.....	6
Figura 4: Gráfico da Equação do tempo.....	7
Figura 5: Representação da altura solar e do ângulo de zênite.	9
Figura 6: Representação do Azimute Solar.....	10
Figura 7: Ângulo de Nascer e Pôr do Sol.	11
Figura 8: Orientação de uma superfície plana.....	13
Figura 9: Orientação de uma superfície.	14
Figura 10: Esquema dos ângulos de um helióstato, ilustrando o rastreamento solar e a reflexão para a torre central.	15
Figura 11: Ângulo de incidência do raio solar.....	19
Figura 12: Helióstato de espelho plano.	20
Figura 13: Helióstato do tipo Linear <i>Fresnel</i>	20
Figura 14: Helióstato do tipo Cilíndrico Parabólico.....	21
Figura 15: Helióstato do tipo Disco Parabólico.....	21
Figura 16: Iluminação natural de ambientes.....	22
Figura 17: Geração de Energia Solar Concentrada.	22
Figura 18: Cozinha solar.	23
Figura 19: Imagem de telescópio com e sem mecanismo do helióstato.	23
Figura 20: Sistema de otimização de painéis solares com helióstato.	23
Figura 21: Viganella.	24
Figura 22: Rjukan.	24
Figura 23: Efeito cosseno de dois helióstatos em direções opostas à torre.	26
Figura 24: Eficiência anual de um campo de helióstatos com torre central em relação ao efeito cosseno.	26
Figura 25: Câmaras de segurança do tipo PTZ.....	28
Figura 26: Esquema 3D da estrutura pretendida para o helióstato.	29
Figura 27: Base do Helióstato.	30
Figura 28: Mastro do Helióstato.	30
Figura 29: Suporte do espelho.	31
Figura 30: Esquema elétrico dos motores de passo.	31
Figura 31: Ponte H.	32
Figura 32: Motor de passo JOY-IT NEMA17-04.....	33
Figura 33: Esquema do DRV8825.....	34
Figura 34: Pinos do Arduino.....	35
Figura 35: Módulo RTC.	37
Figura 36: <i>Valleman</i> WPI 430.....	37
Figura 37: <i>Microswitch</i> industrial com alavanca.	38
Figura 38: Display 20 x 4.....	39
Figura 39: Buzzer passivo e ativo.	40
Figura 40: Fonte de alimentação ATX de computador.....	40
Figura 41: Condensador eletrolítico.	41

Figura 42: Ruído eletrónico num display LCD.	41
Figura 43: Esquema de ligações.	42
Figura 44: Ensaio do dia 30 de junho 2026, às 11:07:55*.	46
Figura 45: Ensaio do dia 2 de julho 2026, às 14:49:19*.	47
Figura 46: Ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.	49
Figura 47: Elevação do espelho, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*. ...	49
Figura 48: Azimute do espelho, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.	50
Figura 49: Alvo iluminado pelo helióstato, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.	50
Figura 50: Protótipo finalizado.	51

Índice de símbolos

α	Altura Solar ($^{\circ}$)
h_T	Altura do alvo na torre (m)
h_H	Altura do centro espelho (m)
α_T	Ângulo da elevação do alvo na torre ($^{\circ}$)
γ	Ângulo de Azimute da Superfície ($^{\circ}$)
ψ_T	Ângulo de azimute da torre ($^{\circ}$)
γ_H	Ângulo de azimute do helióstato ($^{\circ}$)
ψ	Ângulo de Azimute Solar ($^{\circ}$)
α_H	Ângulo de elevação do helióstato ($^{\circ}$)
θ	Ângulo de Incidência ($^{\circ}$)
θ_i	Ângulo de incidência ($^{\circ}$)
θ_r	Ângulo de reflexão ($^{\circ}$)
θ_z	Ângulo de Zénite Solar ($^{\circ}$)
Γ	Ângulo do dia ($^{\circ}$)
ω	Ângulo Horário ($^{\circ}$)
ω_{sr}	Ângulo Horário do Nascer do Sol ($^{\circ}$)
ω_{ss}	Ângulo Horário do Pôr do Sol ($^{\circ}$)
B	Conversão do Dia-Número em graus ($^{\circ}$)
x_T	Coordenada x da torre (adimensional)
x_S	Coordenada x do Sol (adimensional)
x_N	Coordenada x do vetor normal do espelho (adimensional)
y_T	Coordenada y da torre (adimensional)
y_S	Coordenada y do Sol (adimensional)
y_N	Coordenada y do vetor normal do espelho (adimensional)
z_T	Coordenada z da torre (adimensional)
z_S	Coordenada z do Sol (adimensional)
z_N	Coordenada z do vetor normal do espelho (adimensional)
δ	Declinação Solar ($^{\circ}$)
d_n	Dia-Número (adimensional)
l	Distancia horizontal entre o helióstato e a torre (m)
r_0	Distância Sol-Terra correspondente a 1 UA (km)
r	Distância Sol-Terra num determinado dia/mês (km)
E_t	Equação do Tempo (minutos)

E_0	Fator de Correção da Excentricidade da Órbita Solar (adimensional)
HL	Hora Local (horas)
HL^{DST}	Hora Local de Horário de Verão (<i>Daylight Saving Time</i>) (horas)
β	Inclinação da Superfície (°)
ϕ	Latitude Local (°)
L_{ref}	Longitude de Referência (°)
L_{loc}	Longitude Local (°)
P_{micro}	Micropasso angular (°)
P	Passo angular (°)
x	Posição da torre relativamente ao eixo x (m)
z	Posição da torre relativamente ao eixo y (m)
η	Rendimento (%)
TSV	Tempo Solar Verdadeiro (horas)
$\vec{T}$	Vetor correspondente à direção da torre (adimensional)
$\vec{S}$	Vetor correspondente à direção do Sol (adimensional)
$\vec{N}$	Vetor correspondente à normal do espelho (adimensional)

Lista de tabelas

Tabela 1: Ângulo Horário (ω) em função da hora (TSV) do dia.	9
Tabela 2: Formato de ligação <i>microstepping</i>	34
Tabela 3: Pinos de ligação.	43
Tabela 4: Parâmetros do ensaio no dia 30 de junho de 2026.	45
Tabela 5: Resultados do ensaio no dia 30 de junho de 2026.....	46
Tabela 6: Parâmetros do ensaio no dia 2 de julho de 2026.	46
Tabela 7: Resultados do ensaio no dia 2 de julho de 2026.....	47
Tabela 8: Parâmetros do ensaio no dia 7 de julho de 2026.	48
Tabela 9: Resultados do ensaio no dia 7 de julho de 2026.....	48

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

ATX	<i>Advanced Technology Extended</i> (Tecnologia Avançada Estendida)
COM	<i>Common Contact</i> (Contacto Comum)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controlo Numérico Computadorizado)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador)
CSP	<i>Concentrating Solar Power</i> (Energia Solar Concentrada)
DST	<i>Daylight Saving Time</i> (Hora Local de Horário de Verão)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> ((Memória Só de Leitura Programável e Apagável Eletricamente)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter-Integrado)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Díodo Emissor de Luz)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Ecrã de Cristal Líquido)
NC	<i>Normally Closed</i> (Contacto Normalmente Fechado)
NO	<i>Normally Open</i> (Contacto Normalmente Aberto)
PTZ	<i>Pan-Tilt-Zoom</i> (Panorâmica, inclinação e zoom)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RTC	<i>Real-Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
SCL	<i>Serial Clock</i> (Relógio de Sincronia Serial)
DAS	<i>Serial Data</i> (Dados seriais)
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória Estática de Acesso Aleatório)
TSV	Tempo Solar Verdadeiro
UA	Unidade Astronómica (1 UA = 149 597 890 ± 500 km)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> (Receptor-Transmissor Assíncrono Universal)

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro que este relatório de projeto final é o resultado da minha investigação pessoal e independente.

O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto.

Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

Castelo Branco, 11 de setembro de 2026

Daniel Moreira

1. Introdução (motivação e objetivos)

1.1. Introdução ao projeto

O presente relatório descreve o desenvolvimento de um sistema de seguimento solar do tipo helióstato, realizado no âmbito da unidade curricular Estágio/Projeto Final, integrada no curso de Licenciatura em Engenharia das Energias Renováveis, partindo da proposta do professor Luís Neto.

O projeto consiste na conceção e implementação de um protótipo de helióstato capaz de orientar automaticamente um espelho de acordo com a posição aparente do Sol ao longo do dia. Para esse efeito, foi concebido um sistema composto por uma estrutura mecânica de dois eixos, acionada por motores de passo e controlada por um microcontrolador Arduino Uno. A determinação da posição solar é realizada através de um programa que utiliza a data e hora fornecidas por um módulo RTC e as coordenadas geográficas obtidas por um módulo GPS, permitindo calcular os ângulos necessários para o posicionamento do espelho.

Além do desenvolvimento da componente mecânica e eletrónica, o projeto envolveu a implementação do programa responsável pela aquisição dos dados, cálculo da posição solar, controlo dos motores de passo, calibração do sistema através de sensores fim-de-curso e monitorização do funcionamento através de um display LCD e de um *buzzer* de sinalização.

1.2. Contexto e motivação

Nos últimos anos, a crescente procura por fontes de energia sustentáveis e a necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que permitiram aumentar a eficiência dos sistemas de aproveitamento da energia solar. Entre estas tecnologias destacam-se os sistemas de seguimento solar, capazes de maximizar a quantidade de radiação incidente ao manter os dispositivos permanentemente orientados em direção ao Sol.

Os helióstatos constituem uma solução amplamente utilizada em centrais solares de concentração, laboratórios de investigação e aplicações experimentais, permitindo refletir continuamente a radiação solar para um ponto fixo. A precisão da sua orientação é um fator que vai determinar o desempenho destes sistemas, exigindo o complemento de componentes mecânico, eletrónicos e de processamento capazes de calcular e acompanhar a posição aparente do Sol ao longo do dia.

O desenvolvimento deste projeto proporciona uma oportunidade de aplicar conhecimentos adquiridos em diversas áreas estudadas, nomeadamente programação, eletrónica, sistemas de controlo, automação, instrumentação e implementação de sistemas. Simultaneamente, permite compreender os princípios físicos associados ao movimento aparente do Sol e a sua aplicação em tecnologias de conversão e aproveitamento da energia solar.

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste projeto foi desenvolver um protótipo funcional de um helióstato capaz de orientar automaticamente um espelho de modo a refletir a radiação solar incidente em direção a um alvo fixo.

Para atingir este objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e compreender como prever a movimentação aparente do Sol ao longo de cada dia do ano através de equações astronómicas;
- Estudar sistemas mecânicos que permitam o protótipo fazer o seguimento do Sol de forma estável e precisa e as suas limitações;
- Projetar a estrutura física (base, mastro e suporte do espelho), recorrendo a ferramentas CAD e garantir uma estrutura robusta, estável e sem folgas;
- Fazer estudo e escolha do material a ser utilizado na construção da estrutura tendo em conta o material disponível;
- Definir o tamanho do espelho a ser utilizado tendo em conta o tamanho da estrutura e as suas limitações mecânicas;
- Selecionar e dimensionar os atuadores elétricos como base no binário exigido pela estrutura em condições de operação;
- Implementar a eletrónica de controlo baseada em microcontrolador para o processamento das instruções de movimento;
- Implementar um módulo RTC para obter a data e hora e um módulo GPS para a aquisição das coordenadas geográficas;
- Integrar interruptores de fim de curso para a calibração do posicionamento zero do espelho (posição “Home”) assegurando a máxima precisão na sua orientação inicial;
- Desenvolver um programa que seja capaz de calcular o movimento aparente do Sol em tempo real;
- Implementar a formulação matemática da Lei da Reflexão para calcular o vetor normal do espelho a partir do vetor de incidência solar e do vetor de posição do recetor;
- Desenvolver uma interface de monitorização através de um display LCD, que apresente as principais variáveis do sistema;
- Criar rotinas de calibração automática do sistema através das quais se possam eliminar desvios angulares mecânicos acumulados durante as longas horas de operação do protótipo;
- Realizar a montagem e a cablagem do protótipo, isolando componentes eletrónicos sensíveis de potenciais danos mecânicos e térmicos.
- Realizar ensaios para medir a precisão angular dos movimentos do protótipo;

1.4. Metodologia

A realização do projeto seguiu uma metodologia dividida em várias etapas.

Inicialmente foi efetuada uma pesquisa bibliográfica sobre sistemas de seguimento solar, helióstatos, cálculo da posição solar e módulos eletrónicos para aquisição de dados necessários.

Na segunda fase foi feito o desenvolvimento da estrutura mecânica e a seleção dos componentes eletrónicos necessários para o funcionamento do sistema.

Posteriormente foi progressivamente implementado o programa responsável pela integração dos diferentes módulos, incluindo a aquisição da data e da hora, a leitura das coordenadas geográficas, o cálculo da posição solar e o controlo independente de cada um dos motores de passo utilizados.

Após a implementação do sistema foram realizados ensaios experimentais destinados a validar o funcionamento do protótipo, verificando a correta comunicação entre os diferentes módulos, o procedimento de calibração inicial, a precisão de posicionamento do espelho e a fiabilidade do sistema durante o funcionamento contínuo.

1.5. Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se organizado em seis capítulos, de forma a apresentar, de forma clara e sequencial, todas as fases de desenvolvimento do projeto:

Capítulo 1- Introdução: Apresenta a introdução ao projeto, o contexto e a motivação, os objetivos propostos e a metodologia aplicada.

Capítulo 2- Trajetória e coordenadas solares: Expõe a fundamentação teórica relativa à posição do Sol, detalhando os cálculos dos parâmetros essenciais como a declinação solar, a equação do tempo, o ângulo horário, a altura solar e o azimute solar.

Capítulo 3- Helióstatos: Descreve o que é e para que serve um helióstato, os diferentes tipos existentes, as suas aplicações práticas e a análise da eficiência do sistema em função da posição do Sol.

Capítulo 4- Conceção e construção de um helióstato: Detalha arquitetura do sistema, abrangendo o desenvolvimento da estrutura mecânica, a seleção e ligação dos componentes eletrónicos e a explicação do programa implementado.

Capítulo 5- Teste do helióstato: Apresenta e analisa os resultados experimentais obtidos, avaliando os testes do cálculo da posição solar e os ensaios de validação mecânica do helióstato.

Capítulo 6- Conclusões: Expõe as conclusões do trabalho desenvolvido, uma apreciação geral, as principais dificuldades e limitações encontradas ao longo do projeto e propostas de melhorias futuras.

2. Trajetória e coordenadas solares

2.1. Posição do Sol

O Sol é uma enorme esfera gasosa extremamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km, localizada no centro do nosso Sistema Solar. Composto principalmente por hidrogénio e hélio, funciona como um reator de fusão nuclear, fundindo átomos de hidrogénio em hélio produzindo grandes quantidades de energia em forma de radiação que é emitida em todas as direções. Esta radiação que ele emite viaja pelo vácuo do espaço na velocidade da luz, mas apenas uma pequena percentagem desta radiação atinge a superfície do planeta Terra depois de percorrer aproximadamente $1,5 \times 10^8$ km em cerca de 8 minutos e 20 segundos.

A partir da Terra observamos num ciclo diário em que o Sol desloca-se (aparentemente) de Este para Oeste devido à rotação do próprio planeta, mas ao longo do ano a posição do Sol também varia. Essa variação da posição que podemos observar é o movimento que ele faz no eixo Norte-Sul, uma variação de 47° , sendo $23,5^\circ$ para Norte mais $23,5^\circ$ para Sul, limitado pelo Trópico de Capricórnio e pelo Trópico Câncer, é exatamente esta variação na posição do Sol que provoca as diferentes estações do ano.

Comprovado pelo astrónomo Nicolau Copérnico que o planeta Terra gira em torno do Sol numa órbita elíptica, concluímos que a distância entre ambos varia ao longo do ano. Esta distância é representada por r_0 em Unidade Astronómica (UA), uma unidade de medida do Sistema Internacional (SI). Esta unidade representa a distância média entre o Sol e a Terra, utilizada para representar e simplificar a distância entre os astros do Sistema Solar.

Dando a conhecer a Unidade Astronómica em quilómetros, equação (1):

$$1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km} = 149\,597\,890 \pm 500 \text{ km} \quad (1)$$

Existem três posições principais em torno do Sol que a Terra ocupa ao longo do ano que se destacam como:

No dia 3 de Janeiro em que a Terra está na posição mais próxima possível do Sol, equação (2):

$$r_0 = 0,983 \times \text{UA} \quad (2)$$

– No dia 4 de Julho a Terra está na posição mais afastada possível do Sol, equação (3):

$$r_0 = 1,017 \times \text{UA} \quad (3)$$

– No dia 4 de Abril e no dia 5 de Outubro em que a Terra está exatamente a uma Unidade Astronómica do Sol, equação (4):

$$r_0 = 1 \times \text{UA} \quad (4)$$

Para uma melhor representação apresenta-se a Figura 1 que demonstra a variação da distância entre a Terra e o Sol ao longo do ano.

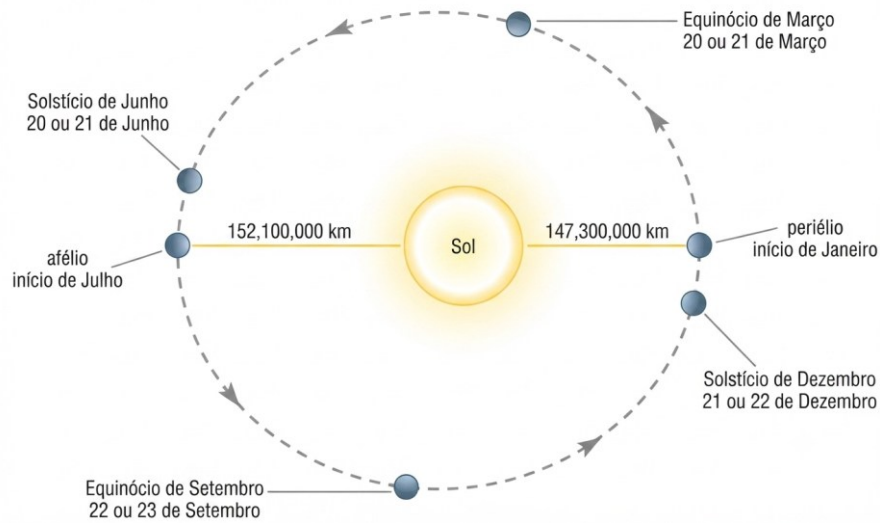


Figura 1: Distância Sol-Terra.
(figura copiada de [1] e editada com IA)

Para calcular exatamente a distância entre Sol-Terra recorreremos a uma equação desenvolvida para calcular o Fator de Correção da Excentricidade da Órbita Solar (E_0) [2]:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right) = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad (5)$$

onde:

E_0 Fator de Correção da Excentricidade da Órbita Solar (adimensional)

r_0 Distância média Sol-Terra (km)

r Distância Sol-Terra num determinado dia/mês (km)

Γ Ângulo do dia ($^\circ$)

Para realizar o cálculo anterior precisamos conhecer o Ângulo do Dia (Γ) que faz corresponder o dia do ano com a posição angular que a Terra se encontra a partir do dia 1 de Janeiro (Ângulo do Dia = 0°), em torno do Sol, calculado através da equação (6), [2]:

$$\Gamma = \frac{360(d_n - 1)}{365} \quad (6)$$

onde o Dia-Número (d_n) é o somatório dos dias do ano que já decorreram, sendo que $d_n = 1$ corresponde ao dia 1 de Janeiro e $d_n = 365$ ao dia 31 de Dezembro, tendo em conta que Fevereiro é contabilizado com 28 dias.

Declinação Solar

A declinação solar é definida como o ângulo entre a linha que une os centros da Terra e do Sol e o plano do equador da Terra. Devido à inclinação de $23,5^\circ$ entre o eixo de rotação da Terra e a normal ao plano da sua órbita, este ângulo varia ao

longo do ano de forma sinusoidal. Esta variação é a responsável pelas estações do ano e pelo movimento aparente do Sol no eixo Norte-Sul. Como mostra na Figura 2 e na Figura 3, ocorrem três situações com destaque ao longo do ano. Tendo em conta a nossa posição no hemisfério Norte, a declinação atinge o seu valor máximo de $23,5^\circ$ por volta do dia 21 de Junho, o solstício de verão. Por volta do dia 21 de Dezembro ocorre o solstício de inverno e a declinação atinge o seu valor mínimo de $-23,5^\circ$ e os equinócios de primavera e de outono nos dias 21 de Março e 23 de Setembro a declinação é nula (0°).

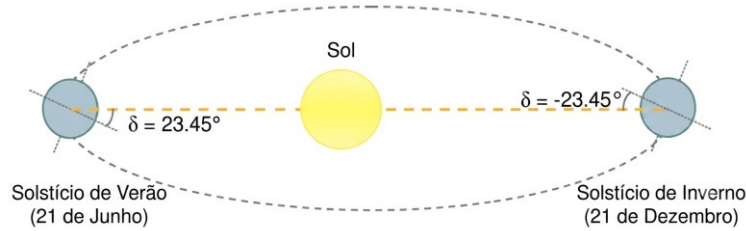


Figura 2: Gráfico sinusoidal da declinação.
(figura copiada de [3] e editada com IA)

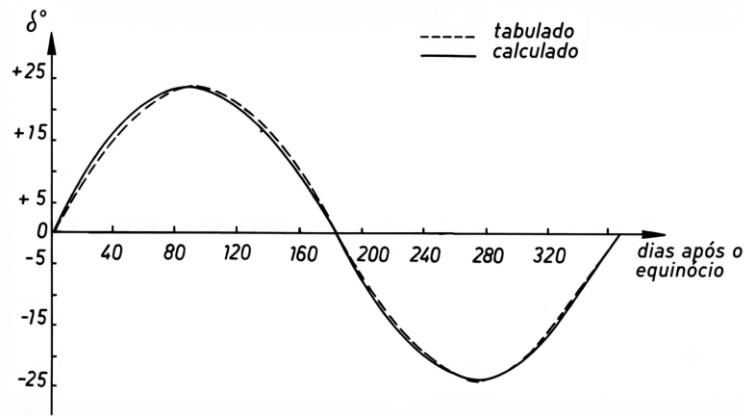


Figura 3: Gráfico sinusoidal da declinação.
(figura copiada de [3] e editada com IA)

Para controlar um heliostato é necessário calcular este ângulo para qualquer dia do ano, [4]:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + d_n)\right) \quad (7)$$

onde:

δ Declinação Solar ($^\circ$)

d_n Dia-Número (adimensional)

De acordo [4] e [2], a Declinação Solar também pode ser através de uma outra equação:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cos(2\Gamma) + 0,000907 \sin(2\Gamma) \\ & - 0,002697 \cos(3\Gamma) + 0,00148 \sin(3\Gamma) \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

onde:

δ Declinação Solar ($^{\circ}$)

Γ Ângulo do dia ($^{\circ}$)

A fração $(180/\pi)$ está inserida no final da equação (8) para fazer a conversão de radianos para graus do valor da Declinação Solar.

Equação do tempo

Enquanto a Declinação Solar define a posição do Sol em relação a Norte-Sul, a Equação do Tempo corrige o erro de Este-Oeste causado pela irregularidade do movimento aparente do Sol ao longo do ano. Esta equação é essencial porque o Sol não volta a cruzar um meridiano a intervalos de exatamente 24 horas todos os dias, devido à excentricidade da órbita terrestre e à inclinação do eixo da Terra. Com a Equação do Tempo calculamos a diferença em minutos entre o tempo solar aparente dado pela posição real do Sol no céu e o tempo solar médio dado pelos relógios que utilizamos. Pela Figura 4, observamos o erro causado pela irregularidade do movimento aparente do Sol em minutos, e como é muito importante ter em conta este parâmetro para que o helióstato não apresente um movimento adiantado ou atrasado em relação ao Sol em diferentes alturas do ano.

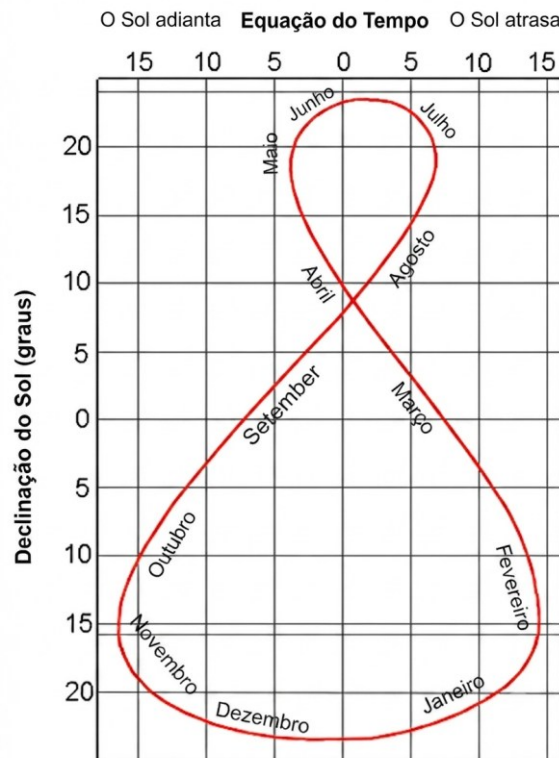


Figura 4: Gráfico da Equação do tempo.
(figura copiada de [5] e editada com IA)

Para ter a máxima precisão no helióstato calculamos este erro com a equação (9), [4]:

$$E_t = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (9)$$

onde:

E_t Equação do Tempo (minutos)

Para calcular a Equação do Tempo precisamos primeiro conhecer o parâmetro B . Tal como o Ângulo do Dia (Γ), o parâmetro B também faz a correspondência do dia do ano com a posição angular que a Terra se encontra a partir do dia 22 de Março ($B = 0^\circ$), que corresponde ao Equinócio de Primavera, portanto neste ponto de referência a distância Sol-Terra é exatamente igual a 1UA.

$$B = (d_n - 81) - \frac{360}{364} \quad (10)$$

onde:

B Conversão do Dia-Número em graus ($^\circ$)

d_n Dia-Número (adimensional)

Para se poder controlar um helióstato com precisão, não se pode ter em conta apenas a hora que vemos no relógio, a chamada “Hora Local” ou “Hora Legal”. É necessário converter a hora local (HL) no Tempo Solar Verdadeiro (TSV), tendo em conta a longitude local e um meridiano de referência [2]:

$$TSV = HL + \frac{E_t}{60} + \frac{4(L_{loc} - L_{ref})}{60} \quad (11)$$

onde:

TSV Tempo Solar Verdadeiro (horas)

HL Hora Local (horas)

L_{loc} Longitude Local ($^\circ$)

L_{ref} Longitude de Referência ($^\circ$)

E_t Equação do Tempo (minutos)

Para calcular o Tempo Solar Verdadeiro é muito importante não esquecer que, em Portugal, entre o último domingo de Março e o último domingo de Outubro estamos dentro do horário de Verão (*Daylight Saving Time* (DST), em inglês). Neste período do ano os relógios estarão uma hora adiantados, sendo necessário fazer uma correção no parâmetro da Hora Local:

$$HL = HL^{DST} - 1 \quad (12)$$

onde:

HL Hora Local (horas)

HL^{DST} Hora de Verão (Daylight Saving Time) (horas)

Ângulo Horário

O ângulo horário (ω) representa o deslocamento angular do Sol no eixo Este-Oeste em relação a um meridiano local. Como o planeta completa uma rotação de 360° no seu próprio eixo em aproximadamente 24 horas, o Sol aparenta deslocar-se numa razão de 15° por hora. O ponto de referência para calcular o Ângulo Horário

é o Meio-Dia Solar (12h00 TSV), momento em que o Sol atinge a sua altura máxima no céu. Portanto quando o Sol atinge a posição de Meio-Dia Solar o Ângulo Horário $\omega = 0^\circ$. Antes do meio-dia solar o ângulo horário é negativo e depois do meio-dia solar o ângulo horário é positivo, tal como se exemplifica na Tabela 1.

Tabela 1: Ângulo Horário (ω) em função da hora (TSV) do dia.

Manhã		Meio-dia Solar		Tarde	
Hora TSV	Ângulo Horário (ω)	Hora TSV	Ângulo Horário (ω)	Hora TSV	Ângulo Horário (ω)
00:00	-180	12:00	0	13:00	15
01:00	-165			14:00	30
02:00	-150			15:00	45
03:00	-135			16:00	60
04:00	-120			17:00	75
05:00	-105			18:00	90
06:00	-90			19:00	105
07:00	-75			20:00	120
08:00	-60			21:00	135
09:00	-45			22:00	150
10:00	-30			23:00	165
11:00	-15			00:00	-180

De acordo com [4], a fórmula estabelecida para calcular o ângulo horário é:

$$\omega = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (13)$$

onde:

ω Ângulo Horário ($^\circ$)

TSV Tempo Solar Verdadeiro (horas)

Altura Solar

A Altura Solar (α) é o ângulo vertical medido entre os raios solares e a horizontal do plano. O valor da Altura Solar varia de $\alpha = 0^\circ$ no nascer e no pôr do Sol até o seu valor máximo ao Meio-Dia Solar, que depende da latitude e da época do ano. Este parâmetro é vital para o comando do helióstato uma vez que determina a inclinação vertical do Sol para depois calcular a inclinação do espelho para direcionar os raios solares para o ponto pretendido.

Como mostra a Figura 5, o Ângulo de Zénite Solar (θ_z) é complementar à Altitude Solar, a soma destes dois ângulos independentemente do valor de cada um, é sempre 90° . O Ângulo de Zénite Solar é o ângulo formado pelos raios solares e a normal da superfície do plano horizontal.

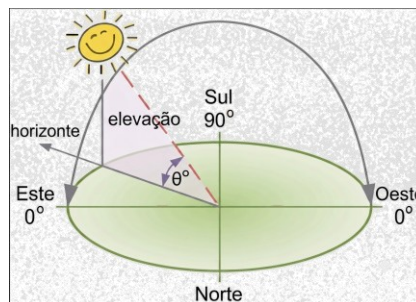


Figura 5: Representação da altura solar e do ângulo de zénite.
(figura copiada de [6] e editada com IA)

Para calcular a Altura Solar num determinado instante, utilizamos a relação trigonométrica que envolve a Latitude Local, a Declinação Solar e o Ângulo Horário [4]:

$$\sin(\alpha) = \cos(\theta_z) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (14)$$

e:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (15)$$

onde:

- α Altura Solar ($^\circ$)
- θ_z Ângulo de Zénite Solar ($^\circ$)
- ϕ Latitude Local ($^\circ$)
- δ Declinação Solar ($^\circ$)
- ω Ângulo Horário ($^\circ$)

Azimute Solar

O Azimute Solar (ψ) é o ângulo horizontal medido entre a direção do Sol e o Polo Sul ou o Polo Norte como ponto de referência. A convenção mais utilizada de acordo com [7], é utilizar o Sul como ponto de referência. Durante o período da manhã este ângulo tem valores negativos, passando a valores positivos durante a tarde, como mostra a Figura 6. Quando o Sol atinge a posição de Meio-Dia Solar fica alinhado com o ponto de referência Sul, em que $\psi = 0^\circ$.

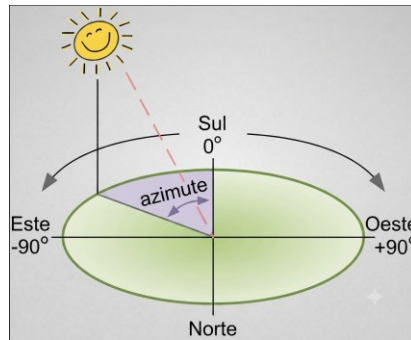


Figura 6: Representação do Azimute Solar.
(figura copiada de [6] e editada com IA)

Calcular o Ângulo do Azimute Solar é um passo muito importante para fazer o controlo do helióstato para determinar a sua orientação na horizontal [4]:

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\alpha) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha) \cos(\phi)} \quad (16)$$

onde:

- ψ Ângulo de Azimute Solar ($^\circ$)
- α Altura Solar ($^\circ$)
- ϕ Latitude Local ($^\circ$)
- δ Declinação Solar ($^\circ$)

Através da equação anterior o resultado obtido para o Ângulo de Azimute Solar será sempre um valor positivo, correspondendo a uma posição do Sol no lado Oeste do plano. Para ter a certeza de qual é a orientação do Sol é necessário verificar o valor de ω , se $\omega < 0$ corresponde ao período da manhã e o Azimute deve ser assumido como negativo ou com direção Este e se $\omega > 0$ (período da tarde), o Azimute é positivo ou com direção a Oeste.

Nascer e Pôr do Sol

O Nascer do Sol e o Pôr do Sol ocorrem no instante exato em que a Altitude Solar é nula ($\alpha = 0$), uma vez de manhã e mais uma vez no final do dia, como mostra a Figura 7.

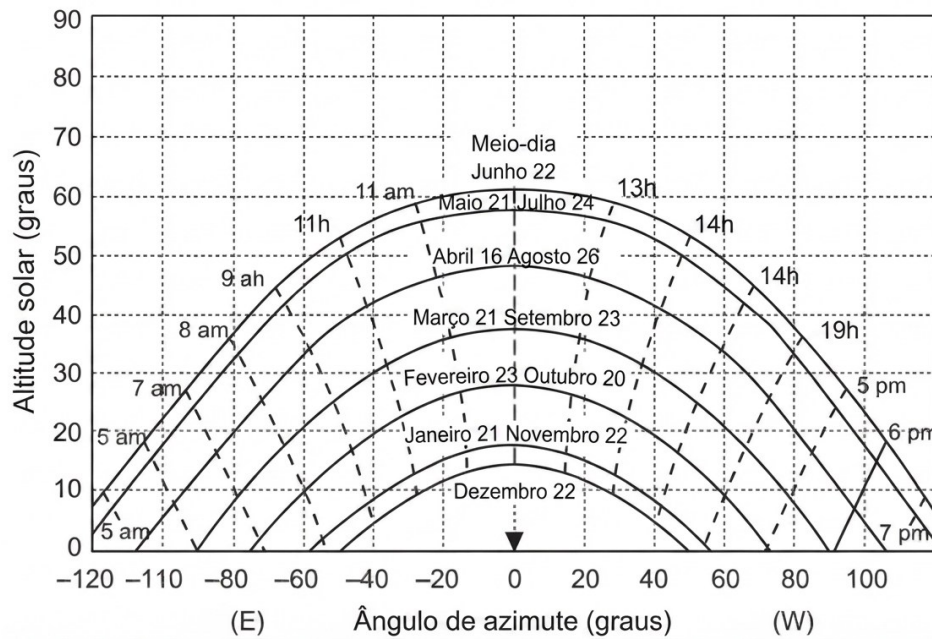


Figura 7: Ângulo de Nascer e Pôr do Sol.
(figura copiada de [3] e editada com IA)

Para realizar o cálculo do ângulo de nascer do sol utilizamos a mesma equação para calcular a altura solar para $\alpha = 0^\circ$ e isolar o ângulo horário (ω), para encontrar o momento em que o Sol cruza o horizonte, [4]:

– quando: $\alpha = 0^\circ$

$$\sin(\alpha) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (17)$$

ou:

$$\cos(\omega_{sr}) = -\tan(\phi) \tan(\delta) \quad (18)$$

– então para calcular o Ângulo de Pôr do Sol:

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} \quad (19)$$

onde:

α Altura Solar ($^\circ$)

ω_{sr} Ângulo Horário do Nascer do Sol ($^\circ$)

ω_{ss} Ângulo Horário do Pôr do Sol ($^{\circ}$)

ϕ Latitude Local ($^{\circ}$)

δ Declinação Solar ($^{\circ}$)

Ângulo de incidência de um raio solar numa superfície plana

O ângulo de incidência é definido como o ângulo formado entre os raios solares incidentes e a normal (linha perpendicular à superfície plana) do espelho ou coletor. Este parâmetro é importante porque é ele que determina a eficiência da captação de radiação. Essa quantidade de radiação que atinge a superfície é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência, o que significa que quanto mais próximo os raios solares incidirem na perpendicular a superfície maior vai ser o rendimento deste sistema.

$$\eta = \cos(\theta) \times 100 \quad (20)$$

onde:

η Rendimento (%)

θ Ângulo de Incidência ($^{\circ}$)

O ângulo de incidência vai depender do grau de inclinação (β) da superfície em relação à horizontal e do azimuth da própria superfície (γ), o ângulo de incidência é calculado através da seguinte expressão (21), tendo em consideração que para uma superfície plana o ângulo $\beta = 0^{\circ}$, [4]:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\phi) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(\phi) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta) \\ & + \sin(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\beta) \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (21)$$

onde:

θ Ângulo de Incidência ($^{\circ}$)

ϕ Latitude Local ($^{\circ}$)

δ Declinação Solar ($^{\circ}$)

β Inclinação da Superfície ($^{\circ}$)

γ Ângulo de Azimute da Superfície ($^{\circ}$)

ω Ângulo Horário ($^{\circ}$)

Para uma melhor representação apresenta-se a Figura 8 que demonstra de forma ilustrada o ângulo de incidência dos raios solares.

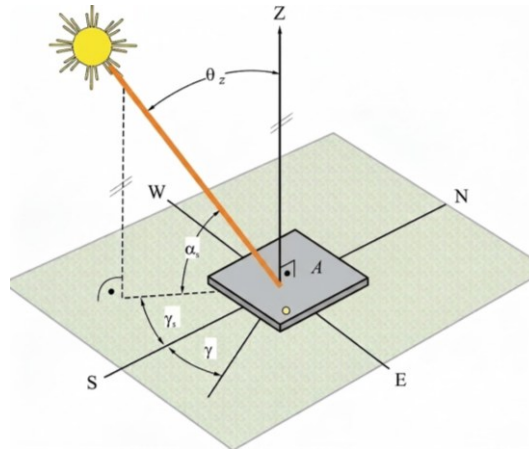


Figura 8: Orientação de uma superfície plana.
(figura copiada de [8] e editada com IA)

Ângulo de incidência de um raio solar numa superfície inclinada e com orientação

Uma superfície pode ter vários graus de inclinação e sentidos de orientação diferentes como ostra a Figura 9. Mas há três casos específicos em que o ângulo de incidência dos raios solares pode ser calculado por equações derivadas da equação (21).

- No caso de a superfície estar na horizontal em que $\beta = 0^\circ$, o ângulo de incidência será igual ao ângulo de Zénite Solar e utilizamos a equação (15) que calcula a Altura Solar.
- Se a superfície estiver na vertical, $\beta = 90^\circ$, a equação (21) fica:

$$\cos(\theta) = -\cos(\phi) \sin(\delta) \cos(\gamma) + \sin(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\gamma) \quad (22)$$

- Para superfícies orientadas perfeitamente para Sul e posicionadas no Hemisfério Norte, ($\gamma = 0^\circ$):

$$\cos(\theta) = \sin(\phi - \beta) \sin(\delta) + \cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (23)$$

- Para superfícies orientadas a Norte, mas posicionadas no Hemisfério Sul, ($\gamma = 0^\circ$):

$$\cos(\theta) = \sin(\phi + \beta) \sin(\delta) + \cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (24)$$

onde:

- θ Ângulo de Incidência ($^\circ$)
- ϕ Latitude Local ($^\circ$)
- δ Declinação Solar ($^\circ$)
- β Inclinação da Superfície ($^\circ$)
- γ Ângulo de Azimute da Superfície ($^\circ$)
- ω Ângulo Horário ($^\circ$)

A equação (21) é a regra geral para calcular o Ângulo de Incidência para uma superfície com qualquer inclinação e orientação, como mostra que as equações anteriores são uma simplificação da equação principal.

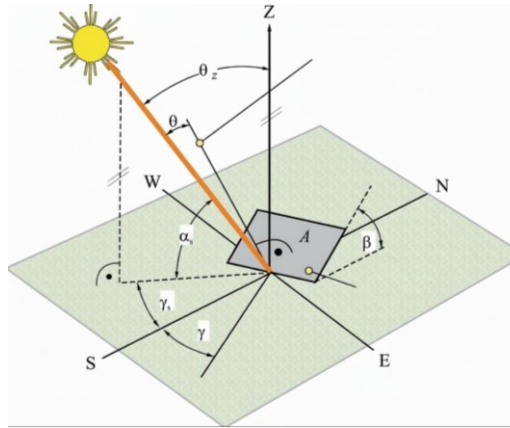


Figura 9: Orientação de uma superfície.
(figura copiada de [8] e editada com IA)

Orientação do Helióstato

O objetivo do sistema de orientação do helióstato consiste em determinar a orientação que o espelho deve assumir de forma a refletir a radiação solar incidente para um ponto específico. Para isso é necessário determinar os ângulos de orientação do espelho a partir da posição do Sol, da posição do helióstato e da posição do alvo.

O método utilizado neste projeto foi baseado no modelo de orientação apresentado por [9], no qual a orientação do helióstato de dois eixos é determinada através dos ângulos de azimuth e elevação do Sol e do alvo. O método considera três conjuntos de ângulos, sendo os ângulos que definem a posição do Sol, os ângulos que definem a posição do alvo e finalmente, os ângulos que definem a orientação do helióstato. Após serem conhecidos os ângulos de azimuth e altura solar, são calculados os ângulos correspondentes à posição do ponto alvo. Estes ângulos são posteriormente convertidos para coordenadas cartesianas, permitindo calcular o vetor normal à superfície do espelho. Por fim, a partir deste vetor, são calculados os ângulos de elevação e azimuth que definem a orientação do helióstato.

O princípio físico utilizado para determinar a orientação do espelho é a lei da reflexão, segundo a qual o ângulo de incidência dos raios solares numa superfície é igual ao ângulo de reflexão, sendo ambos medidos relativamente à normal da superfície.

Assim:

$$\theta_i = \theta_r \quad (25)$$

onde:

θ_i Ângulo de incidência (°)

θ_r Ângulo de reflexão (°)

No caso de um helióstato, o espelho deve ser orientado de modo que a sua normal se encontre exatamente entre a direção do Sol e da direção do ponto alvo para o qual se pretende refletir a radiação.

A Figura 10 apresenta a representação geométrica utilizada para determinar a orientação do helióstato. Nesta representação encontram-se identificados o Sol, o helióstato, o ponto alvo no topo de uma torre, os vetores correspondentes às direções do Sol e do alvo e a normal à superfície do espelho.

O helióstato representa o ponto de referência do sistema, sendo a posição do Sol definida pelos seus ângulos de elevação e azimute. De forma semelhante, a posição do alvo na torre é definida através de um ângulo de elevação e de um ângulo azimute.

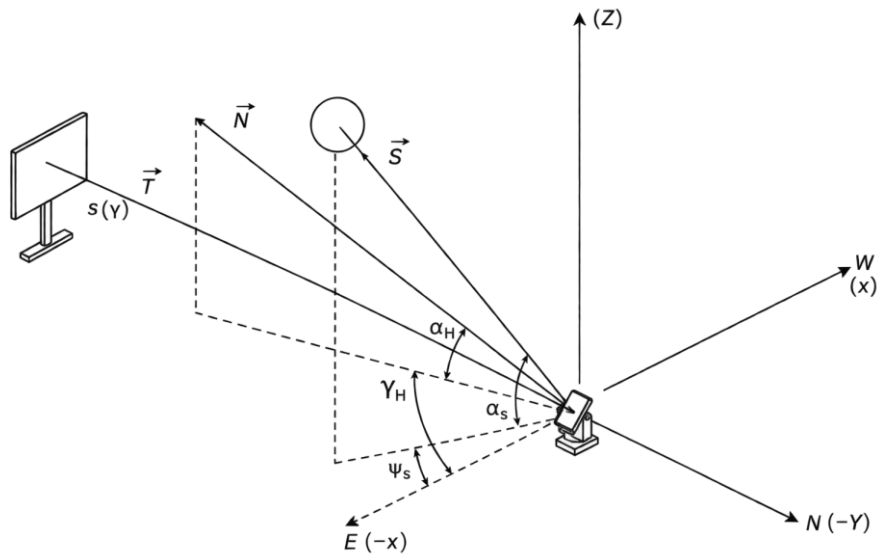


Figura 10: Esquema dos ângulos de um helióstato, ilustrando o rastreamento solar e a reflexão para a torre central.
(figura gerada com a ajuda da IA)

Para determinar a posição do helióstato é necessário começar por determinar a posição do Sol. Esta posição é definida através do ângulo de elevação solar (α) e o ângulo de azimute solar (ψ), calculados através das equações (14) e (15).

Depois de determinar a posição do Sol, é necessário determinar a posição do ponto para o qual o espelho deve refletir a radiação solar. Tal como acontece para o Sol, a posição da torre onde está o alvo é definida através do ângulo de azimute da torre (ψ_T) e do ângulo de elevação da torre (α_T).

O ângulo de azimute da torre, é definido relativamente ao Sul e representa a direção horizontal entre o helióstato e a torre. Considerando que o helióstato é a origem do sistema de coordenadas em que o eixo X corresponde à direção Este e o eixo Y à direção Norte, podemos calcular o azimute da torre através da equação (26):

$$\psi_T = \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right) \quad (26)$$

onde:

ψ_T Ângulo de azimute da torre (°)

x Posição da torre relativamente ao eixo x (m)

y Posição da torre relativamente ao eixo y (m)

É necessário ter em atenção que, após realizar o cálculo, dependendo da posição da torre no plano, o valor do azimute da torre vai ser considerado positivo ou negativo. No caso de a torre estar no lado Este do plano o valor do azimute é negativo, por outro lado se a torre está no lado Oeste o azimute é positivo.

O ângulo da elevação da torre depende da altura do alvo em relação à altura e da distância horizontal entre o helióstato e da torre, calculado na equação (27):

$$\alpha_T = \tan^{-1} \left(\frac{h_t - h_H}{l} \right) \quad (27)$$

onde:

α_T Ângulo da elevação do alvo na torre (°)

h_t Altura do alvo na torre (m)

h_H Altura do centro do espelho (m)

l Distância horizontal entre o helióstato e a torre (m)

Após determinar os ângulos do Sol e do alvo, o método utilizado converte ambas as posições para coordenadas cartesianas tridimensionais. Esta etapa é necessária para que seja possível determinar geometricamente a orientação da superfície do espelho.

Para o Sol, as coordenadas cartesianas são determinadas através das expressões (28), (29) e (30):

$$x_S = \cos(\alpha) \times \sin(-\psi) \quad (28)$$

$$y_S = \cos(\alpha) * \cos(-\psi) \quad (29)$$

$$z_S = \sin(\alpha) \quad (30)$$

Assim, o vetor correspondente à direção do Sol pode ser representado por:

$$\vec{S} = (x_S, y_S, z_S) \quad (31)$$

onde:

x_S Coordenada x do Sol (adimensional)

y_S Coordenada y do Sol (adimensional)

z_S Coordenada z do Sol (adimensional)

$\vec{S}$ Vetor correspondente à direção do Sol (adimensional)

α Altura Solar ($^{\circ}$)

ψ Ângulo de azimute solar ($^{\circ}$)

De forma semelhante, para a torre são utilizadas as expressões:

$$x_T = \cos(\alpha_T) \times \sin(-\psi_T) \quad (32)$$

$$y_T = \cos(\alpha_T) * \cos(-\psi_T) \quad (33)$$

$$z_T = \sin(\alpha_T) \quad (34)$$

Obtendo-se o vetor correspondente à direção da torre:

$$\vec{T} = (x_T, y_T, z_T) \quad (35)$$

onde:

x_T Coordenada x da torre (adimensional)

y_T Coordenada y da torre (adimensional)

z_T Coordenada z da torre (adimensional)

$\vec{T}$ Vetor correspondente à direção da torre (adimensional)

α_T Ângulo da elevação do alvo na torre ($^{\circ}$)

ψ_T Ângulo de azimute da torre ($^{\circ}$)

Com os dois vetores definidos, é possível determinara orientação da normal à superfície do espelho. O método considerado considera a média dos dois vetores, obtendo assim um vetor que representa a direção da normal do espelho:

$$x_N = \frac{x_S + x_T}{2} \quad (36)$$

$$y_N = \frac{y_S + y_T}{2} \quad (37)$$

$$z_N = \frac{z_S + z_T}{2} \quad (38)$$

Consequentemente, o vetor normal do espelho é dado por:

$$\vec{N} = (x_N, y_N, z_N) \quad (39)$$

onde:

x_N Coordenada x do vetor normal do espelho (adimensional)

y_N Coordenada y do vetor normal do espelho (adimensional)

z_N Coordenada z do vetor normal do espelho (adimensional)

$\vec{N}$ Vetor correspondente à normal do espelho (adimensional)

Depois de determinar o vetor normal do espelho, são calculados os dois ângulos que definem a orientação do helióstato. O ângulo da elevação é calculado através da coordenada z do vetor normal, pela equação (40):

$$\alpha_H = \sin^{-1} \left(\frac{z_N}{\sqrt{x_N^2 + y_N^2 + z_N^2}} \right) \quad (40)$$

onde:

α_H Ângulo de elevação do helióstato (°)

O ângulo de azimuth do helióstato é determinado a partir das componentes x e y do vetor normal, sendo calculado através da equação (41):

$$\gamma_H = \tan^{-1} \left(-\frac{x_N}{y_N} \right) \quad (41)$$

onde:

γ_H Ângulo de azimuth do helióstato (°)

3. Helióstatos

3.1. O que é e para que serve um Helióstato

Um helióstato é um dispositivo mecânico composto por um espelho de um formato específico que se move de forma a acompanhar o movimento aparente do Sol no céu de forma automática. O seu principal objetivo é manter os raios solares refletidos num alvo fixo, independentemente da posição do Sol ao longo do dia. Diferente de um painel fotovoltaico ou de um coletor solar térmico comum, que apenas captam a radiação emitida pelo Sol numa posição fixa, o helióstato atua como um refletor ativo para que os raios solares atinjam sempre o mesmo ponto.

O princípio de funcionamento do helióstato baseia-se na Lei da Reflexão que explica que quando um raio de luz incide numa superfície, surge um raio refletido no mesmo plano de incidência com o mesmo ângulo com que ele foi incidido. Como mostra a Figura 11, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

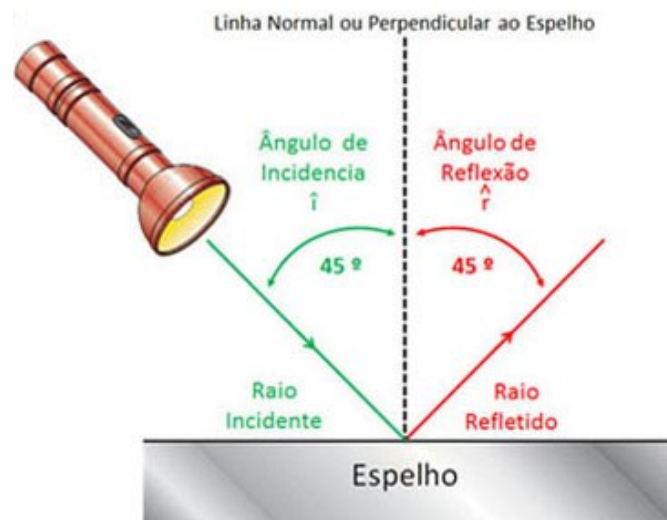


Figura 11: Ângulo de incidência do raio solar.

3.2. Tipos de Helióstato

Os Helióstatos aplicados na tecnologia de Energia Solar de Concentração, podem ter várias configurações para os diferentes tipos de sistemas de Energia Solar Concentrada (CSP), sendo os mais comuns, [10]:

- Espelho plano;
- Linear *Fresnel*;
- Cilíndrico parabólico;
- Disco parabólico.

Espelho plano

Os espelhos planos de formato retangular são os mais simples e baratos de ser produzidos, utilizados nos sistemas de Torre de Recetor Central como ilustra a Figura 12. Nestas centrais de torre, centenas ou milhares de helióstatos controlados

individualmente, são colocados ao redor de uma torre central. Estes helióstatos por sua vez vão refletir os raios solares para o recetor localizado no topo da torre central. No entanto, à medida que a distância ao alvo aumenta, os raios solares refletidos dispersam-se reduzindo significativamente a eficiência do sistema.



Figura 12: Helióstatos de espelho plano.

Linear Fresnel

No sistema de concentração solar do tipo Linear *Fresnel* são utilizados longos espelhos retangulares e planos que refletem os raios solares sobre um tubo que está posicionado na horizontal por cima dos refletores. Na Figura 13, observamos que os espelhos estão a diferentes distâncias do recetor, por este motivo cada espelho é controlado individualmente para acompanhar o movimento horizontal do Sol.

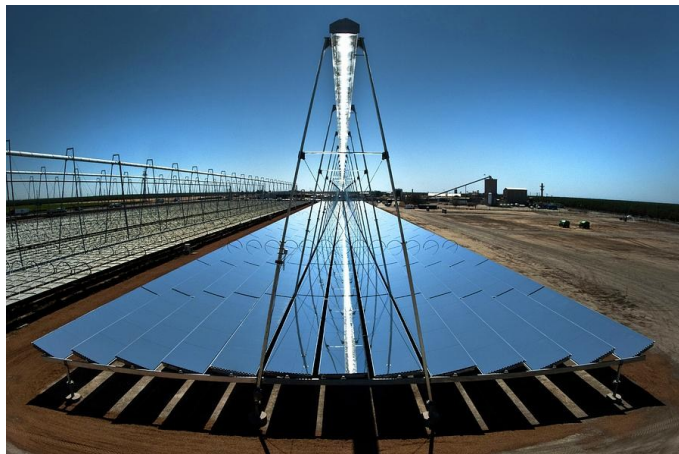


Figura 13: Helióstatos do tipo Linear *Fresnel*.

Cilíndrico Parabólico

O sistema que utiliza um refletor cilíndrico parabólico, consiste num espelho côncavo de formato cilíndrico como é apresentado na Figura 14. O formato côncavo do espelho focaliza a radiação Solar para um tubo por onde circula um fluido que realiza a transferência de calor. Tal como no sistema Linear *Fresnel*, o sistema Cilíndrico Parabólico também apenas acompanha o movimento horizontal do Sol



Figura 14: Helióstato do tipo Cilíndrico Parabólico.

Disco Parabólico

O Disco Parabólico é um espelho construído no formato de parábola como mostra a Figura 15. O formato parabólico reflete e concentra os raios solares para o ponto focal da parábola. Neste ponto específico está localizado um recetor que absorve a energia captada. Tal como no helióstato de espelhos planos, neste sistema também permite realizar o controlo da posição nos dois eixos para acompanhar o movimento horizontal e vertical do Sol ao longo do dia.



Figura 15: Helióstato do tipo Disco Parabólico.

3.3. Aplicações práticas de Helióstatos

O principal objetivo da utilização dos Helióstatos é a resolução de alguns problemas práticos do dia a dia. Destacando-se as cinco principais utilizações:

- **Iluminação natural de ambientes:** Em cidade sobrelotadas ou em casas construídas em locais muito sombrios, como atrás de prédios ou encostas, os helióstatos são instalados em pontos estratégicos para captarem a luz solar e refletirem-na de forma constante para o interior das habitações através das janelas como mostra a Figura 16. Isto reduz significativamente a necessidade de acender lâmpadas durante o dia, poupando energia elétrica.

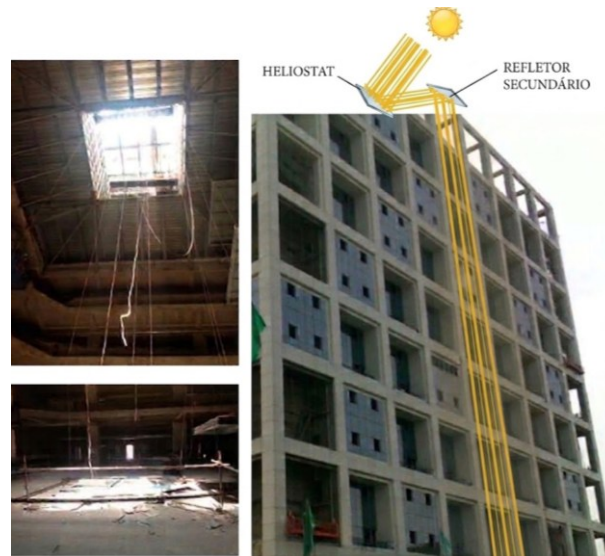


Figura 16: Iluminação natural de ambientes.

- **Geração de Energia Solar Concentrada (CSP):** Esta é a sua aplicação mais famosa a nível industrial. Em grandes centrais térmicas como na central de Ashalim em Israel ou Crescent Dunes nos EUA, instalaram-se milhares destes espelhos espalhados pelo chão. Juntos, funcionam como uma grande lupa, apontado todos os raios solares para o topo de uma torre central exemplificada na Figura 17. O calor acumulado é tão extremo que consegue ferver fluidos a centenas de graus para produzir vapor e água, que depois faz mover turbinas para gerar eletricidade.

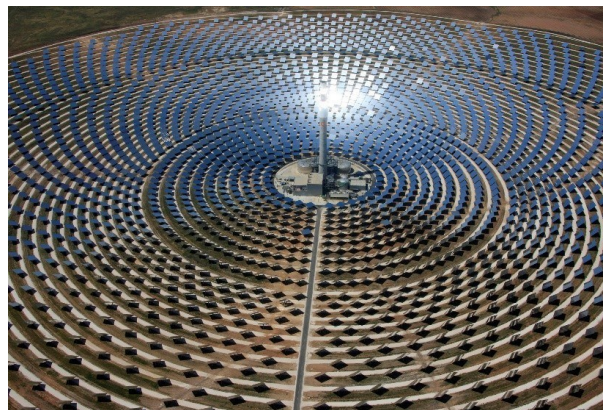


Figura 17: Geração de Energia Solar Concentrada.

- **Aquecimento e cozinha solar:** Em comunidades isoladas ou em projetos de sustentabilidade, conjuntos mais pequenos de helióstatos são utilizados em fogões e fornos solares industriais, na Figura 18. Ao direcionar os raios para uma panela ou câmara de isolamento, é possível cozinhar alimentos e ferver água sem gastar uma única gota de gás, eletricidade ou lenha.



Figura 18: Cozinha solar.

- **Pesquisa astronómica e Científica:** A Terra está constantemente a rodar, o que faz com que, para quem olha do chão, as estrelas e o Sol pareçam estar em movimento. Na astronomia os heliostatos são acoplados a telescópios e laboratórios fixos. Eles compensam a rotação do nosso planeta, garantindo que a luz dos astros em estudo seja captada de forma perfeitamente estável para os instrumentos de análise científica. Na Figura 19 mostra a diferença entre uma imagem captada com e sem a utilização do mecanismo do helióstato acoplado ao telescópio.



Figura 19: Imagem de telescópio com e sem mecanismo do helióstato.

- **Otimização de painéis solares fotovoltaicos:** Alguns sistemas fotovoltaicos avançados utilizam estes espelhos monitorizados instalados ao lado dos painéis fotovoltaicos comuns. Este é um sistema fotovoltaico aumentado por heliostatos, a função deste sistema é aumentar a concentração de raios solares, garantindo uma maior eficiência de produção de energia elétrica mesmo em dias mais nublados ou durante o início e o fim do dia, quando o Sol está mais fraco.

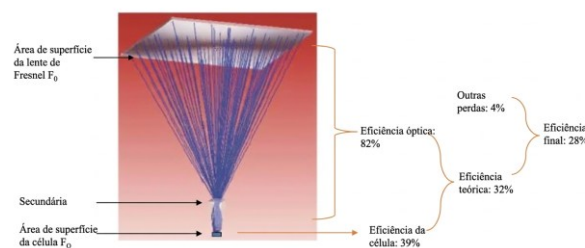


Figura 20: Sistema de otimização de painéis solares com heliostato.

(figura copiada de [11] e editada com IA)

Um dos exemplos mais fascinantes e humanos do uso desta tecnologia não está nas centrais elétricas, mas sim na arquitetura urbana. Duas pequenas localidades na Europa tornaram-se famosas no mundo inteiro ao usarem helióstatos para resolverem um problema geográfico severo, especificamente a escuridão total durante os meses de inverno. Devido à sua localização no fundo de vales muito profundos e cercados por montanhas altas, estas vilas passavam vários meses seguidos sem ver um único raio de Sol direto, vivendo numa constante de quase escuridão que afeta a saúde e o humor dos habitantes.

- **Viganella** (Itália): O helióstato de Viganella é um espelho gigante motorizado projetado para refletir a luz solar diretamente para a praça central de Viganella, um pequeno vilarejo alpino no norte da Itália. Devido à sua localização no fundo de um vale íngreme e cercado por montanhas de 1000 metros de altura, a vila fica completamente sem luz solar direta durante 83 dias seguidos no inverno, de 11 de novembro a 2 de fevereiro.



Figura 21: Viganella.

- **Rjukan** (Noruega): Rjukan é uma cidade industrial histórica situada num vale profundo na região de Telemark, Noruega. Seguindo o pioneirismo de Viganella, a cidade inaugurou em outubro de 2013 o seu próprio sistema de espelhos gigantes (chamado de Solspeil) para combater a escuridão do inverno. Devido às montanhas circundantes, como o pico Gaustatoppen (1.883 m), a cidade fica totalmente sem luz solar direta por cerca de seis meses, de setembro a março.



Figura 22: Rjukan.

Em ambos os casos o helióstato deixou de ser apenas uma ferramenta de produção energética para se tornar uma solução de bem-estar social, provando a versatilidade desta tecnologia.

3.4. A eficiência em função da posição do Sol e da posição do helióstato em relação ao recetor

Num seguidor solar fotovoltaico de dois eixos, a superfície fica constantemente orientada para o Sol aproveitando o máximo de energia possível, em que o ângulo de incidência (θ) é:

$$\cos(\theta) = 1 \quad (42)$$

ou:

$$\theta = 0^\circ \quad (43)$$

onde:

θ Ângulo de Incidência ($^\circ$)

Ter um ângulo de incidência igual a 0° significa que os raios solares estão a incidir na superfície na perpendicular.

Contudo, num helióstato, a superfície orienta-se para a bissetriz do ângulo formado entre a posição do Sol e a posição do recetor. O vetor normal à superfície de espelho é determinado pela combinação do vetor da direção solar e o vetor da direção do recetor, (39).

O ângulo de incidência corresponde ao valor do ângulo formado pelo vetor solar e a normal de espelho. A eficiência corresponde à área que é efetivamente refletida pelo helióstato e é reduzida pelo cosseno desse ângulo:

$$\cos(\theta) = \vec{S} \times \vec{N} \quad (44)$$

onde:

θ Ângulo de Incidência ($^\circ$)

$\vec{S}$ Vetor correspondente à direção do Sol (adimensional)

$\vec{N}$ Vetor correspondente à normal do espelho (adimensional)

Ao contrário dos painéis fotovoltaicos, onde se procura um ângulo de incidência nulo, no helióstato o valor do ângulo de incidência varia continuamente ao longo do dia e do ano em função da posição de Sol e da geometria relativa ao alvo. A Figura 23 demonstra como ocorrem estas perdas provocadas pelo efeito cosseno.

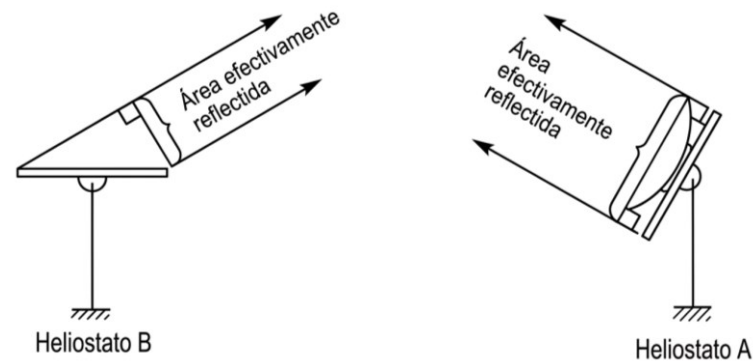


Figura 23: Efeito cosseno de dois heliostatos em direções opostas à torre.
(figura copiada de [12] e editada com IA)

Na Figura 24 é apresentada a eficiência anual de um sistema de SPC de torre de recetor central em relação ao efeito cosseno. Esta figura mostra que os heliostatos que estão a Norte da torre são mais eficientes pois a normal das suas superfícies refletoras estão quase na direção do recetor.

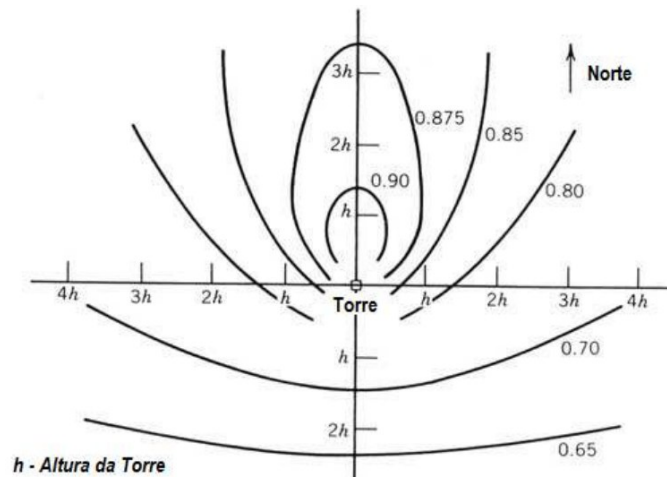


Figura 24: Eficiência anual de um campo de heliostatos com torre central em relação ao efeito cosseno.
(figura copiada de [12])

4. Conceção e construção de protótipo de helióstato

Este capítulo descreve a metodologia e os passos necessários para a realização do protótipo do helióstato.

Para orientar o desenvolvimento do projeto, foram estabelecidos alguns objetivos. O objetivo geral consiste no desenho, dimensionamento físico, construção e validação experimental do protótipo funcional de um helióstato de pequena escala.

Para alcançar o objetivo geral, o trabalho foi dividido nas seguintes metas:

- Estudar e compreender como prever a movimentação aparente do Sol ao longo de cada dia do ano através de equações astronómicas;
- Estudar sistemas mecânicos que permitam o protótipo fazer o seguimento do Sol de forma estável e precisa e as suas limitações;
- Projetar a estrutura física (base, mastro e suporte do espelho), recorrendo a ferramentas CAD, e garantir uma estrutura robusta, estável e sem folgas;
- Fazer estudo e escolha do material a ser utilizado na construção da estrutura tendo em conta o material disponível;
- Definir o tamanho do espelho a ser utilizado tendo em conta o tamanho da estrutura e as suas limitações mecânicas;
- Selecionar e dimensionar os atuadores elétricos como base no binário exigido pela estrutura em condições de operação;
- Implementar a eletrónica de controlo baseada em microcontrolador para o processamento das instruções de movimento;
- Implementar um módulo RTC para obter a data e hora e um módulo GPS para a aquisição das coordenadas geográficas;
- Integrar sensores para realizar a leitura da orientação do espelho garantido a máxima precisão;
- Desenvolver um algoritmo que seja capaz de calcular o movimento aparente do Sol em tempo real;
- Implementar a lógica matemática da Lei da Reflexão, convertendo o vetor de incidência do Sol e o vetor fixo do recetor no vetor normal da orientação do espelho;
- Desenvolver uma interface de monitorização através de um display LCD, que apresente as principais variáveis do sistema;
- Criar rotinas de calibração automática, a posição “*Home*”, para eliminar desvios angulares mecânicos acumulados durante as longas horas de operação do protótipo;
- Realizar a montagem e a cablagem do protótipo, isolando componentes eletrónicos sensíveis de potenciais danos mecânicos e térmicos.

- Realizar ensaios para medir a precisão angular dos movimentos do protótipo;

4.1. Estrutura

A concepção do protótipo baseou-se no princípio de rotação de dois eixos ortogonais, permitindo orientar o espelho em qualquer direção. Para a concepção deste mecanismo, utilizou-se como inspiração o sistema mecânico encontrado em câmaras de segurança do tipo PTZ, conforme ilustrado na Figura 25.

Este sistema mecânico consiste na rotação coordenada de dois eixos independentes:

- Eixo horizontal que é responsável pela rotação sobre o plano horizontal, permitindo que o helióstato acompanhe o movimento do Sol de Este para Oeste;
- Eixo vertical que é responsável pela inclinação vertical do espelho, ajustando-se à altura angular do Sol em relação ao horizonte;

Esta configuração de dois eixos garante os graus de liberdade necessários para que a normal do espelho acompanhe continuamente o ângulo entre o Sol e o recetor fixo, independentemente da época do ano ou da hora do dia.



Figura 25: Câmaras de segurança do tipo PTZ.

O planeamento inicial da estrutura do helióstato previa a construção de um protótipo robusto e resistente, dividindo a estrutura em três componentes principais:

- A base, destinada a garantir a estabilidade do conjunto e à proteção dos componentes eletrónicos mais sensíveis;
- O mastro, encarregue de elevar e dar mais espaço para o espelho poder se movimentar com mais liberdade;
- O suporte do espelho, componente fixado diretamente à superfície refletora e responsável por transmitir o movimento dos motores ao espelho;

Para estes componentes, o objetivo inicial consistia na utilização de tubos e chapas de alumínio devido à sua resistência mecânica, leveza e durabilidade à corrosão.

Contudo, durante o desenvolvimento do desenho 3D (visualizado na Figura 26) para o fabrico destes três componentes, foram surgindo algumas restrições técnicas associadas ao alumínio:

- A complexidade para trabalhar com este material, para além do nível de experiência exigido para fazer a sua manipulação;
- A necessidade de garantir o perfeito alinhamento entre as peças e rolamentos;
- A exigência de ferramentas indisponíveis;

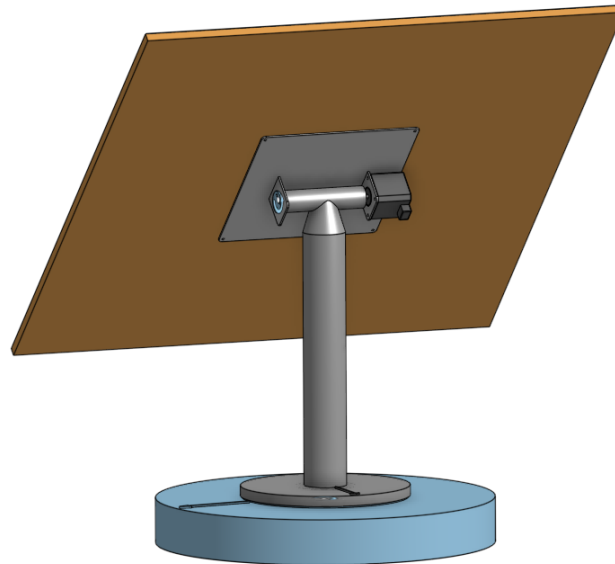


Figura 26: Esquema 3D da estrutura pretendida para o helióstato.

Face a estas limitações foi decidido fazer a reutilização de materiais descartados, mas com grande potencial.

Em substituição ao alumínio, optou-se pela desmontagem e reaproveitamento de componentes mecânicos do tambor de impressão de uma antiga impressora da EST que estava fora de serviço e entregue para sucata. Esta decisão não só contornou as barreiras de fabrico, como também foi anulado o risco de não ser obtido o nível de precisão necessário para o protótipo.

Do referido tambor de impressão foram retirados os seguintes materiais:

- Veios de aço e rolamentos que garantem movimentos suaves com pouco atrito e folgas mecânicas quase nulas;
- Rodas dentadas que permitem fazer a transmissão dos movimentos entre os vários componentes do protótipo;
- Suportes robustos e alinhados que desempenham o papel do mastro, de base e de suporte do espelho;

Para servir como base foi utilizada uma roda dentada de grandes dimensões e com uma massa considerável exigida para a função de alicerce, Figura 27. No centro geométrico deste componente tem um encaixe perfeito para acoplar o mastro.



Figura 27: Base do Helióstato.

Por sua vez, para o mastro foi utilizado um tubo de aço inox fixo na base, mostrado na Figura 28. É este componente que vai suportar o espelho e as partes móveis do protótipo e é no seu interior que passa a cablagem dos motores e sensores utilizados para fazer o comando do helióstato.



Figura 28: Mastro do Helióstato.

Para o suporte do espelho, ilustrado na Figura 29, foi utilizada mais uma roda dentada de grandes dimensões que foi trabalhada para permitir que o espelho execute uma maior amplitude de inclinação. Esta foi também complementada com três peças metálicas com perfil de 90° em que duas dessas peças suportam o veio de inox que suporta o espelho e a peça restante suporta o motor responsável por orientar a inclinação do espelho. No centro do suporte do espelho encontra-se encaixado um rolamento com a dimensão exata para ser encaixado no mastro,

assim ficamos com uma superfície que consegue fazer um movimento de rotação de 360° sem folgas e com atrito quase nulo que facilita o trabalho do motor utilizado para executar o controlo deste movimento horizontal.

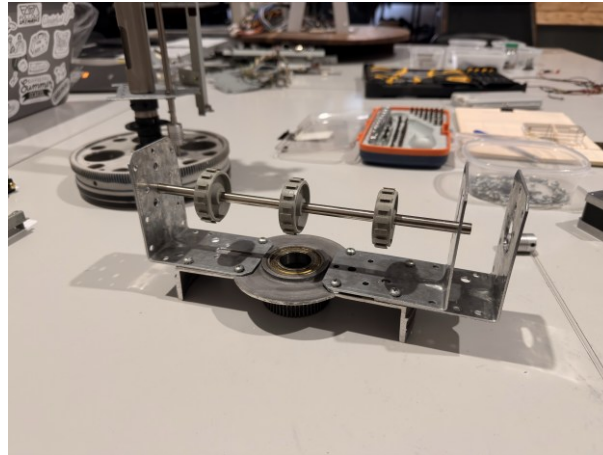


Figura 29: Suporte do espelho.

4.2. Componentes eletrónicos

Motor de passo

Para que o helióstato cumpra a sua função de refletir a luz solar para um alvo fixo, é necessário que os eixos mecânicos se movam com extrema precisão angular. Pequenos desvios na orientação do espelho resultam em centímetros ou até metros de desvio do feixe refletido com o aumento da distância entre o helióstato e o alvo. Neste contexto, dentro do conjunto de motores de corrente contínua os motores de passo foram selecionados. Enquanto os motores DC convencionais precisam de trabalhar em conjunto com sistemas mais complexos para controlar a sua posição, os motores de passo movem-se conforme um número de graus pré-definido. Portanto estes motores, ao receberem um sinal elétrico do microcontrolador, rodam um ângulo exato, permitindo um controlo altamente preciso e fiável.

Existem duas grandes categorias de motor de passo no mercado. Os unipolares e os bipolares, a diferença está na forma de como as suas bobinas internas são enroladas e alimentadas, ilustrado na Figura 30. A escolha entre estes dois tipos de motor vai ter impacto no binário disponível e na complexidade do circuito eletrónico.

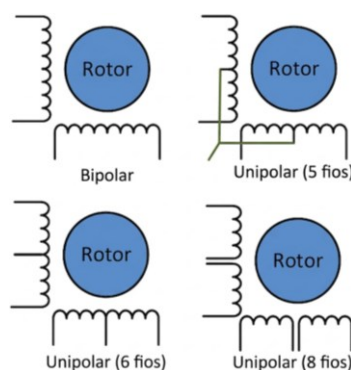


Figura 30: Esquema elétrico dos motores de passo.

Os motores unipolares possuem enrolamentos com uma derivação central em cada fase, apresentando entre 5 a 8 fios de ligação. Esta derivação é ligada diretamente ao polo positivo da fonte de alimentação e o controlo do movimento é feito ativando sequencialmente as bobinas ao polo negativo. Como a corrente circula sempre no mesmo sentido em relação à derivação central, o circuito de controlo eletrónico é muito simples, precisando apenas de transístores para comutar as bobinas. A desvantagem do motor unipolar é que a cada instante, apenas metade da bobina de cada fase está a ser percorrida por corrente elétrica e para gerar um campo magnético, isto resulta num torque significativamente menor ao de um motor bipolar do mesmo tamanho.

Já os motores bipolares possuem um único enrolamento por fase e sem derivações centrais, possuindo normalmente apenas 4 fios de ligação. Para fazer um motor deste tipo rodar é necessário alterar o sentido do campo magnético dos enrolamentos, o circuito de controlo tem de inverter fisicamente a polaridade da tensão aplicada nas extremidades das bobinas, isto exige a utilização de pontes H completas mostrado na Figura 31 ou algum componente que faça essa função. Como no motor bipolar todo o enrolamento da bobina é utilizado continuamente para gerar o campo magnético o seu binário é muito superior ao de um motor unipolar.

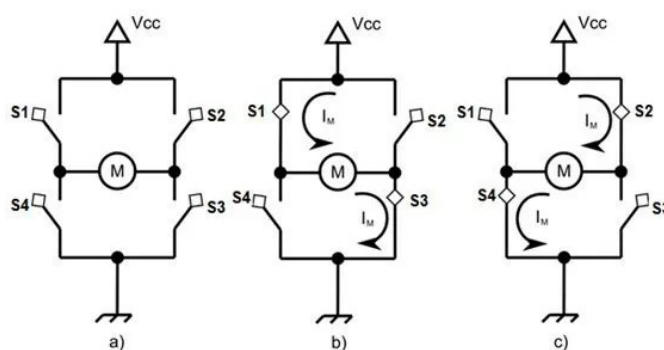


Figura 31: Ponte H.

Embora os motores unipolares sejam mais simples a nível eletrónico, o desenvolvimento de *drivers* de ponte H como o Drv8825, anulou esta vantagem de simplificação dos circuitos. Assim optou-se por um motor bipolar, que entrega um binário elevado e a retenção firme necessária para suportar o peso e algumas forças externas como vento exercido sobre o espelho, para assim garantir a precisão do helióstato.

O protótipo utiliza dois motores de passo bipolares do modelo JOY-IT NEMA17-04, mostrado na Figura 32. Um motor é encarregue do movimento Este-Oeste e o outro motor é encarregue do movimento de inclinação do espelho.

Este modelo de motor de passo é muito conhecido na indústria pois é muito utilizado em máquinas CNC, braços robóticos e impressoras 3D. Eles trabalham com uma tensão nominal de 3,3V e uma corrente nominal de 1,5 A, são do tamanho de um cubo de 42 mm de aresta com 300 gramas, ideais para serem implementados em locais com espaço limitado. Apesar do seu pequeno tamanho, o seu binário é

suficiente para suportar o espelho e fazer a estrutura rodar sem a preocupação de perder a orientação.



Figura 32: Motor de passo JOY-IT NEMA17-04

Para controlar o motor de passo é necessário dar uma ordem de quantos passos ele terá de realizar para rodar até à posição desejada. Como cada passo equivale a $1,8^\circ$, para o motor realizar uma volta completa de 360° , ele tem de executar 200 passos. Pela equação (45), [13]:

$$p = \frac{200}{360^\circ} = 1,8^\circ \quad (45)$$

onde:

p Passo angular ($^\circ$)

Habitualmente o motor de passo já oferece um excelente controlo. Contudo, para controlar o movimento de um heliostato é necessária uma maior precisão. Ao acoplar ao motor um driver de controlo de passo como o Drv8825, é possível ativar a funcionalidade de microstepping. Isto divide eletronicamente cada passo físico do motor, permitindo resoluções de $1/4$, $1/8$, $1/16$ e $1/32$.

Neste projeto a resolução utilizada foi de 16 micropassos por passo, pelo que, analisando a equação anterior, um passo de $1,8^\circ$ vai passar a ter $0,1125^\circ$, aumentando significativamente a precisão do motor.

$$p_{micro} = \frac{1,8^\circ}{16} = 0,1125^\circ \quad (46)$$

onde:

p_{micro} Micropasso angular ($^\circ$)

No eixo horizontal do espelho vai ser adicionado a este fator uma redução mecânica pelas rodas dentadas que vão transmitir o movimento do motor. Este par de rodas dentadas têm 28 e 56 dentes respetivamente, resultando uma relação de desmultiplicação de 1:2. Isto significa que, por cada volta completa que o motor realiza, o espelho vai rodar meia-volta. A resolução final de rotação do espelho vai ser duas vezes maior que a resolução do micropasso do motor.

Driver controlador de passos

O DRV8825 é um módulo controlador de motores de passo bipolar, amplamente utilizado em aplicações de automação, robótica, impressão 3D e máquinas CNC. A

sua principal função consiste em controlar a corrente fornecida às bobinas do motor de passo, permitindo um controlo preciso da posição, velocidade e sentido de rotação. Este módulo é capaz de alimentar motores com uma tensão entre 8,2 V e 45 V, fornecendo uma corrente contínua de até 2,5 A por fase, mas necessitando de uma dissipação térmica adequada. Uma função muito útil deste módulo é a sua capacidade de suportar diferentes modos de *microstepping*, permitindo dividir cada passo do motor em frações menores. O módulo suporta os modos de passo completo, meio passo, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 de passo, proporcionando um movimento mais suave, silencioso e preciso. A seleção do modo de funcionamento é realizada através dos pinos M0, M1, M2, conforme a configuração pretendida, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Formato de ligação *microstepping*.

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps/step
1	0	0	16 microsteps/step
1	0	1	32 microsteps/step
1	1	0	32 microsteps/step
1	1	1	32 microsteps/step

O controlo do motor é realizado utilizando apenas dois sinais digitais provenientes de um microcontrolador, tal como mostrado na Figura 33.

O sinal STEP (Passo) determina o avanço do motor, sendo que cada impulso elétrico corresponde a um incremento angular definido pelo modo de *microstepping* selecionado.

O sinal DIR (Direção), define o sentido de rotação do motor, permitindo alternar entre o sentido horário e o sentido anti-horário.

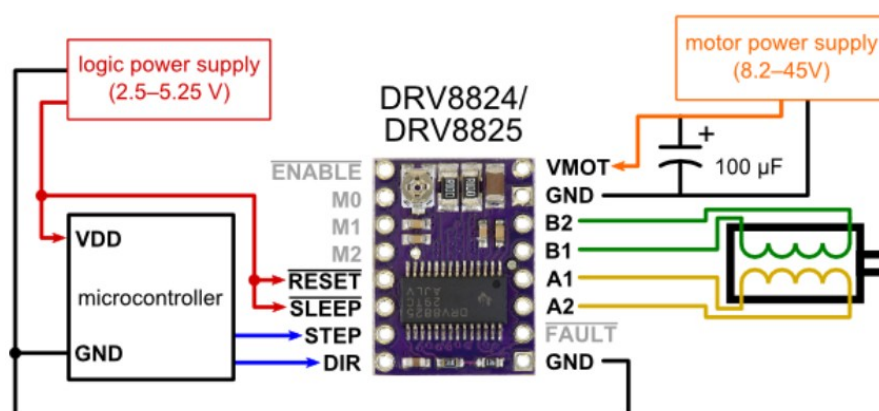


Figura 33: Esquema do DRV8825.
(figura copiada de [14])

Este driver incorpora mecanismos de proteção, muito importantes nos sistemas eletrónicos, como proteção contra sobrecorrente, sobretensão, subtensão da

alimentação e curto-circuito nas saídas, protegendo tanto o módulo como o motor em situações inesperadas.

Neste projeto o DRV8825 foi selecionado devido à sua elevada precisão e à facilidade de integração com vários microcontroladores, como o Arduino, e também por ter a capacidade de suportar a corrente necessária para controlar os motores escolhidos.

Microcontrolador Arduino Uno

O Arduino Uno é uma plataforma de desenvolvimento eletrónico de código aberto, muito utilizado no desenvolvimento de sistema de automação, robótica, instrumentação e montagens rápidas. Tem muita popularidade devido à facilidade de programação, baixo custo e elevada compatibilidade com uma grande variedade de sensores, controladores e módulos eletrónicos.

A placa é baseada no microcontrolador ATmega328P, um microcontrolador de 8 bits que trabalha a uma frequência de 16MHz. Este dispositivo possui memória Flash para armazenar o programa, memória SRAM para as variáveis temporárias e memória EEPROM para guardar os dados. O Arduino Uno pode ser alimentado através da porta USB ou por uma fonte de alimentação externa sendo utilizada uma tensão entre os 7 V e os 12 V.

Relativamente às entradas e saídas apresentadas na Figura 34, a placa dispõe de 14 pinos digitais, dos quais seis podem ser utilizados como saídas PWM, permitindo o controlo de velocidade de motores, intensidade luminosa de LEDs e outros dispositivos. Possui ainda 6 entradas analógicas, ligadas a um conversor analógico-digital de 10 bits, possibilitando a leitura de sinais analógicos com uma resolução de 1024 níveis.

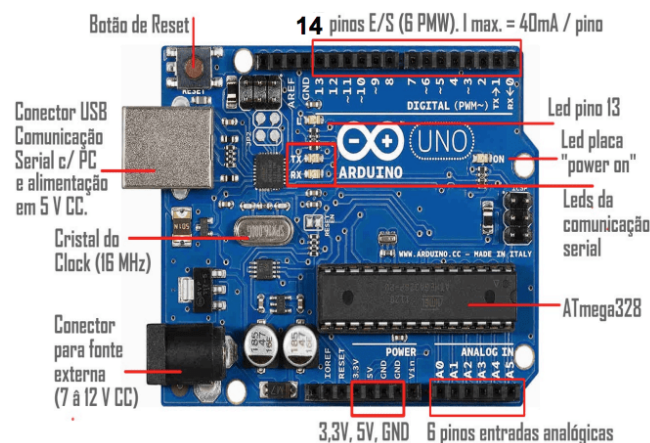


Figura 34: Pinos do Arduino.
(figura copiada de [15])

A programação do Arduino Uno é realizada através do Arduino IDE, utilizando uma linguagem baseada em C/C++, que disponibiliza um conjunto de bibliotecas que simplificam a comunicação com os sensores, motores, módulos de comunicação e outros periféricos. O programa desenvolvido é transferido para a placa através do

USB, que também permite a comunicação série entre o computador e o microcontrolador para monitorizar o programa em funcionamento.

Uma das principais vantagens do Arduino Uno consiste na sua compatibilidade com uma vasta gama de módulos e dispositivos externos, permitindo implementar sistemas de controlo de forma simples e modular. Além disso, a grande quantidade de documentos disponíveis e a grande comunidade de utilizadores facilitam o desenvolvimento de aplicações em diferentes áreas.

Neste projeto, o Arduino Uno faz a função de cérebro, responsável pela execução do programa desenvolvido, pela leitura dos sinais enviados pelos sensores e pelo envio dos sinais de comando para o módulo DRV8825, que controla o motor de passo. Produzindo os sinais STEP e DIR, o microcontrolador define a velocidade e a direção do motor.

Módulo RTC

O módulo RTC é um dispositivo eletrónico utilizado para manter uma contagem precisa da data e da hora, mesmo quando o sistema principal se encontra desligado ou sem alimentação. Para tal, o módulo possui uma pequena pilha do tipo botão de lítio, que assegura o funcionamento contínuo do relógio durante longos períodos na ausência de alimentação externa.

Os módulos RTC são muito utilizados em sistemas de recolha de dados, automação, domótica e aplicações de monitorização, onde é necessário ter o controlo do dia e das horas para garantir que determinadas ações sejam executadas em horários específicos.

No projeto este módulo desempenha uma função essencial, uma vez fornece ao Arduino Uno a informação relativa à data e à hora em tempo real. Estes dados são indispensáveis para a execução do programa que calcula a posição solar, permitindo determinar com precisão os parâmetros necessários para orientar corretamente o sistema de seguimento solar. A utilização do módulo RTC garante que os cálculos são efetuados com base na hora e data corretas, assegurando a precisão do posicionamento do protótipo ao longo do dia.

A comunicação entre o este módulo e o Arduino Uno é realizada através do protocolo I2C.

Como mostra a Figura 35, são utilizados apenas dois pinos para fazer esta comunicação. O pino DAS, responsável pela transição dos dados, e o pino SCL, responsável pela sincronização da comunicação. Esta interface simplifica a ligação ao microcontrolador, reduzindo o número de pinos necessários e permitindo a ligação simultânea de vários dispositivos em paralelo.



Figura 35: Módulo RTC.

Módulo GPS

O *Valleman* WPI 430 é um módulo que determina a sua posição geográfica através da receção de sinais provenientes de satélites de GPS. Este módulo é muito utilizado em aplicações de navegação, robótica, agricultura, localização de veículos e sistemas que requerem informação precisa sobre a localização. O módulo é capaz de determinar a latitude, longitude, altitude e a velocidade com elevada precisão. A comunicação com o microcontrolador é feita através da interface série UART, transmitindo periodicamente mensagem no formato NMEA 183, que contém toda a informação de posicionamento e navegação obtida pelos satélites.

Este módulo apresenta uma elevada sensibilidade, permitindo uma rápida aquisição de dados dos satélites e um desempenho fiável mesmo em certos ambientes onde o sinal GPS é parcialmente obstruído. O módulo incorpora ainda uma antena cerâmica e memória para armazenar os últimos dados recolhidos, reduzindo o tempo necessário para obter uma nova posição após a reinicialização forçada ou por uma falha na alimentação externa.

No protótipo, o módulo GPS desempenha um papel fundamental ao fornecer ao Arduino Uno as coordenadas geográficas do local de instalação do sistema, nomeadamente a latitude e a longitude. Estes parâmetros, em conjunto com a data e a hora fornecida pelo módulo RTC, integram as variáveis para o programa calcular a posição solar. A precisão destes dados é muito importante para calcular corretamente os ângulos de azimuth e de elevação solar, permitindo orientar o helióstato de forma precisa ao longo do dia.

A utilização deste módulo elimina a necessidade de configurar manualmente a localização do sistema tornando o helióstato mais autónomo e fácil de instalar em diferentes locais.

Figura 36: *Valleman* WPI 430.

Sensores Fim-de-Curso

Os sensores fim-de-curso são dispositivos eletromecânicos utilizados para detetar a posição limite de um mecanismo em movimento. Estes sensores atuam como interruptores alterando o seu estado quando são acionados por contacto mecânico, permitindo ao sistema de controlo identificar que uma determinada parte móvel atingiu uma posição limite que foi determinada.

Em sistemas que utilizam motores de passo, os sensores fim-de-curso desempenham uma função fundamental durante o processo de inicialização, normalmente chamada de “*Homing*”. Como os motores de passo controlam o movimento através de contagem de passos e não possuem um mecanismo que faz a leitura continua da sua posição, é necessário estabelecer uma posição de referência sempre que o sistema é ligado ou reinicializado. Desta forma, o controlador desloca cada eixo até ao respetivo fim-de-curso, definindo esse ponto como origem do sistema de coordenadas.

Os sensores utilizados neste projeto são do tipo *microswitch* industrial com alavanca Figura 37, sendo, portanto, muito fiáveis e muito fáceis de instalar. Cada sensor possui três terminais:

- COM que comuta alternadamente com os outros dois terminais;
- NO que está associado a um contacto que está normalmente aberto;
- NC que está associado a um outro contacto normalmente fechado.

O conjunto destes três terminais possibilita fazer uma configuração de acordo com a lógica de funcionamento pretendida pelo sistema de controlo.



Figura 37: *Microswitch* industrial com alavanca.

No protótipo, foi instalado um sensor de fim de curso em cada eixo do movimento do helióstato. Durante o arranque do sistema, o Arduino Uno aciona os motores de passo até que cada sensor seja acionado, estabelecendo assim uma posição de referência absoluta para ambos os eixos. Após este procedimento de calibração inicial, todos os movimentos passam a ser realizados relativamente a partir dessa origem, garantido que a posição calculada para acompanhar o movimento aparente do Sol corresponde à posição física real do mecanismo.

Display LCD

O display LCD 20 x 4 é um pequeno ecrã capaz de apresentar 20 caracteres por linha, distribuídos por quatro linhas, permitindo uma apresentação simultânea de

um considerável número de informações como mostra na Figura 38. Este tipo de display é muito utilizado em sistemas de automação devido à sua simplicidade de integração.

Neste projeto, o display constitui a principal interface entre o utilizador e o sistema de controlo, permitindo acompanhar em tempo real o funcionamento do helióstato sem a necessidade de recorrer a um computador. A comunicação com o Arduino Uno é realizada através de um adaptador baseado na comunicação I2C, reduzindo significativamente o número de pinos digitais necessários para a ligação do display, utilizando apenas as linhas SDA e SCL, ou seja, o display é ligado em paralelo com o módulo RTC.

A informação apresentada no display inclui os parâmetros mais importantes para o funcionamento do sistema. Entre estes destacam-se:

- A data (fornecida pelo módulo RTC);
- A hora (fornecida pelo módulo RTC);
- As coordenadas geográficas latitude e longitude (fornecidas pelo módulo GPS);
- A posição do Sol, representada pelos ângulos de azimuth e de elevação (calculados pelas equações executadas pelo programa);
- A orientação do espelho, correspondente à posição dos dois eixos do helióstato.



Figura 38: Display 20 x 4.

Buzzer

O buzzer é um dispositivo eletroacústico que converte sinais elétricos em sinais sonoros. É bastante utilizado em sistemas eletrónicos e de automação para fornecer avisos, alarmes ou confirmação da execução de determinadas operações.

Existem dois tipos de buzzer, o ativo e o passivo. O buzzer ativo possui um oscilador interno, produzindo um sinal sonoro quando é alimentado com uma tensão contínua. Por outro lado, o buzzer passivo necessita de um sinal elétrico alternado, normalmente gerado pelo microcontrolador através de um sinal PWM, permitindo controlar a frequência e, consequentemente o tom do som emitido.

O programa foi desenvolvido para atualizar a posição dos dados e da posição do espelho a cada 30 segundos, recalculando a posição do Sol e ajustando a orientação do espelho. No entanto, devido à pequena variação da posição solar durante um intervalo de tempo tão curto, os deslocamentos efetuados pelos motores de passo são de pequena amplitude, tornando o movimento do espelho praticamente imperceptível.

Para ultrapassar esta limitação, foi implementado um aviso sonoro através do *buzzer*, que emite um breve sinal acústico a cada atualização. Desta forma, é possível confirmar facilmente que o sistema continua em funcionamento, que os cálculos da posição solar estão a ser executados e que o helióstato está a atualizar a sua orientação, mesmo quando não é possível observar o movimento do espelho.



Figura 39: Buzzer passivo e ativo.

Alimentação

A alimentação elétrica constitui um dos fenómenos fundamentais para o correto funcionamento de qualquer sistema eletrónico, sendo responsável por fornecer energia estável e suficiente para todos os componentes que constituem o protótipo. Uma alimentação inadequada pode provocar instabilidade no funcionamento dos dispositivos, erros de comunicação entre os módulos e até danos permanentes em componentes eletrónicos.

No projeto foi utilizada uma fonte de alimentação ATX de computador, escolhida por fornecer a corrente necessária e disponibilizar diferentes tensões de saída. Este tipo de fonte disponibiliza tensões de 3V, 5V e 12V, permitindo alimentar simultaneamente os diferentes módulos eletrónicos utilizados no sistema.



Figura 40: Fonte de alimentação ATX de computador.

A tensão de 5V foi utilizada para alimentar o Arduino Uno, o display LCD, o módulo RTC e o módulo de GPS. A tensão de 12V foi utilizada para alimentar os módulos DRV8825, responsáveis pelo acionamento dos motores de passo. A separação das tensões de alimentação permitiu garantir que cada componente operasse dentro

das suas especificações, contribuindo para um funcionamento mais estável e seguro.

A escolha de uma fonte ATX apresentou ainda a vantagem de fornecer uma tensão regulada com baixo nível de ondulação e proteção interna contra sobre corrente, sobretensão e curto-circuito, aumentando a segurança dos circuitos eletrónicos.

Apesar da elevada estabilidade proporcionada pela fonte de alimentação, a presença de cargas indutivas provocadas pelos motores de passo, pode dar origem a variações rápidas de corrente e picos de tensão capazes de introduzir ruídos na alimentação elétrica do sistema. Para minimizar este efeito, foram utilizados três condensadores eletrolíticos de 100 μ F.



Figura 41: Condensador eletrolítico.

Dois dos condensadores foram instalados junto da alimentação dos módulos DRV8825, desempenhando a função de estabilizar a tensão da alimentação e absorver os picos de tensão gerados durante o acionamento dos motores de passo. Como as bobinas dos motores são cargas indutivas, as rápidas variações de corrente podem produzir sobretensões que afetam o funcionamento dos drivers. A instalação dos condensadores o mais próximo possível dos terminais da alimentação dos módulos permite reduzir significativamente estas perturbações sendo esta uma solução recomendada pelo fabricante do driver.

O terceiro condensador foi instalado na alimentação do display LCD, com o objetivo de reduzir pequenas oscilações na tensão e filtrar o ruído elétrico proveniente da alimentação comum do sistema. Desta forma contribui para uma alimentação mais estável do display e evitar que a apresentação da informação seja comprometida como mostra na Figura 42.



Figura 42: Ruído eletrónico num display LCD.

Ligação dos componentes

A integração dos diferentes componentes eletrônicos do helióstato é realizada através do Arduino Uno, que funciona como cérebro do sistema. O microcontrolador é responsável pela comunicação com os diferentes módulos, pela aquisição dos dados necessários ao funcionamento do sistema e pelo envio dos sinais de controlo aos dispositivos de atuação. A Figura 43 apresenta o esquema elétrico do sistema desenvolvido, onde estão representadas as ligações entre o Arduino Uno e os diferentes componentes que constituem o protótipo. O esquema permite ainda identificar as ligações de alimentação e de sinais entre os diferentes componentes, facilitando a compreensão das ligações elétricas do protótipo e servindo de referência para a montagem e verificação do circuito. A distribuição das ligações foi definida tendo em conta as funções desempenhadas por cada módulo e entradas e saídas disponíveis no Arduino Uno.

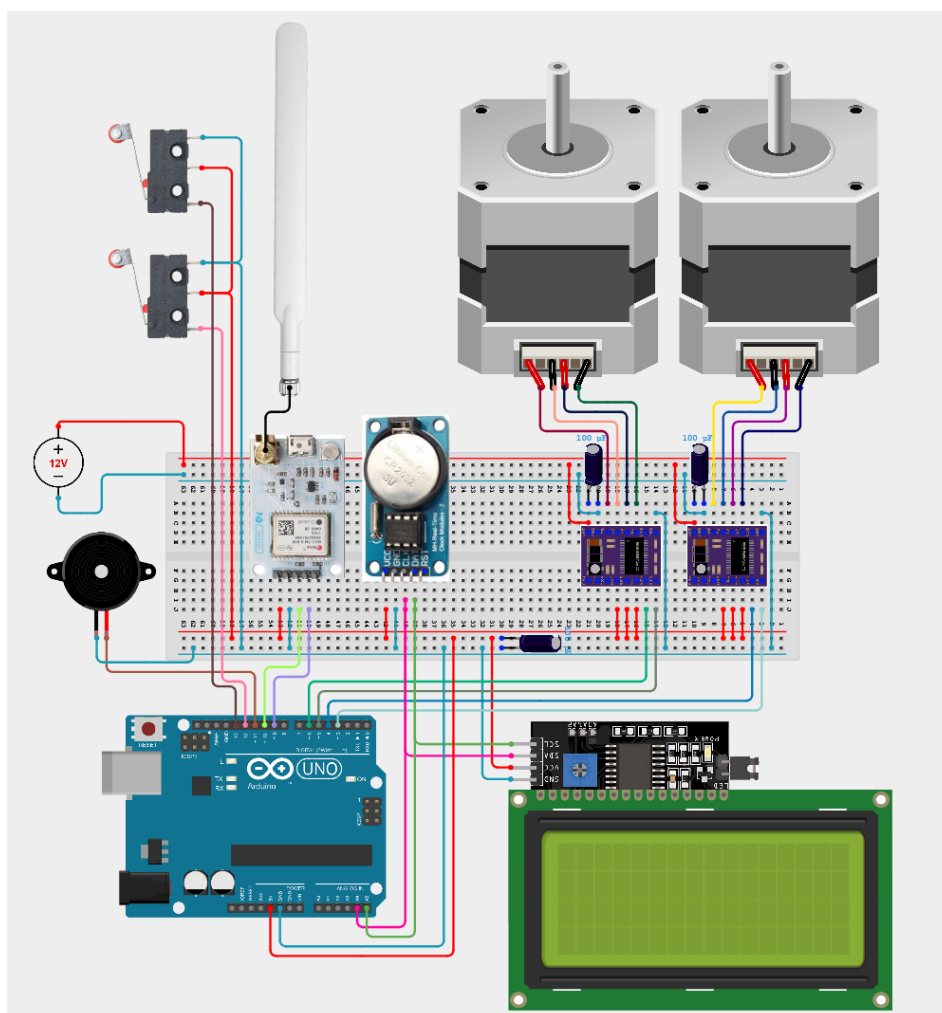


Figura 43: Esquema de ligações.

Para complementar o esquema elétrico, a Tabela 3 apresenta a distribuição dos pinos utilizados no Arduino Uno, indicando para cada componente o respetivo pino de ligação, o tipo de sinal e a função desempenhada. Esta tabela permite identificar de forma rápida as entradas e saídas utilizadas pelo programa e facilitar a manutenção e uma eventual alteração do sistema.

Tabela 3: Pinos de ligação.

Componente	Pino correspondente	Pino Arduino Uno	Tipo de sinal	Função
DRV8825 - Azimute	STEP	D6	Saída digital	Comando de passo
DRV8825 - Azimute	DIR	D5	Saída digital	Sentido de rotação
DRV8825 - Elevação	STEP	D4	Saída digital	Comando de passo
DRV8825 - Elevação	DIR	D3	Saída digital	Sentido de rotação
RTC	DAS	A4	Comunicação I2C	Dados
RTC	SCL	A5	Comunicação I2C	Horas
GPS	TX	D9	Entrada digital	Comunicação série
GPS	RX	D10	Entrada digital	Comunicação série
LCD 20*4	DAS	A4	Comunicação I2C	Dados
LCD 20*4	SCL	A5	Comunicação I2C	Seleção de registo
Buzzer	Sinal	D11	Saída digital	Sinal acústico
Fim-de-curso - Azimute	Sinal	D12	Entrada digital	Referência do eixo
Fim-de-curso - Elevação	Sinal	D13	Entrada digital	Referência do eixo

Programa

O programa desenvolvido para este projeto foi implementado na plataforma Arduino IDE, utilizando a linguagem de programação C++. A sua principal função consiste em integrar o funcionamento dos diferentes módulos processar os dados recolhidos e controlar a posição do helióstato de forma completamente autónoma.

O programa encontra-se organizado em diferentes blocos, responsáveis por:

- Inicialização dos dispositivos;
- Recolha de dados;
- Cálculo da posição solar;
- Controlo dos atuadores.

Durante o arranque do sistema, é realizada a configuração de todos os módulos utilizados, incluindo o relógio (RTC), o recetor GPS e os *drivers* controladores dos motores de passo. Nesta fase é também executado o procedimento de *homing*, em que, através dos sensores de fim-de-curso, o programa estabelece a posição de referência dos dois eixos de movimento.

Após a inicialização, o programa realiza a leitura da data e da hora através do módulo RTC e obtém as coordenadas geográficas fornecidas pelo módulo GPS. Estes dados constituem as variáveis de entrada das equações para calcular a posição do Sol, permitindo depois calcular os ângulos de azimute e de elevação da normal da superfície do espelho para refletir os raios solares diretamente para o alvo. Com base nos ângulos calculados o programa determina o deslocamento necessário para cada eixo do helióstato, convertendo os ângulos de rotação no número correspondente de passos dos motores. Os sinais de controlo STEP e DIR são então enviados para os drivers controladores, responsáveis pelo acionamento dos motores de passo.

O programa executa este processo de forma cíclica, atualizando os dados e a posição do helióstato a cada 30 segundos para acompanhar o movimento aparente do Sol ao longo do dia.

Em cada ciclo é calculada a altitude solar e sempre que esta assume um valor próximo a 0° , indicando que o Sol está a aproximar-se da linha do horizonte, o sistema interrompe o seguimento solar e executa automaticamente o procedimento de *homing*. Este procedimento desloca ambos os eixos até à posição em que o espelho fica na horizontal paralelo ao chão e virado para Sul, deixando o helióstato numa posição de repouso até o início do próximo ciclo de seguimento quando o Sol nascer.

Após o nascimento do Sol assim que a sua altitude for superior a 0° , o programa comanda os motores para que os dois eixos encontrem os sensores fim-de-curso para estabelecer novamente a posição de referência do mecanismo, para assim evitar erros de acumulação ao longo dos dias.

No entanto, devido a limitações mecânicas da estrutura, o eixo responsável pela elevação encontra-se limitado a um ângulo máximo de segurança de 15° . Assim sempre que o programa determinar uma altitude solar igual ou inferior a este valor, o movimento do helióstato é bloqueado e executado a função de *homing*, garantindo que o mecanismo trabalha dentro dos limites mecânico para os quais foi concebido e evitando esforços excessivos ou possíveis danos na estrutura ou no espelho.

5. Teste do helióstato

Após a conclusão do desenvolvimento e montagem do protótipo, foram realizados alguns testes com o objetivo de verificar o correto funcionamento dos módulos e validar experimentalmente os princípios apresentados nos capítulos anteriores. Os ensaios permitiram validar o comportamento dos diferentes componentes em trabalho conjunto, verificando a capacidade de o helióstato determinar e executar a orientação calculada para o espelho.

Os testes foram realizados de forma progressiva, começando pela verificação dos módulos necessários para realizar os cálculos do movimento aparente do Sol e da orientação do helióstato. Por fim, foram realizados ensaios ao funcionamento global do helióstato, sendo a movimentação dos dois eixos perante a orientação calculada para o espelho.

5.1. Testes do cálculo da posição solar e orientação do espelho

Para assegurar o correto funcionamento do programa de controlo do helióstato, procedeu-se à realização de testes no exterior para diferentes dias. Nestes ensaios avaliou-se a capacidade do programa em determinar com exatidão a posição aparente do Sol (azimute e elevação) e calcular os respetivos ângulos de inclinação do espelho necessários para refletir a radiação para o alvo.

Na Tabela 4 podemos observar os parâmetros utilizados no ensaio do dia 30 de junho de 2026 e na Tabela 5 estão apresentados os respetivos resultados para diferentes horas do dia.

Tabela 4: Parâmetros do ensaio no dia 30 de junho de 2026.

Parâmetro	Valor
Localização	Escola Superior da Tecnologia de Castelo Branco
Latitude	39° 54' 0"
Longitude	-7° 30' 0"
Data	30/06/2026
Azimute do alvo	0°
Altitude do alvo	00

Tabela 5: Resultados do ensaio no dia 30 de junho de 2026.

Hora	Elevação solar	Azimute solar	Elevação do espelho	Inclinação do espelho	Azimute do espelho
11:07:55*	55,13 ⁰	-72,41 ⁰	34,87 ⁰	65,78 ⁰	-24,92 ⁰
11:40:56*	61 ⁰	-63,27 ⁰	25,93 ⁰	64,07 ⁰	-63,27 ⁰
16:28:02*	49,72 ⁰	78,99 ⁰	30,59 ⁰	59,41 ⁰	29,46 ⁰
16:47:03*	46,12 ⁰	82,68 ⁰	29,24 ⁰	60,76 ⁰	32,28 ⁰



Figura 44: Ensaio do dia 30 de junho 2026, às 11:07:55*.

Na Tabela 6 podemos observar os parâmetros utilizados no ensaio do dia 2 de julho de 2026 e na Tabela 7 estão apresentados os respectivos resultados para diferentes horas do dia.

Tabela 6: Parâmetros do ensaio no dia 2 de julho de 2026.

Parâmetro	Valor
Localização	Escola Superior da Tecnologia de Castelo Branco
Latitude	39° 54' 0"
Longitude	-7° 30' 0"
Data	02/07/2026
Azimute do alvo	0 ⁰
Altitude do alvo	0 ⁰

Tabela 7: Resultados do ensaio no dia 2 de julho de 2026.

Hora	Elevação solar	Azimute solar	Elevação do espelho	Inclinação do espelho	Azimute do espelho
14:49:19*	66,84 ⁰	49,22 ⁰	35,45 ⁰	54,55 ⁰	13,33 ⁰
16:58:30*	43,91 ⁰	84,46 ⁰	28,31 ⁰	61,69 ⁰	33,84 ⁰

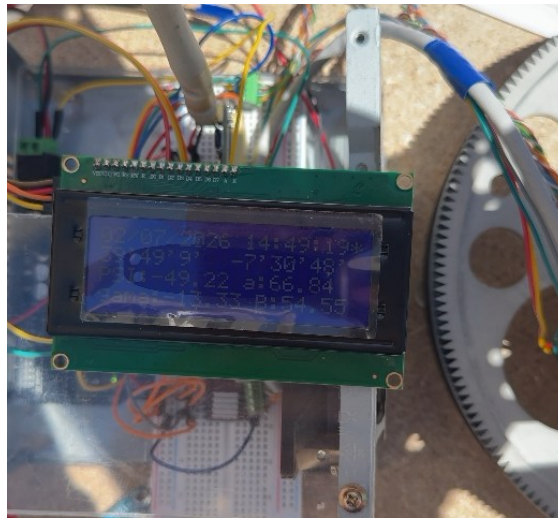


Figura 45: Ensaio do dia 2 de julho 2026, às 14:49:19*.

Apesar de os valores não serem exatamente iguais nos diferentes dias de ensaio, verifica-se que as medições realizadas em horários próximos apresentam resultados semelhantes. As diferenças observadas são consistentes com a variação da posição aparente do Sol ao longo dos dias, confirmando um comportamento normal dos cálculos realizados pelo sistema.

5.2. Testes global do helióstato

8Após a verificação dos resultados obtidos através dos cálculos da posição aparente do Sol e da orientação do espelho, foi realizado um teste global ao funcionamento do helióstato. O objetivo deste ensaio consistiu em verificar o funcionamento do sistema e confirmar se os valores de orientação calculados pelo programa eram corretamente convertidos nos movimentos executados pelos motores de passo.

Este ensaio permitiu avaliar o funcionamento dos diferentes elementos que constituem o sistema em conjunto, desde a recolha da informação necessária para os cálculos até ao posicionamento físico do espelho.

No dia 07 de julho de 2026 foi realizado o respetivo ensaio global do helióstato. Os parâmetros encontram-se apresentados na Tabela 8, enquanto os valores

calculados pelo programa para a posição do Sol e para a orientação do espelho são apresentados na Tabela 9:

Tabela 8: Parâmetros do ensaio no dia 7 de julho de 2026.

Parâmetro	Valor
Localização	Escola Superior da Tecnologia de Castelo Branco
Latitude	39° 54' 0"
Longitude	-7° 30' 0"
Data	7/07/2026
Azimute do alvo	0°
Altitude do alvo	0°

Durante o ensaio, o programa realizou o cálculo da posição aparente do Sol e determinou a orientação necessária para o espelho. Os resultados obtidos são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 9: Resultados do ensaio no dia 7 de julho de 2026.

Hora	Elevação solar	Azimute solar	Elevação do espelho	Inclinação do espelho	Azimute do espelho
11:13:39*	55,58°	-70,47°	32,34°	57,66°	-24,13°

Com base na posição calculada do Sol e na posição definida para o alvo, o programa determinou os valores necessários para orientar o espelho. Os resultados obtidos indicam uma elevação de 32,34° ou uma inclinação do espelho de 57,66° e um azimute de -24,13°.

Na Figura 46, apresenta os valores calculados pelo programa e apresentados no display LCD durante a realização do ensaio.



Figura 46: Ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.

Após realização de todos os cálculos necessários, o programa converte os valores correspondentes à orientação do espelho no número de micropassos necessários para o posicionamento dos motores de passo. Desta forma, os valores angulares calculados são convertidos em comandos que permitem movimentar fisicamente os dois eixos do helióstato.

A Figura 47 apresenta a posição física do espelho aproximada relativamente ao eixo de elevação:

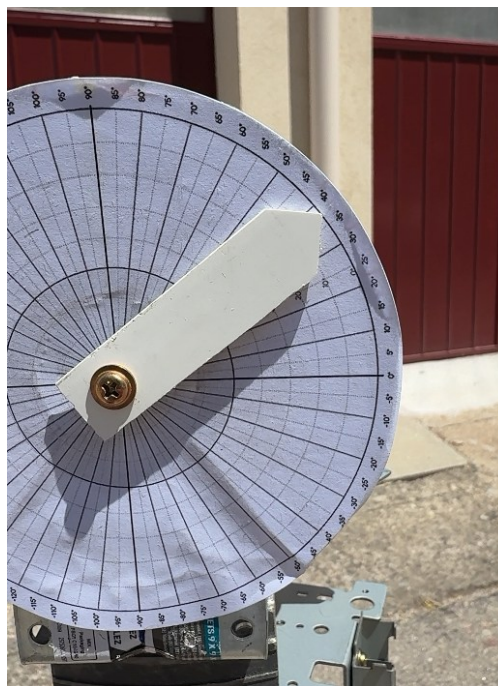


Figura 47: Elevação do espelho, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.

A Figura 48 apresenta a orientação física aproximada do espelho relativamente ao eixo de azimute:

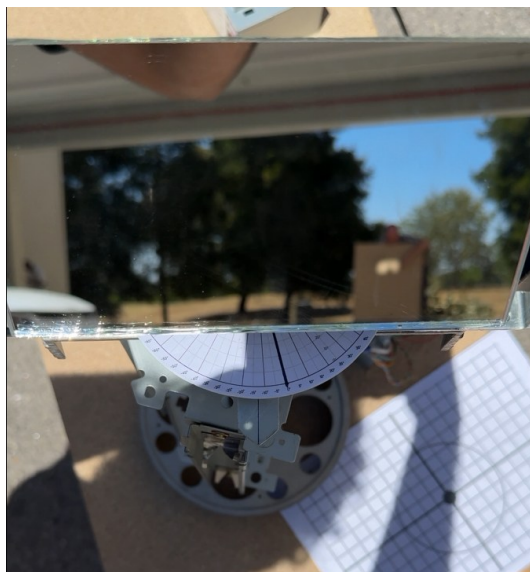


Figura 48: Azimute do espelho, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.

Os resultados obtidos demonstram assim, o funcionamento e a capacidade de o heliostato transformar os valores calculados nos movimentos físicos dos dois eixos de orientação do espelho.

Na Figura 49 é possível observar o alvo iluminado pelo heliostato:

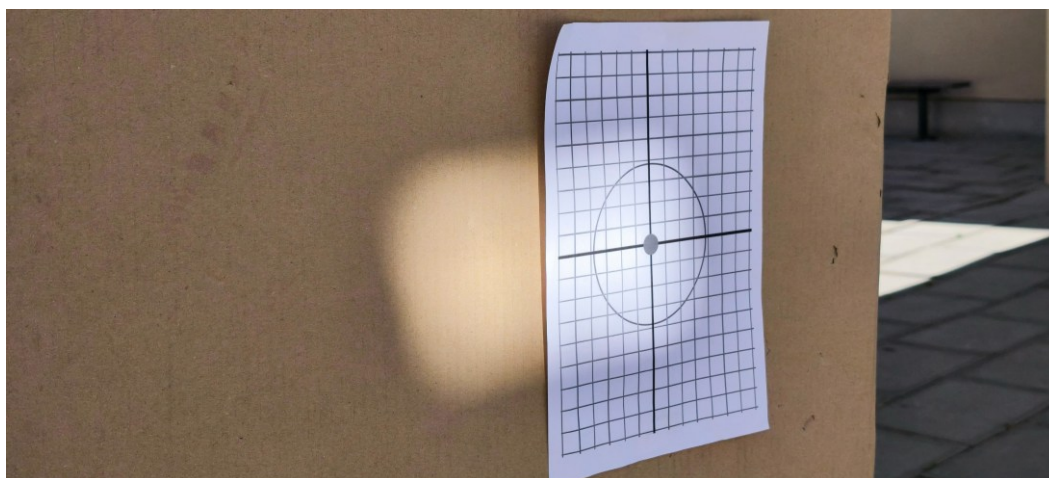


Figura 49: Alvo iluminado pelo heliostato, ensaio do dia 7 de julho 2026, às 11:13:39*.

Neste e nos restantes ensaios realizados, a posição do alvo foi definida relativamente ao heliostato por um azimute de 0° e uma elevação de 0° . De acordo com o sistema de coordenadas, esta posição corresponde a um alvo localizado exatamente a Sul do heliostato e à mesma altura do espelho. Uma vez que a orientação do alvo é definida apenas através dos seus ângulos de azimute e elevação, a distância entre o heliostato e o alvo não influencia os cálculos de orientação realizados pelo sistema.

Na Figura 50, é possível observar o protótipo finalizado e em pleno funcionamento, destacando-se no reflexo do espelho a projeção da radiação solar a incidir diretamente no alvo.

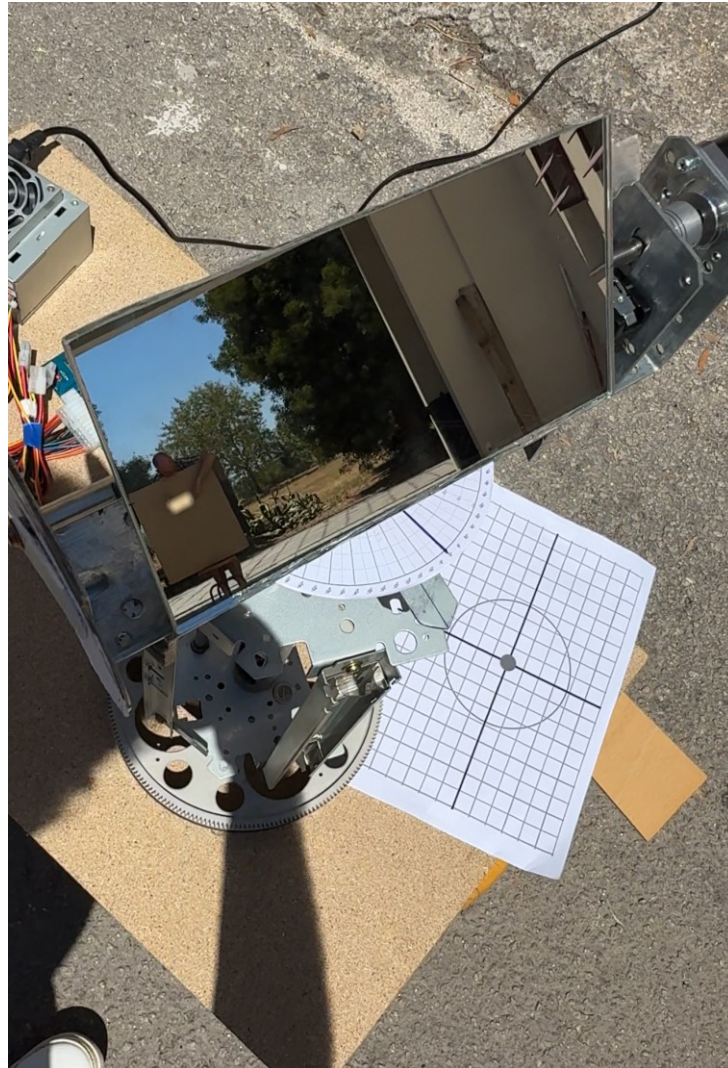


Figura 50: Protótipo finalizado e em funcionamento.

6. Conclusões

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e implementação de um protótipo de um helióstato capaz de acompanhar o movimento aparente do Sol e orientar um espelho de forma a refletir a radiação solar para um alvo com uma posição previamente definida.

Ao longo do desenvolvimento do projeto foram abordadas diferentes áreas, como a eletrônica, a programação, a mecânica e equações astronômicas necessária para determinar a orientação do espelho.

De seguida, foi desenvolvido o sistema responsável pelo funcionamento automático do helióstato, permitindo realizar os cálculos necessários para determinar a posição aparente do Sol e atualizar periodicamente a orientação do espelho. Os valores obtidos através destes cálculos foram posteriormente convertidos nos movimentos necessários para controlar os dois eixos de orientação do sistema.

Paralelamente ao desenvolvimento do sistema de controlo, foi concebida a estrutura mecânica do protótipo, responsável por suportar o espelho e permitir o seu movimento nos eixos necessários à sua orientação. Esta etapa envolveu o desenvolvimento e montagem dos diferentes elementos que constituem a estrutura do helióstato, garantindo o funcionamento entre os sistemas eletrónico e mecânico.

Os ensaios realizados permitiram avaliar o funcionamento do protótipo e os resultados obtidos demonstraram a exatidão do cálculo da posição aparente do Sol, verificando-se que para horas próximas nos diferentes dias de ensaio, os valores calculados apresentavam também resultados semelhantes. Também foi verificada a capacidade de o sistema converter os ângulos da orientação nos movimentos necessários para os motores de passo posicionarem fisicamente o espelho de acordo com os resultados obtidos pelo programa.

6.2. Apreciação

De forma geral, o trabalho desenvolvido permitiu alcançar os objetivos inicialmente definidos para o projeto.

Foi possível desenvolver e implementar um sistema capaz de aplicar os cálculos necessários para determinar a orientação do espelho.

Os ensaios realizados permitiram verificar o funcionamento do sistema e demonstrar a capacidade de converter os valores de orientação calculados pelo programa em movimentos dos motores de passo.

O projeto permitiu ainda aplicar conhecimentos em diferentes áreas necessários para o desenvolvimento de um sistema deste tipo.

6.3. Dificuldades e limitações

Durante o desenvolvimento do projeto foram encontradas algumas dificuldades, principalmente relacionadas com a construção e montagem da estrutura mecânica do protótipo.

Uma das principais dificuldades consistiu no trabalho com as peças meáticas e na realização de furos com a precisão necessária para garantir o alinhamento dos motores de passo com os respetivos eixos.

Outra dificuldade esteve relacionada com o corte do espelho a ser utilizado. Esta foi uma tarefa nova, uma vez que não existia experiência neste tipo de trabalho, tendo sido necessário aprender e errar algumas vezes para finalmente fazer o corte adequado.

Por fim uma das dificuldades que continua a exigir atenção constante, é o alinhamento do protótipo com o eixo Norte-Sul magnético no momento da sua instalação. Uma correta orientação da estrutura é muito importante para garantir que o sistema de coordenadas utilizado nos cálculos corresponde à orientação física do helióstato pelo que se recomenda a utilização de uma bússola.

6.4. Melhorias futuras

Para um desenvolvimento futuro, seria interessante realizar melhorias na estrutura mecânica do helióstato, permitindo aumentar a amplitude de movimento do eixo de elevação do espelho.

Poderia também ser instalado um módulo de bússola, facilitando a instalação, não havendo a necessidade de fazer o alinhamento manual do protótipo com o eixo Norte-Sul e aumentar significativamente a precisão do helióstato. Contudo, a utilização de uma bússola magnética nas proximidades do protótipo é sempre uma fonte de problemas devido às interferências sofridas pela mesma.

Outra melhoria seria a implementação de comunicação sem fios, permitindo estabelecer a comunicação entre o helióstato e um dispositivo externo que permita fazer a monitorização do sistema e facilitar a consulta de informações calculadas pelo programa à distância.

Uma melhoria interessante consiste na implementação de um sistema de controlo manual através de um *joystick*, através do qual se poderia orientar o sistema em direção ao alvo pretendido e, desta forma, definir e guardar os valores correspondentes ao vetor de posição do alvo, facilitando a configuração inicial do helióstato.

6.5. Conclusão final

Este trabalho permitiu aprofundar os conhecimentos relacionados com o cálculo da posição solar e com os princípios geométricos necessários para determinar a orientação de um helióstato.

Os resultados obtidos durante os ensaios realizados permitiram verificar o funcionamento do sistema, desde o cálculo contínuo da posição aparente do Sol, até ao posicionamento físico do espelho de forma a refletir sobre o alvo os raios solares incidentes nele incidentes.

Este projeto demonstra assim, a importância e o potencial dos sistemas de seguimento solar no aproveitamento da energia solar como fonte de energia renovável.

Bibliografia

- [1] Britannica, “How Far Is the Sun from Earth?,” Encyclopædia Britannica, Inc., 2026. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/topic/How-Far-Is-the-Sun-from-Earth>. [Acedido em 21 Junho 2026].
- [2] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, 1983, p. 390.
- [3] M. U. A. M. H. Md. Shariful Alam Emon, “ScienceDirect,” RELX, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128239599000118>. [Acedido em 21 Junho 2026].
- [4] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, 2ª edição ed., Academic Press, 2014.
- [5] N. Mee, “Plus Bringing Mathematics to Life,” University of Cambridge, 1 12 2009. [Online]. Available: <https://plus.maths.org/how-long-day>. [Acedido em 07 07 2026].
- [6] A. E. Tutorials, “Solar Panel Orientation and Positioning,” Alternative Energy Tutorials, 2010. [Online]. Available: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/solar-panel-orientation.html>. [Acedido em 08 07 2026].
- [7] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Oxford, UK: Academic Press, 2014.
- [8] R. P. W. Stieglitz, “Springer Nature Link,” Springer Nature, 02 04 2024. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-43173-9_2. [Acedido em 13 07 2026].
- [9] A. S. M. A. A. T. G. H. a. A. M. Q. W. M. Hamanah, “Dual-Axis Tracking Electrical Drives for Solar Power Tower,” vol. No.19, Dhahran, 31261, KSA. Atlanta, GA, 30332, USA., Department of Electrical Engineering, King Fahd University for Petroleum and Minerals, School of Electrical and Computer Engineering, K.A.CARE Energy Research & Innovation Center (ERIC), King Fahd University for Petroleum and Minerals, 2021.
- [10] A. D. Silvestre, “Desenvolvimento de um Heliostato para Geração Heliotermica em Torres Solares,” Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- [11] Niclas, “Sino Voltaics,” 2016. [Online]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-panels/hcpv-heliostat-concentrator-photovoltaic-concentrated-solar-power/>. [Acedido em 09 09 2026].

- [12] J. V. C. d. S. Eustáquio, “Simulação e análise do comportamento do campo de heliostatos de uma central de concentração solar termoelectrica de receptor central,” Dissertacao do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [13] M. F. d. C. Chouzal, “Controlo Digital de Motores de Passo-a-Passo,” Faculdade de Engenharia da Univesidade do Porto, Porto, 1991.
- [14] Ceduq, “Arduino Forum,” 1 Outubro 2019. [Online]. Available: <https://forum.arduino.cc/t/controlling-stepper-motor-with-a-drv8825-driver/615920>. [Acedido em 23 Julho 2026].
- [15] M. Elétronica, “Arduíno: Uma Ideia Genial,” 7 Setembro 2018. [Online]. Available: <https://blog.moduloeletronica.com.br/arduino-uma-ideia-genial/>. [Acedido em 23 Julho 2026].
- [16] C. D. H. Arias, “Diseño e Implementacion de un Prototipo de Heliostato Para La,” Trabalho de Projeto Final , nilversidad de Pamplona Facultad de Ingenieria en Mecatrónica Departamento de Ingenleria MecAnica, Mecatrónica e Industrial Facultad de Ingenieria y Arquitecturas. Villa del Rosario, 2019.
- [17] M. B. Mendes, “Solar Tracking System design based on Astronomical Equations,” Trabalho de Projeto Final, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, 2023.
- [18] P. C. Martins, “Relatório de atividade profissional,” Especialização em Física e Química, Universidade do Minho, 2016.
- [19] T. Instruments, “DRV8825 Stepper Motor Controller IC,” Texas Instruments, 2014.
- [20] T. T. A. C. T. S. A. S. N. M. T. M. S. A. W. P. N. K. S. N. ., H. K. T. Y. Nuttee Thungsuk, “MDPI,” 23 08 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/5869>. [Acedido em 09 09 2026].
- [21] J. V. C. d. S. Eustáqui, “Simulacao e analise do comportamento do campo,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertacao do Mestrado Integrado em Engenharia Mecanica, 2011.

ANEXOS

Lista de componentes adquiridos para o desenvolvimento do Helióstató

Componente	Unidades
Microcontrolador Arduino UNO R3	1
Módulo RTC (relógio de tempo real) de precisão DS3231 - I2C	1
Velleman WPI430 - Módulo GPS U-Blox NEO-7M	1
Display LCD 20x4 I2C LED azul - SBC-LCD20X4	1
Módulo I2C para Display LCD	1
Placa de ensaio "Bread Board" de 830 contactos	1
JOY-IT NEMA17-04 - Motor Stepper passo-a-passo NEMA 17 (42mm)	2
Driver para Motor Passo-Passo 2.2A (DRV8825)	2
Highly Z15G1701 - Microswitch industrial com alavanca 63.5mm SPDT 20A/250VAC	2
Condensador eletrolítico 100uF 16V	3
Buzzer passivo 5V	1
Módulo de alimentação para Breadboards 3.3V/5V + USB 700mA - MB102	1
Fonte de alimentação 12V	1
Espelho retangular	1
Esquadro angular 90°	3
Pé de borracha adesivo	4
Conector DC macho jack	1
Ventoinha cooler DC 12v	1

Ficha técnica Arduino Uno R3



Arduino® UNO R3

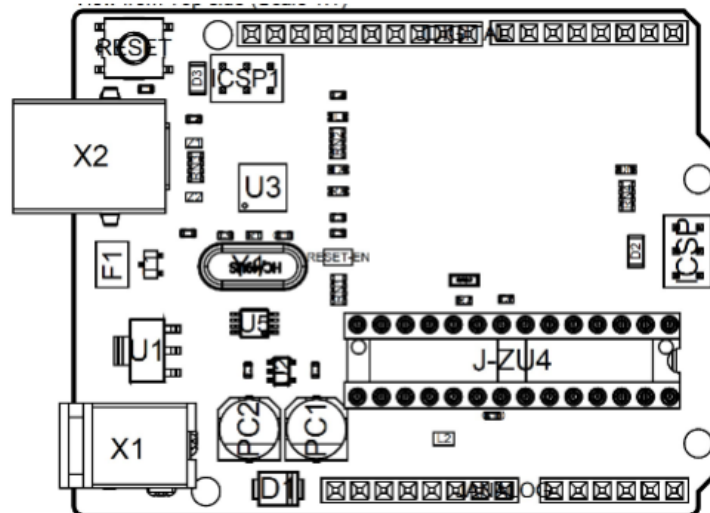
2.2 Power Consumption

Symbol	Description	Min	Typ	Max	Unit
VINMax	Maximum input voltage from VIN pad	6	-	20	V
VUSBMax	Maximum input voltage from USB connector	-	-	5.5	V
PMax	Maximum Power Consumption	-	-	xx	mA

3 Functional Overview

3.1 Board Topology

Top view



Board topology

Ref.	Description	Ref.	Description
X1	Power jack 2.1x5.5mm	U1	SPX1117M3-L-5 Regulator
X2	USB B Connector	U3	ATMEGA16U2 Module
PC1	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	U5	LMV358LIST-A.9 IC
PC2	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	F1	Chip Capacitor, High Density
D1	CGRA4007-G Rectifier	ICSP	Pin header connector (through hole 6)
J-ZU4	ATMEGA328P Module	ICSP1	Pin header connector (through hole 6)
Y1	ECS-160-20-4X-DU Oscillator		

Ficha técnica do Módulo RTC

Rev 2, 6/03



Extremely Accurate I2C-Integrated
RTC/TCXO/Crystal

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I2C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I2C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of VCC to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the RST pin is monitored as a pushbutton input for generating a reset externally.

Applications

Servers Utility Power Meters
Telematics GPS

Pin Configuration appears at end of data sheet.

Features

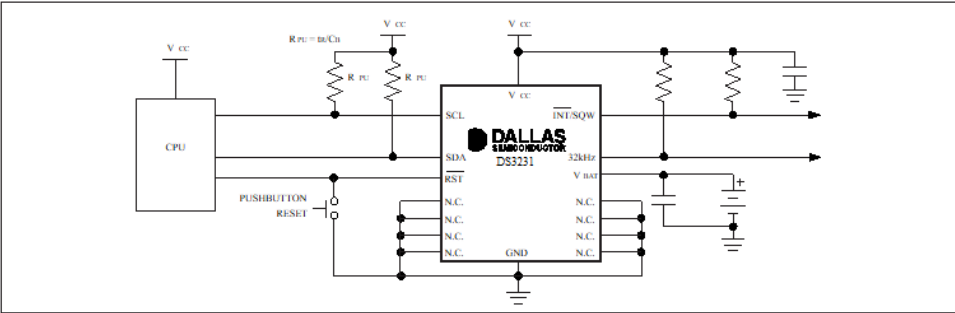
- ♦ Accuracy ±2ppm from 0°C to +40°C
- ♦ Accuracy ±3.5ppm from -40°C to +85°C
- ♦ Battery Backup Input for Continuous Timekeeping
- ♦ Operating Temperature Ranges
Commercial: 0°C to +70°C
Industrial: -40°C to +85°C
- ♦ Low-Power Consumption
- ♦ Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Day, Date, Month, and Year with Leap Year Compensation Valid Up to 2100
- ♦ Two Time-of-Day Alarms
- ♦ Programmable Square-Wave Output
- ♦ Fast (400kHz) I2C Interface
- ♦ 3.3V Operation
- ♦ Digital Temp Sensor Output: ±3°C Accuracy
- ♦ Register for Aging Trim
- ♦ RST Input/Output
- ♦ UL Recognized

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	TOP MARK
DS3231S	0°C to +70°C	16 SO	DS3231
DS3231SN	-40°C to +85°C	16 SO	DS3231N
DS3231S+	0°C to +70°C	16 SO	DS3231+
DS3231SN+	-40°C to +85°C	16 SO	DS3231N+

+Denotes lead-free

Typical Operating Circuit



Purchase of I2C components from Maxim Integrated Products, Inc., or one of its sublicensed Associated Companies, conveys a license under the Philips I2C Patent Rights to use these components in an I2C system, provided that the system conforms to the I2C Standard Specification as defined by Philips.



Maxim Integrated Products

1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

DS3231

Ficha técnica Velleman WPI430 - Módulo GPS U-Blox NEO-7M

VMA430

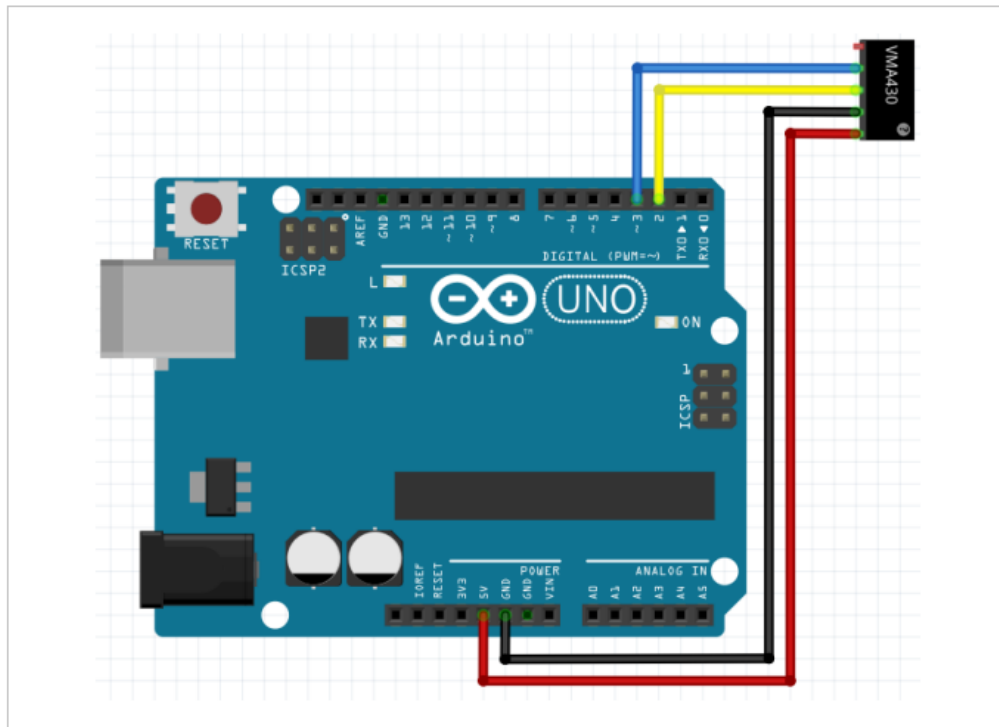
5. Overview

VMA430

The NEO-7 series of standalone GNSS modules is built on the exceptional performance of the U-BLOX 7 GNSS (GPS, GLONASS, QZSS and SBAS) engine. The NEO-7 series delivers high sensitivity and minimal acquisition times in the industry proven NEO form factor.

operating voltage: 3.3 V to 5 V (or by USB cable)
 connections: VCC (+5 V), GND (ground), TX, RX, PPS (time pulse)
 default baud rate: 9600 bps
 dimensions: 4 x 2.5 x 1.5 cm
 weight: 15 g

6. Connection



7. Example

Library and examples can be found at https://github.com/Velleman/VMA430_GPS_Module.

Ficha técnica do Motores de Passo



Stepper Motor NEMA 17

This document describes mechanical and electrical specifications for PBC Linear stepper motors; including standard, hollow, and extended shaft variations.

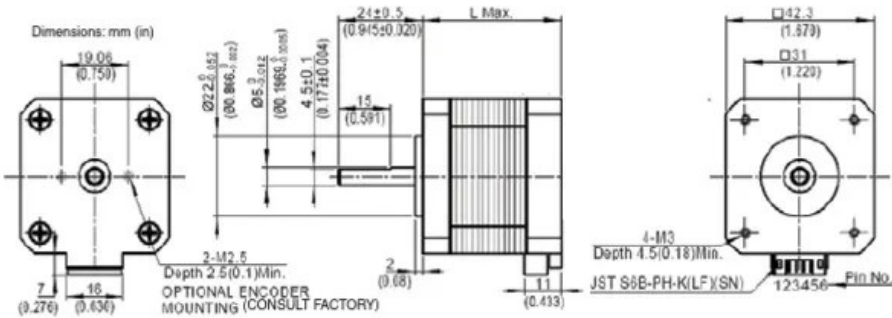


Standard shaft motor shown.

Phases	2
Steps/Revolution	200
Step Accuracy	±5%
Shaft Load	20,000 Hours at 1000 RPM
Axial	25 N (5.6 lbs.) Push 65 N (15 lbs.) Pull
Radial	29 N (6.5 lbs.) At Flat Center
IP Rating	40
Approvals	RoHS
Operating Temp	-20° C to +40° C
Insulation Class	B, 130° C
Insulation Resistance	100 MegOhms

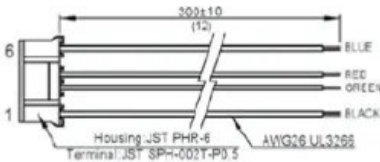
Description	Length	Mounted Rated Current	Mounted Holding Torque	Winding Ohms	mH	Detent Torque	Rotor Inertia	Motor Weight
(Stack)	"L" Max	Amps	Nm oz-in Typ.	±10% @ 20°C Typ.	mNm oz-in	mNm oz-in	g cm2 oz-in2	kg lbs
Single	39.8 mm (1.57 in)	2	0.48 68	1.04 2.2	15 2.1	57 0.31	0.28 0.62	
Double	48.3 mm (1.90 in)	2	0.63 89	1.3 2.9	25 3.5	82 0.45	0.36 0.79	
Triple	62.8 mm (2.47 in)	2	0.83 120	1.49 3.8	30 4.2	123 0.67	0.6 1.3	

*All standard motors have plug connector. Consult factory for other options.



Standard shaft dimensions shown. All other dimensions apply to hollow and extended shaft options.

Dimensions: mm (in)
4 Lead Connector, PBC Part#6200490
(Consult factory for optional motor connectors)



Ficha técnica dos Drivers Controladores de Motor de Passo - DRV8825

Product
FolderSample &
BuyTechnical
DocumentsTools &
SoftwareSupport &
Community

DRV8825

SLVSA73F – APRIL 2010 – REVISED JULY 2014

DRV8825 Stepper Motor Controller IC

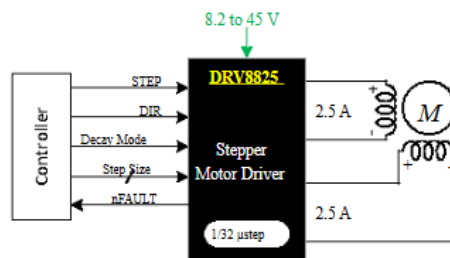
1 Features

- PWM Microstepping Stepper Motor Driver
 - Built-In Microstepping Indexer
 - Up to 1/32 Microstepping
- Multiple Decay Modes
 - Mixed Decay
 - Slow Decay
 - Fast Decay
- 8.2-V to 45-V Operating Supply Voltage Range
- 2.5-A Maximum Drive Current at 24 V and $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Simple STEP/DIR Interface
- Low Current Sleep Mode
- Built-In 3.3-V Reference Output
- Small Package and Footprint
- Protection Features
 - Overcurrent Protection (OCP)
 - Thermal Shutdown (TSD)
 - VM Undervoltage Lockout (UVLO)
 - Fault Condition Indication Pin (nFAULT)

2 Applications

- Automatic Teller Machines
- Money Handling Machines
- Video Security Cameras
- Printers
- Scanners
- Office Automation Machines
- Gaming Machines
- Factory Automation
- Robotics

4 Simplified Schematic



3 Description

The DRV8825 provides an integrated motor driver solution for printers, scanners, and other automated equipment applications. The device has two H-bridge drivers and a microstepping indexer, and is intended to drive a bipolar stepper motor. The output driver block consists of N-channel power MOSFET's configured as full H-bridges to drive the motor windings. The DRV8825 is capable of driving up to 2.5 A of current from each output (with proper heat sinking, at 24 V and 25°C).

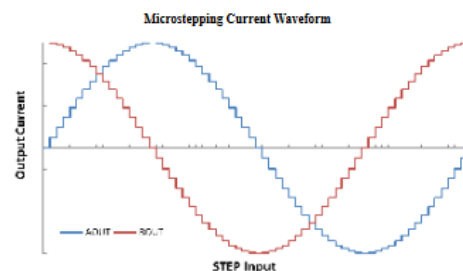
A simple STEP/DIR interface allows easy interfacing to controller circuits. Mode pins allow for configuration of the motor in full-step up to 1/32-step modes. Decay mode is configurable so that slow decay, fast decay, or mixed decay can be used. A low-power sleep mode is provided which shuts down internal circuitry to achieve very low quiescent current draw. This sleep mode can be set using a dedicated nSLEEP pin.

Internal shutdown functions are provided for overcurrent, short circuit, under voltage lockout and over temperature. Fault conditions are indicated via the nFAULT pin.

Device Information(1)

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV8825	HTSSOP (28)	9.70 mm × 6.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



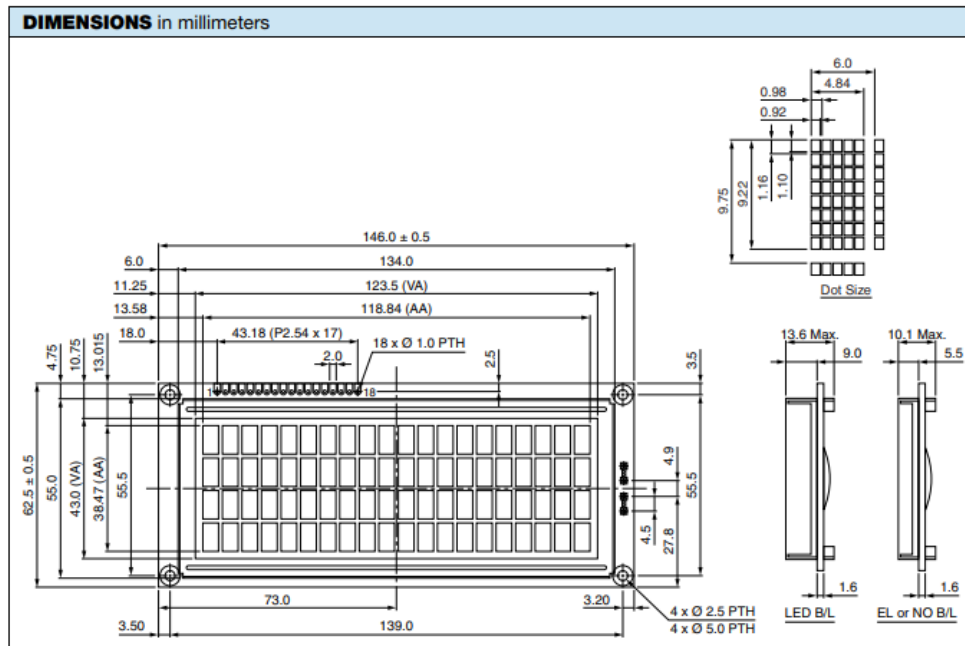
An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Ficha técnica Display LCD


www.vishay.com
LCD-020N004L

Vishay

INTERFACE PIN FUNCTION		
PIN NO.	SYMBOL	FUNCTION
1	V _{SS}	Ground
2	V _{DD}	+ 3 V or + 5 V
3	V ₀	Contrast adjustment
4	RS	H/L register select signal
5	R/W	H/L read/write signal
6	E	H → L enable signal
7	DB0	H/L data bus line
8	DB1	H/L data bus line
9	DB2	H/L data bus line
10	DB3	H/L data bus line
11	DB4	H/L data bus line
12	DB5	H/L data bus line
13	DB6	H/L data bus line
14	DB7	H/L data bus line
15	A	Power supply for LED (4.2 V)
16	K	Power supply for B/L (0 V)
17	NC/V _{EE}	NC or negative voltage output
18	NC	NC connection



Revision: 09-Oct-12

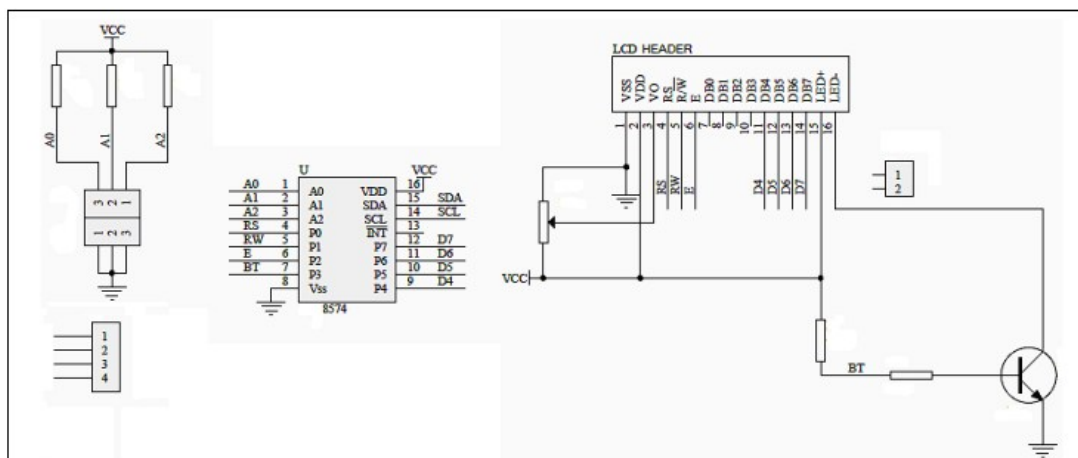
2

Document Number: 37314

For technical questions, contact: displays@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Ficha técnica do Módulo I2C LCD Display



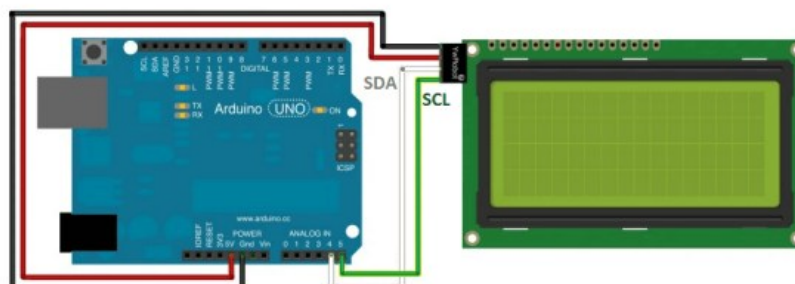
Reference circuit diagram of the I2C-to-LCD piggy-back board.

I2C LCD Display.

At first you need to solder the I2C-to-LCD piggy-back board to the 16-pins LCD module. Ensure that the I2C-to-LCD piggy-back board pins are straight and fit in the LCD module, then solder in the first pin while keeping the I2C-to-LCD piggy-back board in the same plane with the LCD module. Once you have finished the soldering work, get four jumper wires and connect the LCD module to your Arduino as per the instruction given below.



LCD display to Arduino wiring.



Ficha técnica do Sensor Fim-de-Curso

SNAP ACTION SWITCH

Features

- High precision basic switch in a variety of styles
- Wide margins of operating conditions increase the operating speed range
- Available in general purpose



Specifications

Item	Standard	H SERIES
Rating	20(4)A 250VAC EN 61058-1 15A 125VAC or 250VAC UL 1054 1/2A 125VDC 1/4A 250VDC 1/8HP 125VAC 1/4HP 250VAC	20A(12A) 125/250VAC 0.5A 125/250VDC UL 61058-1
Contact Resistance	15mΩ max. (initial)	
Insulation Resistance	100MΩ min. (at 500V DC)	
Dielectric Strength	Between terminals of same polarity AC 1000V (50/60Hz for 1minute)	
Electrically Life	100,000 operations min.	
Mechanically Life	1,000,000 operations min.	

Product Selection

Z15G ☐ ☐

1 2

1.SOLDER ACTUATOR TYPES

- 1100: Pin plunger
- 1101: Hinge lever
- 1103: Short hinge roller lever
- 1105: Slim spring plunger
- 1106: Short spring plunger
- 1107: Panel mount plunger
- 1108: Panel mount roller plunger
- 1118: Panel mount cross roller plunger
- 1501: Hinge lever
- 1502: Short Hinge lever
- 1503: Hinge roller lever
- 1504: Short hinge roller lever
- 1544: Unidirectional short hinge roller lever

SCREW ACTUATOR TYPES

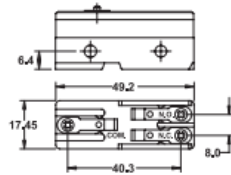
- 1300: Pin plunger
- 1301: Hinge lever
- 1303: Short hinge roller lever
- 1305: Slim spring plunger
- 1306: Short spring plunger
- 1307: Panel mount plunger
- 1308: Panel mount roller plunger
- 1318: Panel mount cross roller plunger
- 1701: Hinge lever
- 1702: Short Hinge lever
- 1703: Hinge roller lever
- 1704: Short hinge roller lever
- 1744: Unidirectional short hinge roller lever

2.Standard

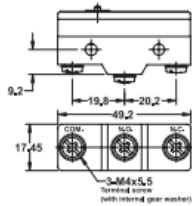
- 20(4)A 250VAC EN 61058-1
- 15A 125VAC or 250VAC UL 1054
- 1/2A 125VDC 1/4A 250VDC
- 1/8HP 125VAC 1/4HP 250VAC
- 20A(12A) 125/250VAC
- H 0.5A 125/250VDC
- UL 61058-1

Terminals

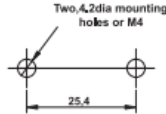
Solder Terminal



Screw Terminal



Mounting Hole



HIGHLY

B5

Design, specifications are subject to change without notice.

Ficha técnica do Módulo de Alimentação para Breadboard



MB102 Breadboard 3.3V/5V Power Supply



Description:

A 3.3V and 5V Breadboard Power Supply Module with series diode, polarity reversal protection. The module can take 6.5V to 12V input and can produce 3.3V and +5V. This is a must have power supply module for experimenters who have to test/prototype electronic circuits on breadboard or perforated/veroboard.

Brief Data:

1. Plug directly to MB102 Standard breadboard.
2. Input voltage: 6.5-12 V (DC) or 5V USB power supply.
3. Output voltage: 3.3V and 5V can switch over.
4. Maximum output current: <700 mA.
5. External Input voltage ON/OFF switch.
6. Independent control of upper and Lower Bread Board Power Rails. Can switch over to 0V, 3.3V, 5V using jumpers on any rail.
7. On-board two groups of 3.3V, 5V DC output plug pin, convenient external lead use.
8. USB device connector onboard for power output to external device.
9. Size: 5.3cm x 3.5cm.

www.rajguruelectronics.com