



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento de um sistema de seguimento solar para aplicação em medição de aerossóis atmosféricos

Luís Miguel Opinião Pinto Castro Neves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro
Co-orientadora: Prof. Doutora Sandra Isabel Pinto Mogo

Covilhã, fevereiro de 2018

Agradecimentos

À Professora Doutora Sandra Isabel Pinto Mogo por me ter dado a oportunidade para realizar este trabalho.

Ao Professor Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro pelas indicações e ajudas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas e amigos, em especial ao João, à Maria, ao Nuno, ao Tiago, e muitos outros que não serão menos lembrados, pela ajuda, estímulo e apoio que me deram ao longo deste percurso académico.

À minha família. Em especial aos meus pais que sempre tiveram um contributo essencial ao longo da minha vida e da minha formação. Sem o vosso apoio, e presença nos momentos mais difíceis que alguma vez atravessei, não estaria aqui.

A todos, meu muito obrigado.

Resumo

Os aerossóis são pequenas partículas no estado sólido ou líquido, suspensas na atmosfera, exercendo uma influência importante sobre o clima e o ambiente. Assim afetam o clima: através da difusão, transmissão e absorção tanto da radiação proveniente do Sol como da radiação térmica proveniente da superfície terrestre; através da intensificação ou moderação do efeito dos gases de estufa; agindo como núcleos formadores de nuvens, influenciando consequentemente o ciclo de vida destas e do ciclo hidrológico do planeta Terra.

Uma consequência da presença deste tipo de partículas, suspensas em grande quantidade na atmosfera, reside na degradação da qualidade do ar. Também, e não menos importante, apresentam riscos para a saúde pública uma vez que são partículas de dimensões muito pequenas, com diâmetros por volta dos $10\ \mu\text{m}$ ou menor. Geralmente, os impactos mais comuns na saúde pública passam pelo surgimento de asma, alergias, outras doenças respiratórias e infecções oculares causadas ou agravadas pelos aerossóis.

O tema proposto na presente dissertação tem como objetivo desenvolver três metodologias de seguimento solar, nomeadamente um controlo por malha aberta, um controlo por malha fechada, e um controlo misto. Para se testarem estes métodos foi criado um protótipo de seguimento solar. Este é composto por dois graus de liberdade. Um serve para dar mobilidade ao protótipo sobre o eixo do azimute, e o outro sobre o eixo do zénite, os quais dão capacidade para o protótipo seguir o Sol ao longo do dia. Usa dois motores de passo com a ajuda de um sistema de polias e de correias para alcançar posicionamentos de precisão. Inclui dois pares de resistências dependentes de luz para, em primeiro plano, fazer o seguimento solar ativo de malha fechada, e em segundo plano para serem usados como *feedback* de um seguimento solar, por via do uso de um algoritmo astronómico. Possui quatro botões com a finalidade de limitar o campo de funcionamento do protótipo, nomeadamente entre 50° e 310° em azimute, e 0° e 90° em zénite.

Palavras-chave

Seguidor Solar, Microcontrolador, Motor de Passo, Resistência Dependente de Luz, Controlo Malha Aberta, Controlo Malha Fechada, Controlo Misto, Algoritmo de Seguimento.

Abstract

Aerosols are small particles in the solid or liquid state, suspended in the atmosphere, exerting a significant influence on the climate and in the environment. Thus they affect the climate: through the dispersion, transmission and absorption of both radiation from the Sun and from the thermal radiation from the Earth's surface; through intensification or moderation of the greenhouse effect; acting as cloud forming nuclei, consequently influencing their life cycle and the hydrological cycle of planet Earth.

A consequence of the presence of this type of particles, suspended in great quantity in the atmosphere, resides in the degradation of the quality of the air. Also, and not least, they present risks to public health since they are very small particles with diameters around $10\ \mu\text{m}$ or less. Generally, the most common impacts on public health include the onset of asthma, allergies, other respiratory diseases, and eye infections caused or aggravated by aerosols.

The proposed theme of this dissertation aims to develop three methodologies of solar tracking, an open loop control, a closed loop control, and a mixed control. To test these methods it was created a solar tracking prototype, composed of two degrees of freedom. One serves to give mobility to the prototype on the axis of the azimuth, and the other on the zenith axis, which enables the prototype to follow the Sun throughout the day. Uses two stepper motors with the help of a pulley and belt system to achieve precision positioning. Includes two pairs of light-dependent resistors to, firstly, perform active closed-loop solar tracking and, lastly, to be used as feedback for solar tracking through the use of an astronomical algorithm. Uses four buttons to limit the working range of the prototype, namely between 50° and 310° in azimuth, and 0° and 90° in zenith.

Keywords

Solar Tracking, Microcontroller, Stepper Motor, Light Dependent Resistor, Open-loop Control, Closed-loop Control, Mixed Control, Tracking Algorithm.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do Tema	1
1.2	Motivação e Objetivos	3
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Conceitos e Generalidades	5
2.1	Radiação Solar	5
2.2	Órbita do Planeta Terra	6
2.2.1	Declinação Solar	7
2.2.2	Posição Solar	8
2.3	Seguidores Solares	10
2.3.1	Seguidores Passivos	10
2.3.2	Seguidores Ativos	11
2.4	Sistemas de Controlo para Seguidores Solares	13
2.4.1	Controlo de Malha Aberta	14
2.4.2	Controlo de Malha Fechada	14
2.5	Motores de Passo	17
2.5.1	Tipos de Motores de Passo	18
2.5.2	Motor de Passo Unipolar e Bipolar	18
2.5.3	Princípios Básicos do Funcionamento do Motor de Passo	19
2.6	Revisão Bibliográfica	20
3	Dimensionamento de um Seguidor Solar	25
3.1	Considerações Físicas e Mecânica Tomadas	26
3.2	Considerações Eletrónicas Tomadas	28
3.2.1	Microcontrolador Texas Instruments MSP430G2553 com <i>LaunchPad</i>	29
3.2.2	Driver A4988	31
3.2.3	Cálculo de Limitação de Corrente no <i>Driver A4988</i>	34
3.2.4	Considerações ao Seguimento Solar por Malha Fechada	34
4	Software Desenvolvido para o Controlo de Seguimento Solar	39
4.1	Primeira Fase - Seguimento Solar por Malha Fechada	39
4.2	Segunda Fase - Seguimento Solar por Malha Aberta	44
4.3	Terceira Fase - Seguimento Solar Misto	66
5	Conclusão	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	72
	Bibliografia	73
	Apêndice A	78
	Apêndice B	78
	Apêndice C	79

Apêndice D	80
Apêndice E	81
Apêndice F	82
Apêndice G	83
Apêndice H	84
Apêndice I	85
Apêndice J	86
Apêndice K	87
Apêndice L	92

Lista de Figuras

1.1	Poeiras do Deserto do Saara sobre a Península Ibérica.	2
2.1	Perdas sofridas pela radiação solar ao atravessar a atmosfera.	6
2.2	Esfera celeste e plano eclíptico.	7
2.3	Movimento do planeta Terra em torno do Sol.	8
2.4	Declinação solar ao longo do ano.	9
2.5	Tipos de seguidores solares caracterizados pelo número de eixos de operação. . .	10
2.6	Seguidor Solar Passivo.	11
2.7	Seguidores solares ativos: a) de eixo horizontal, b) de eixo vertical, c) polar de eixo único, d) de dois eixos, e e) de plataforma rotativa de dois eixos.	13
2.8	Exemplo de um sistema de malha aberta.	14
2.9	Exemplo de um sistema de malha fechada.	15
2.10	Resistência vs intensidade de luz.	16
2.11	Diferença entre a rotação de um motor de passo e de um motor DC.	17
2.12	Ilustração das linhas de fluxo nos dentes do estator e rotor do motor de passo, e respectivo entreferro.	18
2.13	Formas de onda para controlo de um motor de passo.	20
3.1	Esboço do protótipo do seguidor solar.	26
3.2	Componentes modelados e impressos para uso no protótipo de seguimento solar. . .	29
3.3	<i>LaunchPad</i> da Texas Instruments com MSP430G2553 montado no <i>socket</i> DIP.	30
3.4	Esquema de conexão de um motor de passo a um <i>driver</i> A4988.	32
3.5	Circuito divisor de tensão resistivo com LDR.	35
3.6	Princípio de funcionamento para o suporte dos LDR.	36
3.7	Componentes de suporte para os LDR. Componente esquerdo referente ao seguimento em Azimute, e direito ao seguimento em Zénite.	36
3.8	Componentes limitadores de campo de luz incidente para os componentes de suporte dos LDRs.	37
3.9	Esquema de ligações dos LDR ao MSP430.	37
3.10	Esquema de ligações dos motores com os A4988 e, consecutivamente, ao MSP430. . .	38
4.1	Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo por malha fechada (Fase 1).	39
4.2	Fluxograma da rotina de verificação de dados adquiridos e reposicionamento.	42
4.3	Esquema de ligações dos botões limitadores de campo ao microcontrolador.	43
4.4	Fluxograma da rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção dos portos P2.x.	43
4.5	Toolbox GUIDE do MATLAB para criação de interfaces gráficas.	52
4.6	Interface gráfica para cálculo dos valores de Azimute e Zénite e envio para microcontrolador.	58
4.7	Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo por malha aberta (Fase 2).	59
4.8	Excerto da Tabela 15-4 do <i>datasheet</i> do MSP430G2553, de onde se retiram os valores para UCBRx e UCBSx.	60
4.9	Rotina de verificação de posição do motor em azimute (++).	64
4.10	Rotina de verificação de posição do motor em azimute (-).	65

4.11 Rotina de verificação de posição do motor em zénite (++)	67
4.12 Rotina de verificação de posição do motor em zénite (-)	68
4.13 Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo misto (Fase 3).	69

Lista de Tabelas

3.1	Características dos Motores Escolhidos.	26
3.2	Características do MSP430G2553.	29
3.3	Habilitação do modo micro-passo no <i>driver</i> A4988.	32
3.4	Porcentagem de corrente em cada modo de utilização de passo.	33

Nomenclatura

Simbologia Grega

α	Ascensão geocêntrica do Sol,
α'	Ascensão topocêntrica do Sol,
α_i	Ângulo de inclinação da correia,
β	Latitude geocêntrica,
$\Delta\alpha$	Paralaxe da ascensão do Sol,
$\Delta\varepsilon$	Nutação em obliquidade,
$\Delta\psi$	Nutação em longitude,
$\Delta\tau$	Correção da aberração,
δ	Inclinação geocêntrica do Sol,
δ'	Inclinação topocêntrica do Sol,
ε	Verdadeira obliquidade da eclíptica,
ε_0	Média da obliquidade da eclíptica,
Γ	Ângulo topocêntrico astronómico de azimute,
λ	Longitude aparente do Sol,
Φ	Ângulo topocêntrico de azimute,
ϕ	Latitude geográfica do observador,
σ	Longitude geográfica do observador,
Θ	Longitude geocêntrica,
ξ	Paralaxe horizontal equatorial do Sol,
ω	Ângulo horário.

Acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter,
AHRS	Attitude and Heading Reference System,
CPU	Central Processing Unit,
DC	Direct Current,
ESR	Equivalent Series Resistance,
GUI	Graphical User Interface,
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service,
IoT	Internet of Things,
LDO	Low Dropout,
LDR	Light Dependent Resistor,
MDF	Medium-density fiberboard,
SPA	Solar Position Algorithm,
PLC	Programmable Logic Controller,
PM	Particulate Matter,
RISC	Reduced Instruction Set Computer,
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter,
USB	Universal Serial Bus,
USCI	Universal Serial Communications Interface.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Desde o início das primeiras medições meteorológicas até aos dias de hoje, observou-se um aumento significativo da temperatura média global do planeta. No ano de 2016, a temperatura média global em todas as superfícies terrestres e oceânicas foi de 0,94°C acima da média do século XX (de 13,9°C), ultrapassando o recorde anterior de 2015 em 0,04°C [1].

Este aumento da temperatura deve-se a uma resposta a uma perturbação clara no balanço energético do sistema Terra-atmosfera. Os gases de efeito de estufa e os aerossóis atmosféricos constituem duas das causas mais importantes desta perturbação. Os aerossóis são pequenas partículas no estado sólido ou líquido, suspensas na atmosfera, exercendo uma influência importante sobre o clima e o ambiente [2, 3]. Assim afetam o clima [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]:

- através da difusão, transmissão e absorção tanto da radiação proveniente do Sol como da radiação térmica proveniente da superfície terrestre;
- através da intensificação ou moderação do efeito dos gases de estufa;
- agindo como núcleos formadores de nuvens, influenciando conseqüentemente o ciclo de vida destas e o ciclo hidrológico do planeta Terra.

Para uma melhor compreensão desta temática, teremos em conta o seguinte: existem dois tipos de aerossóis presentes na atmosfera terrestre com base na sua origem [2, 3, 4, 9]:

- os provenientes de atividades antropogénicas, tais como a queima de biomassa e de combustíveis fósseis, de onde surgem partículas à base de carbono elementar e orgânico, de sulfatos e nitratos;
- de origem natural, como o sal marinho, as poeiras vulcânicas e minerais.

Os aerossóis minerais encontram-se em maior quantidade na atmosfera, sendo maioritariamente constituídos por partículas sólidas provenientes de zonas áridas. A nível global, o norte de África é a fonte dominante de aerossóis minerais em termos de ocorrência e intensidade, injetando à volta de 400 a 700 Tg por cada transporte atmosférico [2, 6]. Na Figura 1.1 constata-se uma destas ocorrências, registada sobre a Península Ibérica em fevereiro de 2016. A sua taxa de injeção pode variar temporal e espacialmente como resultado de tempestades de areia e de atividades antropogénicas. A concentração de poeira mineral tende a ser especialmente elevada perto das regiões de origem. Eventualmente, estes tipos de partículas depositam-se à superfície, no solo ou no oceano, através da deposição seca ou húmida, ou por agregação entre partículas [2, 3].

Uma consequência da presença deste tipo de partículas, suspensas em grande quantidade na atmosfera, reside na degradação da qualidade do ar. Ou seja, a persistência destas na atmosfera criam uma névoa que é facilmente perceptível ou, em casos extremos, conduz à

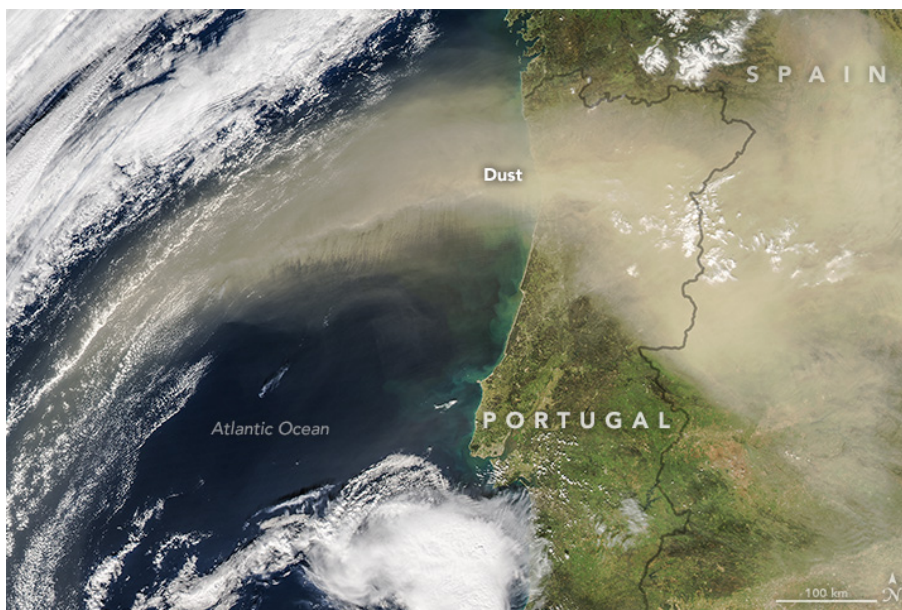


Figura 1.1: Poeiras do Deserto do Saara sobre a Península Ibérica [13].

formação de nevoeiro intenso, devido à crescente emissão de partículas por parte da indústria e da queima de biomassa massiva recorrente da agricultura. [5, 10].

Estas apresentam riscos para a saúde pública uma vez que são partículas de dimensões muito pequenas, com diâmetros por volta dos $10\ \mu\text{m}$ ou menor. As partículas com um diâmetro menor do que $10\ \mu\text{m}$, definidas como PM₁₀, são capazes de atingir as pequenas vias aéreas, considerando-se que as de dimensões entre $0,5$ e $1,0\ \mu\text{m}$ têm maior possibilidade de ficarem depositados nos alvéolos pulmonares. O risco dos efeitos adversos para a saúde, por parte de partículas inaláveis advém da concentração PM₁₀ no ar, da duração da exposição, da penetração e deposição de partículas nas diversas regiões da árvore respiratória, e da resposta imunológica de cada hospedeiro a esta agressão. Estes efeitos estão relacionados com a quantidade que realmente entra em circulação na atmosfera ao longo de um determinado período de tempo. As partículas de diâmetro superior a $10\ \mu\text{m}$ depositam-se no nariz e nas fossas nasais, as compreendidas entre $10 - 0,5\ \mu\text{m}$ na traqueia e nos brônquios, e as partículas até $0,01\ \mu\text{m}$ ficam retidas nos alvéolos pulmonares. Partículas inferiores a $0,01\ \mu\text{m}$ permanecem em suspensão e são, eventualmente, expelidas pelas vias aéreas [11]. Geralmente, os impactos mais comuns na saúde pública passam pelo surgimento de asma, alergias, outras doenças respiratórias, e infeções oculares causadas ou agravadas pelos aerossóis. [7].

Considerando o potencial maligno das PM₁₀ para com a saúde pública e o ambiente, foi definida internacionalmente uma legislação sobre os limites máximos de concentração PM. Na União Europeia, a taxa anual e diária de PM₁₀ foi fixada entre $40\ \mu\text{g m}^{-3}$ e $50\ \mu\text{g m}^{-3}$, níveis admissíveis até um máximo consecutivo de 35 dias, enquanto que o limite anual para PM_{2,5} ou partículas com um diâmetro inferior a $2,5\ \mu\text{m}$, foi convencionado em $17\ \mu\text{g m}^{-3}$ [12].

Ao apresentar um impacto desta dimensão, seria de esperar que este fosse um tema amplamente estudado, fácil de prever e de simular, mas a realidade é bem diferente. Segundo [5, 6, 10], os aerossóis atmosféricos encontram-se insuficientemente caracterizados e compreendidos. Isto acontece especialmente em regiões onde as medições *in-situ* e por satélite continuam a ser um desafio. Os autores de referência [14] indicam que este fenómeno se deve ao facto da ausência de uma recolha sistemática de parâmetros microfísicos com base em observações confiáveis. De forma a conseguir reverter esta situação, de acordo com [8], é necessário

recolher dados relativos às propriedades microfísicas dos aerossóis, tais como a distribuição de tamanho, forma das partículas e índice de refração, a composição química e as propriedades óticas delas resultantes, espessura ótica, albedo e matriz de dispersão, a fim de quantificar o impacto dos aerossóis.

Perante esta abordagem, existem metodologias que se podem utilizar de forma a detetar a presença deste tipo de partículas na atmosfera [3]. A mais direta consiste numa recolha e análise de amostras suficientes de uma coluna atmosférica. No entanto, este processo apresenta uma restrição física importante, dado ser necessário empregar uma aeronave dotada de instrumentação específica para o efeito. Alternativamente, através da radiometria solar é também possível detetar a presença de aerossóis na atmosfera. Ou seja, uma vez que a energia proveniente do Sol é um valor conhecido, a presença de partículas atmosféricas irá alterar este valor. É nesta contextualização que o presente trabalho se irá inserir. Uma vez que a radiometria solar requer que o instrumento a usar esteja apontado para o Sol, durante toda a duração em que se encontra a incidir sobre um local, a utilização de um seguidor solar será de importância fundamental para a afirmação desta técnica. Contudo, neste trabalho irão ser abordados três tipos de controlo para a aplicação do seguidor solar.

1.2 Motivação e Objetivos

Tendo em consideração o enquadramento atrás descrito, os objetivos principais deste trabalho assentam no desenvolvimento de três tipos de controlo para seguimento solar, a utilização do microcontrolador MSP430G2553 da Texas Instruments, uma vez que não se encontra na literatura o uso deste para este género de aplicação, e a manufatura de um seguidor solar para um radiómetro com o intuito de captar a radiação por radiometria solar. Para esta finalidade, foi necessário no seu desenvolvimento uma escolha da componente eletrónica e mecânica que constituirá parte integrante do seu mecanismo.

As características que o protótipo apresenta são:

- Tratando-se de um primeiro protótipo, é composto por uma estrutura em madeira do tipo MDF, com capacidade de suportar um instrumento de medição.
- Seguimento solar por dois eixos, onde um serve para dar mobilidade ao protótipo sobre o eixo do azimute, e o outro sobre o eixo do zénite, o qual será capaz de seguir o Sol ao longo do dia.
- Uso de dois motores de passo com a ajuda de um sistema de polias e correias para alcançar posicionamentos de precisão.
- Inclusão de dois pares de resistências dependentes de luz para, em primeiro plano, se fazer um seguimento solar ativo de malha fechada, e em segundo plano, para serem usados como *feedback* de um seguimento solar por via do uso de um algoritmo astronómico.
- Uso de quatro botões com a finalidade de limitar o campo de funcionamento do protótipo, nomeadamente entre 50° e 310° em azimute, e 0° e 90° em zénite.

1.3 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, são apresentados mais quatro capítulos nesta dissertação. Ao longo destes será realizada uma descrição das principais fundamentações para o

desenvolvimento do trabalho, considerações mecânicas e eletrônicas tomadas, as metodologias desenvolvidas para alcançar os objetivos especificados anteriormente, resultados obtidos e conclusões.

No capítulo 2, intitulado de Conceitos e Generalidades, são apresentados conceitos base sobre o movimento do Sol e do planeta Terra, como ambos influenciam o seguimento solar por via de um instrumento eletrônico, os tipos de seguidores solares, os vários métodos de controlo para o seguimento solar, e uma breve explicação do funcionamento dos motores de passo e seu controlo.

No capítulo 3 são explícitas as considerações mecânicas e eletrônicas tomadas para o dimensionamento do seguidor solar, como os materiais usados, os componentes fabricados por impressão 3D, necessários para o funcionamento do protótipo, todos com objetivos distintos, e os componentes eletrônicos usados.

No capítulo 4, denominado Software Desenvolvido para o Controlo de Seguimento Solar, é explicado o desenvolvimento dos três tipos de controlo do protótipo estudados nesta dissertação: controlo por via de resistências dependentes de luz; controlo por via de uma interface gráfica que calcula os ângulos de azimute e zénite com base no algoritmo astronómico SPA, seguido pelo envio destes ângulos para o microcontrolador; aglomeração dos dois tipos de controlo.

Para finalizar, o capítulo 5 com as conclusões a retirar deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos e Generalidades

2.1 Radiação Solar

O Sol emite energia na forma de radiação eletromagnética. A quantidade que atinge o planeta Terra é intitulada como radiação solar, constituindo a radiação incidente. A radiação solar estende-se desde a região do espectro correspondente aos raios X até à região das ondas rádio. Cerca de 97% da energia emitida entre os comprimentos de onda $0,25 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$ corresponde às regiões do ultravioleta, do visível e do infravermelho [15]. A irradiância designa a quantidade de energia solar por unidade de área recebida, num determinado período de tempo. À medida que a energia solar eletromagnética atravessa a atmosfera da Terra, os níveis de energia que chegam à superfície terrestre rondam, em média, os 1366 W m^{-2} [15, 16]. A radiação incidente na atmosfera terrestre aparenta ser relativamente constante, contudo, a radiação que atinge a superfície terrestre varia devido a diversos fatores [15, 17]:

- Latitude do local,
- Estação do ano, data e hora,
- Variações atmosféricas como sejam os níveis de vapor de água (humidade), de nebulosidade, de poluição e de aerossóis.

Estes fatores originam diferentes efeitos consoante o local de impacto. Como exemplo, numa região árida, a nebulosidade não irá impor uma perturbação significativa na variação da radiação recebida, pela sua quase inexistência, enquanto que numa região equatorial será o oposto. A radiação que não se reflete/difunde e atinge a superfície terrestre diretamente, é chamada de radiação direta. A radiação que atinge a superfície terrestre após ter sido difundida pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera é chamada de radiação difusa. O albedo consiste na razão entre a radiação solar difusa por um corpo, como o planeta Terra, com o total de radiação solar recebida [18, 19]. Na Figura 2.1 pode ver-se o peso dos efeitos e variações atmosféricas aqui mencionados. Nesta representação, a atmosfera encontra-se subdividida em 5 patamares: a camada de ozono (20-40 km), a camada superior de aerossóis (15-25 km), as moléculas de ar (15-25 km), o vapor de água e a camada inferior de aerossóis (0-3 km). Cada um dos patamares apresenta pesos distintos na absorção e difusão. Na camada de ozono, a radiação recebida sofre uma absorção de 2%. Na camada superior de aerossóis, sofre uma absorção de 1%, e é difundida em 0,5% para o espaço sideral e 1% para a Terra. No patamar pertencente às moléculas de ar, a radiação é absorvida em 8%, difundida em 1% para o espaço e 4% para a Terra. No patamar referente ao vapor de água, a radiação é absorvida em 6%, difundida em 0,5% para o espaço e 1% para a Terra. Na camada inferior de aerossóis, a radiação é absorvida em 1%, difundida em 1% para o espaço e para a Terra. Em suma, a radiação absorvida totaliza-se em 18%, a radiação difundida para o espaço em 3%, a radiação difundida para a Terra em 7% e, por último, a radiação recebida por via direta corresponde a 70%.

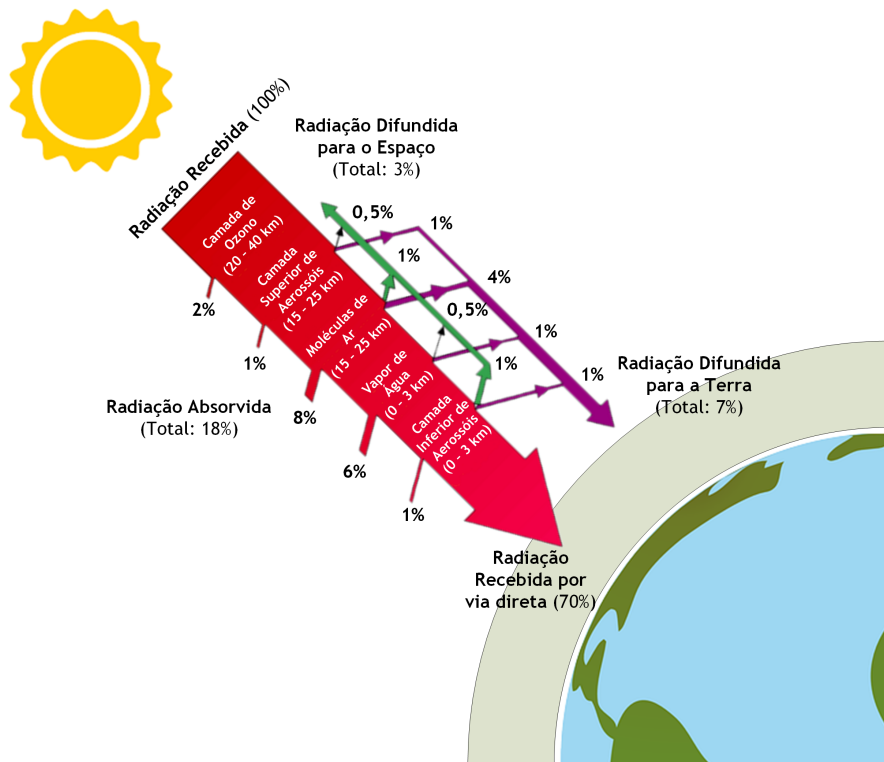


Figura 2.1: Perdas sofridas pela radiação solar ao atravessar a atmosfera. Adaptado de [17].

2.2 Órbita do Planeta Terra

A órbita da Terra à volta do Sol possui um papel relevante na elaboração de qualquer sistema de seguimento solar, uma vez que o “movimento” aparente do sol, ao longo dos dias, chamado de dia solar, é na realidade devido a dois movimentos distintos [20, 21, 22]:

- Movimento de Rotação - movimento executado em torno do seu próprio eixo, o eixo polar, com uma duração de 24 horas para consumir uma rotação completa, dando origem ao ciclo diurno e noturno.
- Movimento de Translação - movimento realizado em torno do Sol, com uma duração de aproximadamente 8766 horas, o que equivale a cerca de um ano completo.

Estes movimentos vão fazer com que o ângulo, correspondente à componente direta da energia, que incide no planeta Terra varie. No entanto, a posição aparente do Sol também vai depender da posição do observador na Terra, da data, da hora e do dia do ano.

Usando as leis clássicas da dinâmica newtoniana, juntamente com a lei de gravitação de Newton, podemos mostrar que a Terra move-se num plano fixo em torno do Sol, chamado de plano eclíptico porque somente quando a Lua passa por este plano pode ocorrer um eclipse, e que o movimento em torno do Sol toma uma órbita elíptica, com a estrela situada num dos focos da elipse [19, 20]. Como a órbita apresenta a forma de uma elipse, a distância entre Sol e Terra não serão iguais durante os 365 dias. Esta pode ser calculada através da seguinte expressão (2.1) [18]:

$$r = r_0 \left[1 + 0,017 \sin \left(\frac{360(d_n - 93)}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

Em que:

- r - distância Sol-Terra,
- r_0 - distância média Sol-Terra,
- d_n - dia do ano.

De notar que a excentricidade da eclíptica é de apenas 0,017, o que é um valor muito pequeno. A excentricidade é uma medida da derivação de um círculo. É zero para um círculo e aproxima-se de um à medida que a elipse se torna achatada. Como tal, é normalmente adequado expressar a distância apenas em termos do seu valor médio (r_0), igual a $1,496 \times 10^8$ km, geralmente referido como uma unidade astronómica, 1 UA [18].

O fator de correção de excentricidade (ε_0) pode ser expresso da seguinte forma [18]:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \quad (2.2)$$

2.2.1 Declinação Solar

A Terra é delimitada por uma linha central imaginária, denominada equador, que divide igualmente o planeta em duas partes iguais, o hemisfério norte e o hemisfério sul. A particularidade dos dois hemisférios encontra-se na quantidade de radiação recebida durante as estações de maior e de menor temperatura (verão e inverno), que se diferenciam devido à declinação solar ou inclinação da Terra em relação ao Sol. Como mencionado anteriormente, a Terra gira uma vez por dia sobre o seu eixo polar. Por sua vez, este eixo orbita em torno do Sol mantendo um ângulo constante de $23,45^\circ$ com o plano da eclíptica, Figura 2.2. Esta inclinação determina que o Sol se encontre em posição mais alta no verão, contrariamente ao inverno. Devido a este efeito, existe igualmente um maior número de horas de luz no verão e menor no inverno. É importante notar que o ângulo entre o plano equatorial e uma linha reta traçada entre o centro da Terra e o centro do Sol está em constante mudança ao longo do ano. É este ângulo intitulado de declinação solar δ . Esta variável pode ser considerada como constante ao longo de qualquer dia, sendo que a diferença máxima ao longo de 24 horas é inferior a $0,5^\circ$. A declinação solar pode

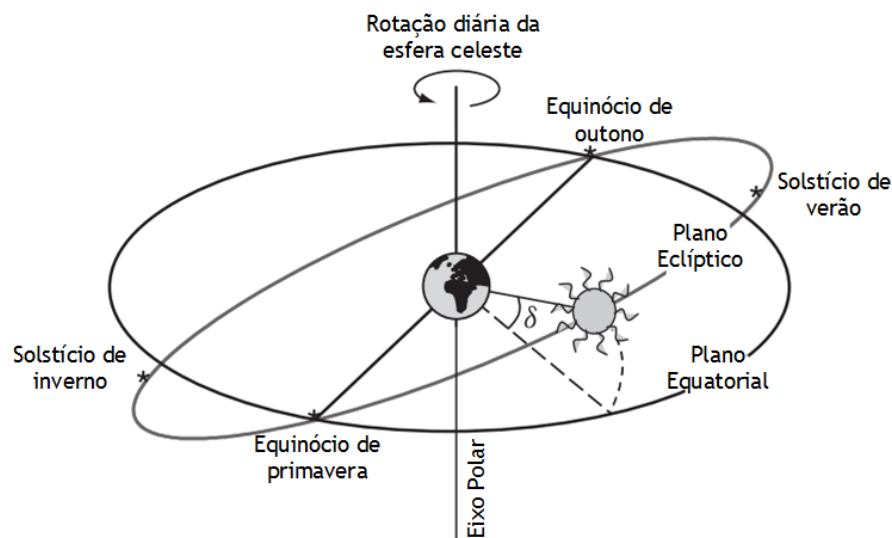


Figura 2.2: Esfera celeste e plano eclíptico. Adaptado de [18].

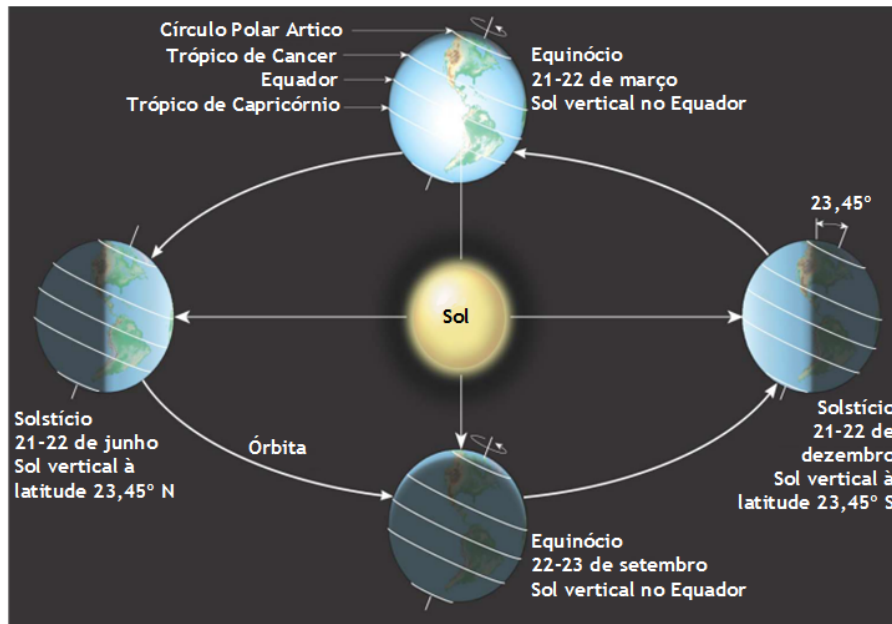


Figura 2.3: Movimento do planeta Terra em torno do Sol. Adaptado de [23].

ser calculada através da expressão (2.3) se os ângulos a norte do equador forem considerados como positivos e a sul do equador forem considerados negativos [18, 19, 20, 21, 22, 24, 25].

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360(d_n + 284)}{365} \right) \quad (2.3)$$

A Figura 2.3 auxilia na interpretação do movimento de translação, no movimento de rotação e na influência da declinação solar na convenção das estações do ano. No equinócio da primavera, 20/21 de março, e no equinócio de outono, 22/23 de setembro, a linha entre o Sol e a Terra passa pelo equador. Consequentemente, a declinação solar é igual a zero, o comprimento do dia e da noite é igual em qualquer localização da Terra e o Sol nasce e põe-se precisamente a este e a oeste, respetivamente. No solstício de verão, 21/22 de junho no hemisfério norte, a declinação apresenta o valor de $23,45^\circ$, situando-se o Sol acima do Trópico de Câncer, e o nascer do Sol e o pôr do Sol deslocados para nordeste e noroeste, respetivamente. No hemisfério norte, o solstício de verão corresponde ao dia mais longo e à noite mais curta de todo o ano. No hemisfério sul ocorre o oposto. No solstício de inverno, 21/22 de dezembro no hemisfério norte, a declinação apresenta o valor de $-23,45^\circ$, o Sol encontra-se diretamente acima do Trópico de Capricórnio e o nascer do Sol e o pôr do Sol deslocados para sudeste e sudoeste, respetivamente. No hemisfério norte, este é o dia mais curto e a noite mais longa de todo o ano, em oposição ao hemisfério sul [18, 19, 20, 22].

2.2.2 Posição Solar

Ponderemos uma representação clássica do céu, visto da Terra, como ilustrado na Figura 2.2. Nesta, podemos ver uma esfera posicionada no centro da Terra, denominada de esfera celeste. Cada um dos pontos representa uma direção celeste como observado da Terra. A intersecção da esfera celeste com o plano equatorial define o equador celeste. Os pontos de intersecção com o eixo polar são chamados de polos celestes. Usando esta forma de representação, o movimento da Terra à volta de um sol estacionário, pode ser observada de uma

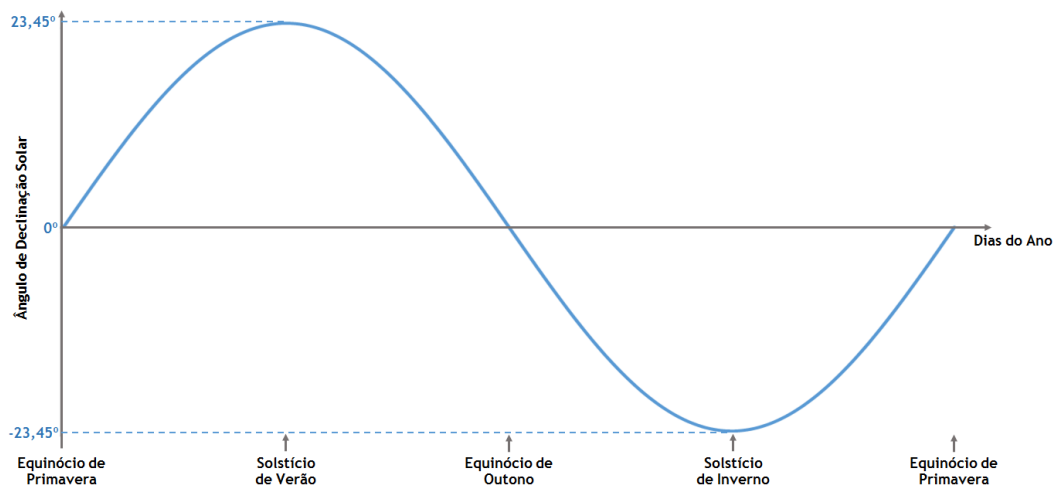


Figura 2.4: Declinação solar ao longo do ano.

forma reversa, ou seja, o sol a girar em torno da Terra, estando esta última estacionária, ou fixa. Nesta suposição, o Sol viaja através de um grande círculo da esfera celeste, a eclíptica, que forma um ângulo de $23,45^\circ$ com o equador celeste. O Sol completa este circuito uma vez por ano, enquanto que a esfera celeste gira uma vez por dia em redor da Terra, considerando-a fixa. Desta forma, o Sol assinala um círculo em torno da Terra. O diâmetro do círculo muda diariamente, atingindo um máximo nos equinócios e um mínimo nos solstícios. A rotação do Sol em torno da eclíptica ocorre na direção oposta à da esfera celeste, quando se desloca em torno da Terra [18].

Foquemo-nos agora num determinado local na superfície terrestre, onde irá ser empregue um sistema de seguimento solar. Para este dispositivo, é importante que seja determinada matematicamente, ou localizado através de foto-sensores, a posição do Sol. Esta intenção pode ser alcançada fazendo uso de um sensor composto por foto-resistências ou por meio de dois ângulos que fazem referência ao plano horizontal e ao plano vertical, respetivamente.

2.2.2.1 Azimute e Altura Solar

O ângulo de azimute representa o ângulo formado entre a direção sul e a projeção da linha Sol-Terra sobre o plano horizontal, o qual vai ter uma variação entre um valor positivo, este, e um valor negativo, oeste, os quais variam com a latitude e a época do ano. A equação (2.4) permite calcular o ângulo de azimute:

$$Azimute = \arccos \left(\frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

- δ - declinação solar,
- ϕ - latitude,
- α - altitude ou inclinação solar,
- ω - ângulo horário.

A altitude solar corresponde ao ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal e que pode ser calculada de acordo com a seguinte equação

(2.5):

$$AlturaSolar = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos \omega \cos \delta) \quad (2.5)$$

2.3 Seguidores Solares

De acordo com pesquisas efetuadas, foram avaliados diversos métodos de seguimento solar com o intuito de manter perpendiculares, ao feixe de luz solar, painéis solares, concentradores solares, telescópios, ou outro tipo de sistemas, de forma a maximizar a captação de energia solar. Um seguidor ideal necessita de cumprir com certos requisitos, como por exemplo, permitir que uma célula fotovoltaica aponte com precisão para o Sol, compensando as mudanças dos ângulos de altitude e de azimute associados ao deslocamento latitudinal, observado durante o ano. Os sistemas de seguimento solar são geralmente classificados como passivos ou ativos, isto é, são caracterizados pela forma como são controlados, como a forma como estão estruturados e pelo número de eixos de operação, Figura 2.5. [19, 21, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]

2.3.1 Seguidores Passivos

Os seguidores solares passivos baseiam-se na expansão térmica de matéria ou nas ligas com memória de forma. Geralmente, este tipo de seguidores são compostos por dois recipientes que contêm um gás ou um líquido volátil comprimidos, de baixo ponto de ebulição, que trabalham por oposição das diferenças de pressão exercidas, quando aquecidos. Quando o sistema se encontra em equilíbrio, indica que ambos os recipientes se encontram expostos à radiação solar de igual forma, o mesmo não se verifica quando este se encontra em desequilíbrio. Perante esta situação, as forças em desequilíbrio vão tentar reverter o sistema de volta ao equilíbrio, movimentando o aparelho no processo, mantendo-o apontado para a fonte da radiação solar [19, 22, 29, 31, 32]. A Figura 2.6 mostra um exemplo de um seguidor solar passivo desenvolvido pela empresa *Zomework*, onde foram ensaiados três tipos diferentes de líquidos voláteis, nomeadamente acetona, metanol e diclorometano, e testadas quatro fases distintas durante o seu funcionamento [32]:

1. ao nascer do Sol, estando o sistema voltado para oeste,

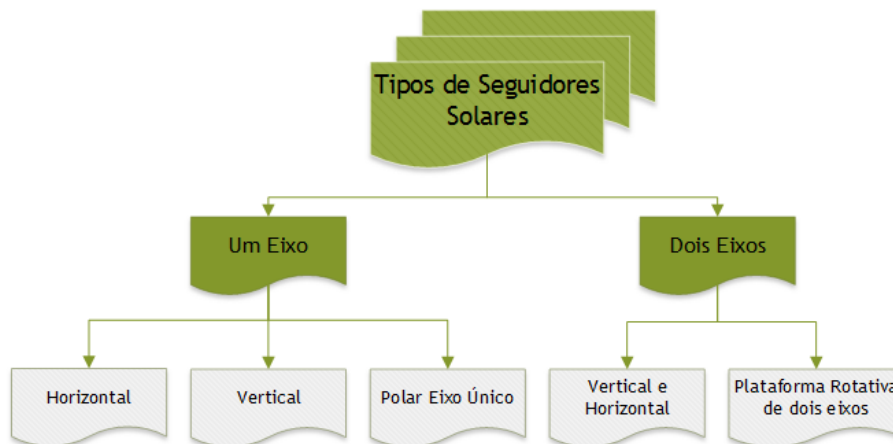


Figura 2.5: Tipos de seguidores solares caracterizados pelo número de eixos de operação.

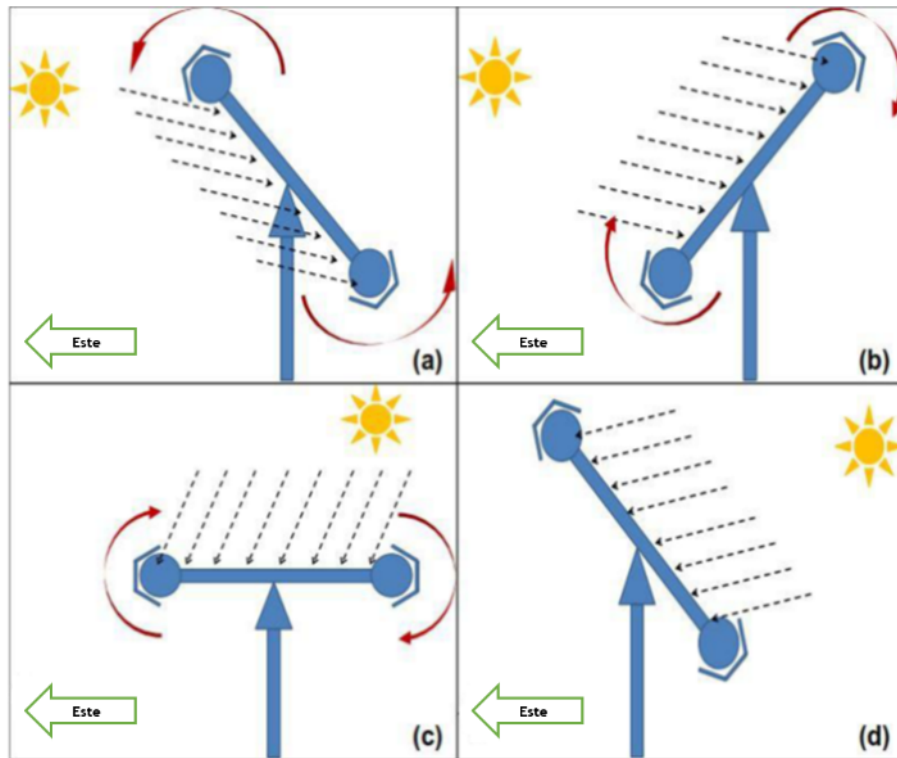


Figura 2.6: Seguidor Solar Passivo [32].

2. o sistema posicionado em direção ao Sol, por ação do desequilíbrio de forças exercido pelo aquecimento do reservatório mais exposto,
3. a meio do dia,
4. ao pôr do Sol.

Neste último caso, a posição do seguidor mantém-se durante a noite, reiniciando-se o processo de acordo com (a) [32].

2.3.2 Seguidores Ativos

Os seguidores solares ativos utilizam mecanismos com recurso à energia elétrica, os quais podem ser categorizados em quatro grupos distintos [19, 31]:

- controlo através de um microprocessador e sensor ótico,
- controlo através de computador por data e hora,
- controlo por célula solar bifacial auxiliar,
- combinação dos três sistemas.

Os seguidores solares eletro-óticos são geralmente compostos por pelo menos um par de foto-resistências ou células solares fotovoltaicas. Devido à igual intensidade de iluminação de ambos os elementos, são eletricamente equilibrados de modo que não haja nenhum sinal de controlo no acionamento elétrico. Caso se encontrem em desequilíbrio, procede-se à ativação do circuito de potência que comanda os motores elétricos usados para direcionar os instrumentos,

de modo a atingir o equilíbrio. Se existir um mecanismo computadorizado acionado temporalmente, este calcula a posição do Sol através de algoritmos, em função da data e hora e, por sua vez, gera o sinal de controlo do sistema. Na célula solar bifacial auxiliar, dá-se a condução do sistema para a posição desejada ou, mais eficazmente, por via da capacidade sensorial da célula [19]. Estes métodos tornam os seguidores ativos mais flexíveis para a implementação deste conceito em vários tipos de estruturas, entre as quais [16, 17, 21, 22, 31]:

- seguidor de eixo horizontal,
- seguidor de eixo vertical ou de azimute,
- seguidor polar de eixo único,
- seguidor de dois eixos,
- seguidor de plataforma rotativa de dois eixos.

2.3.2.1 Seguidor de Eixo Horizontal ou de Zénite

O seguidor de eixo horizontal, Figura 2.7 a), tem um eixo de rotação em paralelo com a superfície terrestre. Deste modo, o seguimento solar será feito de uma forma linear, de este para oeste, admitindo que a posição do Sol não se altera a nível latitudinal. Essa evolução verifica-se com menor variação nas proximidades das zonas equatoriais, tornando o sistema mais eficiente nestas áreas geográficas. Estes seguidores são também conhecidos como seguidores de zénite, pelo simples facto da rotação do painel ser semelhante à descrição do ângulo de zénite [17, 22].

2.3.2.2 Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute

No seguidor de eixo vertical, Figura 2.7 b), o eixo de rotação encontra-se localizado no topo de uma base vertical fixa. É vulgarmente conhecido por seguidor azimutal e tem uma inclinação fixa que é definida pela latitude da localização onde se encontra instalado. Quanto maior for a latitude, maior será a inclinação do instrumento a seguir o Sol face à superfície terrestre. Deste modo, os seguidores de eixo vertical apresentam um maior rendimento em localizações a latitudes elevadas, porque esse parâmetro será controlado pela inclinação do instrumento em relação à superfície terrestre. A aplicação destes seguidores verticais é semelhante aos seguidores polares, porém com estruturas diferentes, nomeadamente no dimensionamento dos suportes traseiros [22].

2.3.2.3 Seguidor Polar de Eixo Único

O seguidor polar de eixo único, Figura 2.7 c), tem dois sentidos de rotação baseados num único eixo existente. Esse eixo estará posicionado perpendicularmente à movimentação do Sol, ou seja, orientado para norte e sul com o objetivo de concretizar o seguimento do Sol de nascente para poente, com a variação do seu ângulo de rotação [17, 22]. Este seguidor é bastante eficiente quando utilizado em zonas afastadas do equador, a valores elevados de altitude, dado possuir a particularidade de ajustar a inclinação consoante a variação da latitude. Este seguidor é simples de implementar, sendo um dispositivo de grande eficiência, face à incidência solar ser perpendicular aos instrumentos a suportar nos equinócios da primavera e outono [17, 22].

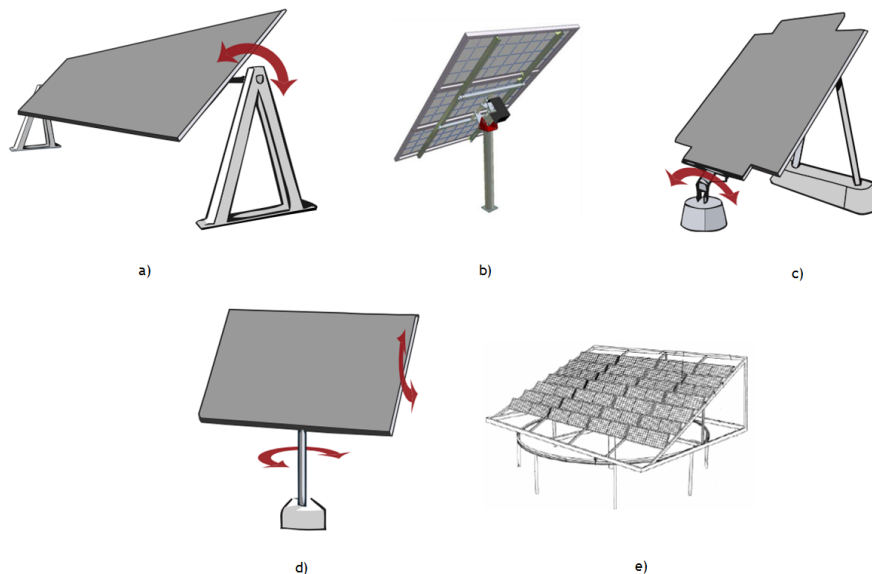


Figura 2.7: Seguidores solares ativos: a) de eixo horizontal, b) de eixo vertical, c) polar de eixo único, d) de dois eixos, e e) de plataforma rotativa de dois eixos [37, 38].

2.3.2.4 Seguidor de Dois Eixos

Este tipo de seguidor, Figura 2.7 d), dispõe de dois eixos de rotação, um no sentido norte-sul e outro no sentido este-oeste. Neste caso, a instrumentação irá efetuar o seguimento com grande rigor, uma vez que se consegue deslocar para cada ponto da localização do Sol, de forma a que a radiação fique perpendicular ao instrumento a suportar. Em parques solares de grande dimensão, por exemplo, este é o tipo de seguidor mais usado, dada a sua flexibilidade. Tem, contudo, uma desvantagem, relacionada com a necessidade de uma estrutura bastante robusta para suportar todo o equipamento. Para além disso, em situações em que haja elevadas velocidades de vento é necessário o bloqueio dos motores, o que o sujeita a esforço mecânico adicional [17, 22]. Um seguidor de eixo vertical tem um rendimento inferior a 7% comparativamente com um seguidor de dois eixos. Assim, apesar desta diferença, pode-se justificar a opção por um seguidor mais simples [17].

2.3.2.5 Seguidor de Plataforma Rotativa de Dois Eixos

O seguidor de plataforma rotativa de dois eixos, Figura 2.7 e), está dotado de uma plataforma que executa um movimento rotativo, de forma a efetuar o seguimento do Sol no sentido este-oeste, enquanto que o seguimento norte-sul é feito com base num eixo hidráulico, cujo objetivo é variar a inclinação do instrumento a suportar. A desvantagem desta estrutura é o facto de necessitar de uma manutenção periódica, devido ao desgaste das zonas móveis do sistema e também da necessidade de remover obstáculos que surjam na área do seguidor. Este tipo de dispositivos necessita de muito espaço para exercer o seguimento, tornando o sistema desvantajoso, já que atualmente se pretende a rentabilização da área ocupada [17, 22].

2.4 Sistemas de Controlo para Seguidores Solares

Os sistemas de controlo têm como principal objetivo garantir o funcionamento de toda a estrutura dentro dos parâmetros definidos. Existem várias formas de efetuar o seguimento

solar, nomeadamente através das configurações de controlo em malha aberta ou controlo em malha fechada. Segue-se breve explicação destes dois tipos de controlo e exemplos usados para seguimento solar.

2.4.1 Controlo de Malha Aberta

O controlo em malha aberta é um sistema que não possui realimentação, uma vez que a entrada não depende da saída. Este sistema consiste em aplicar um sinal à entrada, esperando-se que na saída se obtenha o comportamento desejado. Assim, os dados que forem inseridos na entrada serão projetados para a saída. O controlo em malha aberta deverá ser aplicado a um sistema determinístico, isto é, a um sistema em que se conheça o modo de operação, caso contrário pode-se obter um resultado diferente do esperado. Na Figura 2.8 apresenta-se um diagrama simples para uma configuração em malha aberta.

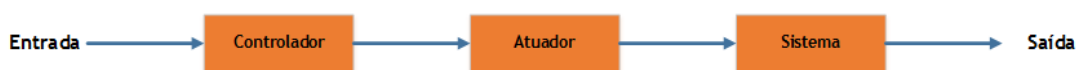


Figura 2.8: Exemplo de um sistema de malha aberta.

2.4.1.1 Seguimento Solar sem o uso de Sensores

Este tipo de seguimento é um exemplo de controlo em malha aberta, sendo realizado através do uso de algoritmos que vão calcular as coordenadas solares. Os algoritmos de controlo podem ser classificados em três grupos distintos, dependendo da complexidade da implementação [22]:

1. Implementação de algoritmos com expressões simples onde o único dado necessário é a data. O controlo é feito com base em incrementos periódicos do ângulo de seguimento solar.
2. Implementação de algoritmos onde são necessários a utilização das coordenadas de localização (latitude e longitude), da data e da hora da localização do seguidor solar para o cálculo das coordenadas solares, azimute e elevação. As margens de erro deste tipo de algoritmos rondam aproximadamente os $0,28^\circ$.
3. Implementação de algoritmos mais complexos, nos quais são necessários parâmetros como a data, a hora, a temperatura, a pressão, as coordenadas de localização, e entram em consideração com fatores astronómicos como a declinação solar, excentricidade da órbita do planeta Terra e o fator de correção associado, entre outros. Os resultados destes algoritmos são traduzidos numa precisão da posição do Sol com margens de erro na ordem dos $0,0003^\circ$. Um exemplo de um algoritmo deste tipo é o SPA, que foi primeiramente descrito por Jean Meus em [39], tendo sido alvo de novas edições ao longo dos anos, sendo a última versão editada por Ibrahim Reda e Afshin Andreas [40].

2.4.2 Controlo de Malha Fechada

Este controlo é baseado num comando cíclico, onde as variáveis do sistema são atualizadas periodicamente. Para o seguimento solar, por exemplo, a atualização pode ser feita através de sensores de luminosidade que medem a posição do Sol ao longo do dia. Na Figura 2.9

apresenta-se um diagrama de um sistema de controlo de malha fechada, onde basicamente existe um controlador associado a um atuador que sofre atualizações provenientes dos sensores colocados no seguidor. Neste caso específico, o atuador será composto pelos motores que farão movimentar toda a estrutura do seguidor solar, e os sensores estão associados a resistências dependentes de luz.

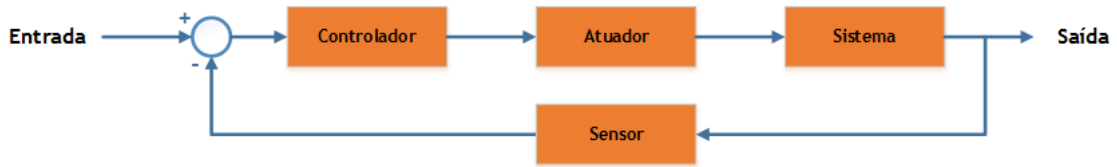


Figura 2.9: Exemplo de um sistema de malha fechada.

2.4.2.1 Seguimento Solar com o uso de Foto-sensores

Os foto-sensores são dispositivos que variam as suas características elétricas consoante a quantidade de radiação solar que neles incide. Estes dispositivos são aplicados em circuitos de malha fechada, uma vez que estão em constante leitura, atualizando os dados de uma forma cíclica. Geralmente são usados, pelo menos, dois foto-sensores aplicados em cada extremo do seguidor, de forma a verificarem-se variações do valor obtido pelos sensores consoante a variação de incidência solar. Se o valor em ambos sensores for diferente, significa que o ângulo de incidência do Sol não é perpendicular ao seguidor e será enviada uma informação para ativar os atuadores [17, 22]. Um inconveniente deste tipo de sensores passa pela sensibilidade perante as condições atmosféricas, nomeadamente o estado do tempo e a humidade [26].

Uma resistência dependente de luz, também designado como LDR ou foto-resistência, é um exemplo de um dispositivo cuja resistência depende da quantidade de luz incidente sobre ele. Estes são manufacturados com semicondutores de alta resistência, sendo o mais comum os de sulfeto de cádmio (CdS), mas também poderão ser de arsenieto de gálio (GaAs). Este é um componente passivo cuja resistência é inversamente proporcional à quantidade de intensidade de luz nele incidente [25, 28, 34, 41, 42]. Se a luz incidente sobre o dispositivo for de frequência suficientemente alta, os fotões absorvidos pelo semicondutor fornecem energia suficiente para saltar para a banda de condução. O eletrão livre resultante (e seu parceiro de buraco) conduzem a eletricidade, diminuindo assim a resistência [43]. A partir do gráfico mostrado na Figura 2.10 pode ser claramente observado que a resistência do LDR é inversamente proporcional à intensidade de luz, isto é, à medida que a intensidade da luz aumenta a resistência do LDR diminui, e vice-versa.

Para utilizar um LDR, este deverá ser colocado em série com uma resistência, e de seguida formar um divisor de tensão na junção entre ambos. A tensão dela proveniente irá ser, então, a entrada para o microcontrolador [15, 28]. Com isto em mente, poderá ser feita, então, uma comparação deste valor com um outro valor de referência para uma aplicação desejada. No caso de aplicação para um seguimento solar, terá que se ter em conta as características de cada sensor. Os LDR devem ser quase idênticos, porque o método de medição assume correntes idênticas no caso de irradiância idêntica. Se as características não forem idênticas, a posição do seguidor não irá tomar a posição ideal. Para tal, é necessário medir a resistência de todas as células em relação ao nível de iluminação [31].

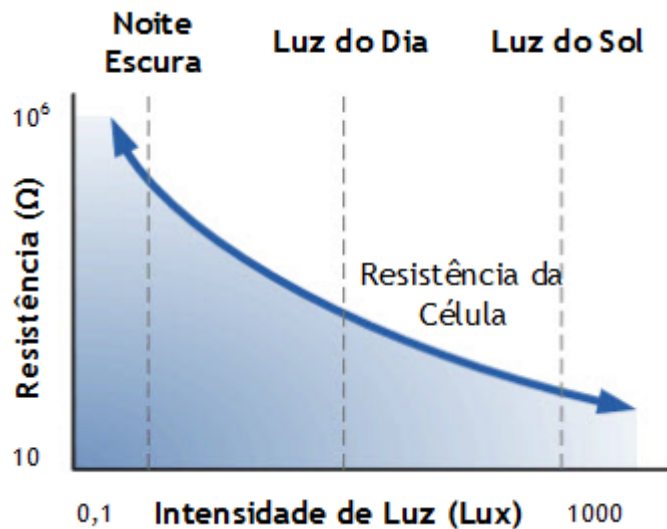


Figura 2.10: Resistência vs Intensidade de Luz. Adaptado de [44].

2.4.2.2 Seguimento Solar por via da Visão Artificial

A visão artificial é uma tecnologia que pode ser usada para seguimento solar onde se use um sistema de aquisição de imagem, como uma câmara, para determinar a posição do Sol. Este método usa algoritmos com maior complexidade em relação ao uso de foto-sensores. O princípio de funcionamento deste seguidor passa por definir um ponto central no campo de visão da câmara com o objetivo de controlar a posição do Sol, recorrendo sempre a essa referência. Deste modo, o seguidor terá uma grande precisão no seguimento, sendo que o algoritmo de controlo terá a funcionalidade de manter o Sol na referência em cada instante [17, 22]. O que torna o sistema desvantajoso é o facto de ser necessária uma manutenção periódica e a instalação ser complexa, uma vez que há a necessidade de se usar filtros de proteção na câmara para evitar que o equipamento perca precisão ou se danifique. As poeiras e a humidade na lente ótica da câmara também podem influenciar a leitura dos dados do algoritmo, comprometendo a resposta do seguidor solar. No entanto, seguem-se as vantagens apontadas a este tipo de sistema [17, 22]:

- grande resolução e precisão, visto que permite localizar objetos de características conhecidas,
- capacidade de visualizar a aproximação de nuvens, que em seguidores solares com foto-sensores torna-se problemático,
- grande visão periférica, dando uma larga margem de utilização na implementação dos algoritmos.

2.4.2.3 Seguimento Misto

Este tipo de controlo é uma junção dos dois tipos de controlo, de malha aberta, com o uso de algoritmo para cálculo da posição do Sol, e de malha fechada, com a utilização de sensores. A vantagem em relação aos outros tipos de controlo é o facto de poder usar algoritmos de menor fiabilidade para determinar uma posição aproximada do sol e de seguida usar os sensores para fazer a localização de forma mais precisa.

2.5 Motores de Passo

O motor de passo é um dispositivo eletromagnético que traduz impulsos digitais em rotação do eixo mecânico (rotor). Quando são aplicados impulsos de comando elétrico numa sequência correta, o rotor do motor de passo gira em incrementos discretos, denominados de passos. A sequência dos impulsos aplicada está diretamente relacionada com a direção de rotação do eixo do motor, a velocidade da rotação do rotor está diretamente relacionada com a frequência dos pulsos de entrada, e o comprimento da rotação está diretamente relacionada com o número de impulsos de entrada aplicados [45, 46, 47]. Esta é a particularidade que distingue os motores de passo dos motores DC, uma vez que estes apresentam rotação contínua. Embora seja possível acionar um motor de passo de forma a obter uma rotação perto da contínua, isto requer maior subtileza na forma de onda de entrada que conduz o motor. A Figura 2.11 ilustra algumas diferenças básicas no passo e rotação do motor DC.

Geralmente, um motor de passo consiste num estator, um rotor com um eixo, e enrolamentos de bobina. O estator consiste numa carcaça circundante que permanece estacionária e faz parte da caixa do motor, enquanto o rotor constitui o eixo central dentro do motor, que gira durante a utilização. As características destes componentes, e como se encontram dispostos, determinam o tipo de motor de passo, de relutância variável, de magneto permanente ou híbrido [45]. Os motores de passo são categorizados como máquinas duplamente salientes, o que significa que apresentam dentes de material magneticamente permeável, tanto no estator como no rotor. De acordo com o tipo de motor, a fonte de fluxo magnético pode ser um magneto permanente, um enrolamento para transporte de corrente ou uma combinação dos dois. No entanto, o princípio de funcionamento é igual: com a inserção do fluxo, são exercidas forças iguais e opostas nos dentes, de forma a minimizar o entreferro, isto é, minimizar o espaço entre dentes (2.12) [46].

A utilização dos motores de passo acarreta muitas vantagens [25, 43, 47]:

- maior simplicidade, uma vez que não há a necessidade do uso escovas,
- baixo custo,
- alta fiabilidade,
- alto torque a baixa velocidade,
- alta precisão de movimento.

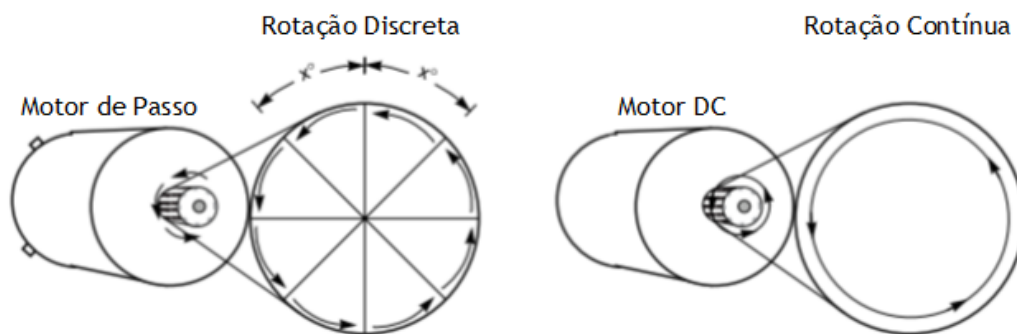


Figura 2.11: Diferença entre a rotação de um motor de passo e de um motor DC. Adaptado de [45]

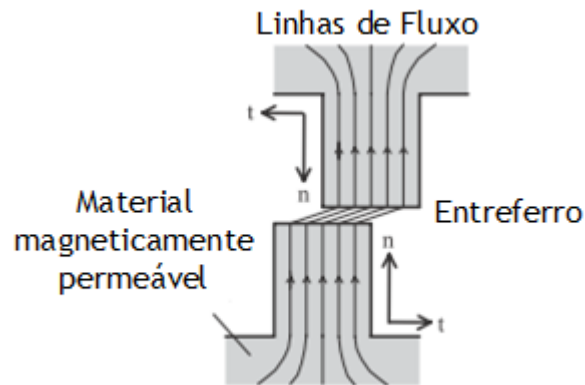


Figura 2.12: Ilustração das linhas de fluxo nos dentes do estator e rotor do motor de passo, e respetivo entreferro. Adaptado de [46]

2.5.1 Tipos de Motores de Passo

Existem três tipos de motores de passo, divididos da seguinte forma [25, 45, 46, 47]:

- **Motor de passo de relutância variável** – este gera rotação somente com forças eletromagnéticas. A fonte do fluxo magnético provém dos enrolamentos colocados sobre os dentes do estator. Aqueles são excitados sequencialmente, de modo a alinhar os conjuntos sucessivos de dentes do estator e rotor. Este motor não oferece resistência magnética para rodar, quando não se encontra alimentado.
- **Motor de passo de magneto permanente** – este gera rotação usando as forças entre o magneto permanente e um eletroímã criado por corrente elétrica. Uma característica interessante é que mesmo não estando alimentado, faz uso de uma resistência magnética para rodar.
- **Motor de passo híbrido** – o motor de passo híbrido apresenta uma estrutura duplamente saliente, mas o circuito magnético é excitado por uma combinação de enrolamentos com um magneto permanente. Os enrolamentos são colocados em polos do estator, o rotor é multidentado como o motor de relutância variável, possuindo um magneto axialmente magnetizado, montado concentricamente em torno do veio. Os dentes no rotor providenciam um melhor caminho, de forma a orientar o fluxo magnético para locais pretendidos no entreferro. Tudo isto beneficia as características de torque quando comparado com os outros dois tipos.

2.5.2 Motor de Passo Unipolar e Bipolar

Os dois tipos mais comuns de motores de passo são o motor bipolar e o motor unipolar. Os motores bipolares e unipolares são semelhantes, exceto que o unipolar tem um fio central em cada enrolamento. O motor bipolar precisa de corrente para ser conduzido em ambas direções através dos enrolamentos, e é necessário um driver de ponte completa. A derivação central no motor unipolar permite um circuito de condução mais simples, o que limita o fluxo de corrente numa só direção. A principal desvantagem do motor unipolar é a capacidade limitada para excitar todos os enrolamentos em qualquer momento, o que resulta num torque reduzido em comparação com o motor bipolar. O motor de passo unipolar pode ser usado como um motor bipolar desligando a derivação central [47].

2.5.3 Princípios Básicos do Funcionamento do Motor de Passo

Os motores de passo possuem pinos de entrada, ou contactos, que permitem que uma corrente de uma fonte de alimentação flua nos enrolamentos da bobine do motor. Para acionar um motor, é necessário a criação de campos eletromagnéticos e, estes podem ser gerados através de formas de onda pulsadas num padrão distinto. Dependendo do design e das características do motor de passo e do desempenho do motor desejado, algumas formas de onda funcionam melhor do que outras. Existem várias opções de formas de onda para conduzir um motor de passo, dando a possibilidade ao motor de funcionar ou por passo completo, ou por meio passo, ou por micro passo. De forma a facilitar o entendimento destes tipos de condução, temos como exemplo a seguinte figura 2.13. Nesta temos um exemplo de uma condução por meio passo, onde se encontram quatro sinais. Estes sinais podem ser produzidos por um driver dedicado para o efeito ou por um microcontrolador. Cada sinal (a , \bar{a} , b , \bar{b}) é aplicado a um terminal de bobine. Como cada bobine tem dois terminais, dois sinais devem trabalhar juntos para conduzir uma única bobine. Se considerarmos o terminal a como uma referência positiva, então a combinação dos sinais a e \bar{a} faz com que a bobine veja um sinal efetivo A, mostrado na figura 2.13 b). Do mesmo modo, o sinal B na figura 2.13 b) é gerado por combinação dos dois sinais b e \bar{b} da figura 2.13 a). De notar que as formas de onda de cada sinal (a , \bar{a} , b , \bar{b}), provenientes diretamente dos pinos do microcontrolador para os terminais da bobina, só variam de 0 V a +5 V. No entanto, o sinal efetivo (A, B) aplicado à bobina varia de -5 V a +5 V, e tem ciclos de trabalho positivos e negativos. Duas destas formas de onda eficazes, mostradas na figura 2.13 b), desfasadas de 90° podem ser usadas para conduzir o motor de passo. Ambas as formas de onda são aplicadas ao motor simultaneamente. Cada transição em uma das formas de onda corresponde a uma mudança de estado no motor, isto é, a um movimento do rotor. Em conjunto, as figuras 2.13 a) e b) mostram oito estados diferentes para o funcionamento em meio passo.

Segue-se uma descrição de como estas formas de onda trabalham juntas para mover o eixo do motor: Quando o sinal na bobine A é positivo e o sinal na bobina B é zero, a corrente flui para a bobine A através do terminal a e para fora do terminal \bar{a} . Isto gera um campo eletromagnético do polo norte em direção ao disco magnético, que repele a secção de polo norte mais próxima no disco e atrai a secção de polo sul mais próxima. Essas forças fazem com que o motor gire numa direção que alinhe polos opostos. A bobine B não se encontra alimentada. Enquanto o sinal na bobine A é alimentado positivamente, a transição seguinte ocorre no sinal na bobina B. O sinal sobe e alimenta positivamente a bobina B, criando um campo eletromagnético. A corrente elétrica flui para o terminal b e para fora do terminal \bar{b} . O pólo norte de ambas as bobinas agora compartilham uma atração para o polo sul do disco, fazendo com que o disco se realinhe (gire) entre atrações compartilhadas. A mesma ação ocorre com o polo sul das bobinas e polo norte do magneto. Para a transição seguinte, o sinal na bobine A cai para zero, deixando o sinal na bobina B dominar o alinhamento do magneto.

Em resumo, as bobines A e B controlam o movimento do rotor à vez. Antes de uma bobine libertar o controlo total do magneto, vai compartilhar o controlo do disco com a outra bobine. Esta partilha temporária cria um meio passo na transição de controlo de uma bobina para a outra, o que permite que ocorram passos menores. Embora os motores de passo sejam frequentemente utilizados pela sua capacidade de tomar movimentos discretos, também podem ser utilizados para movimentos suaves. Em caso ideal, as formas de onda que permitiriam a menor mudança incremental seriam realmente sinusoidais para garantir a transição mais suave entre etapas completas. Nesse caso, a distinção entre estados e etapas específicas torna-se desfocada. Esta implementação pode ser adequada para aplicações que necessitam de reduzir ou eliminar o

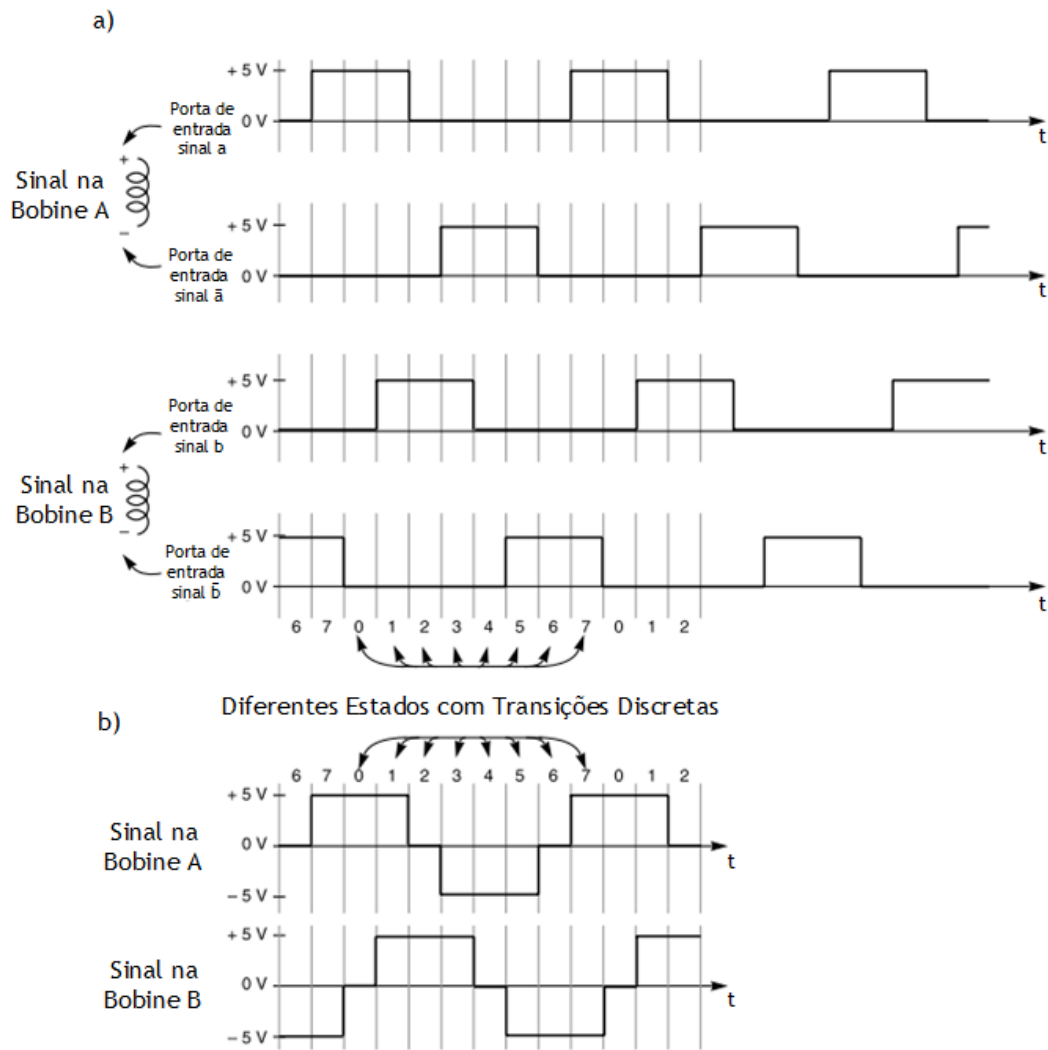


Figura 2.13: Formas de onda para controlo de um motor de passo. Adaptado de [45]

movimento discreto do motor, o que também reduz o ruído e a vibração do mesmo. Esta técnica é comumente referida como micro passo.

2.6 Revisão Bibliográfica

Nesta secção irá ser feita uma breve revisão da literatura em relação aos tipos de seguidores solares que têm vindo a ser desenvolvidos e estudados.

Os autores de referência [21], desenvolveram um protótipo de seguimento solar de dois eixos utilizando cinco foto-díodos. O quinto foto-díodo atua como sensor solar para medir o ângulo da luz solar entre os painéis solares e o Sol. O sistema de monitorização solar consiste em dois motores de corrente contínua, cinco foto-díodos, um microcontrolador e uma estrutura mecânica. Os motores de corrente contínua são usados para guiar a estrutura nas direções de azimute e de elevação. Os foto-díodos agem como sensor solar para medir o ângulo de direção da luz solar; o microcontrolador processa os dados e emite o sinal para os motores de corrente contínua. Segundo os autores, este sistema apresenta uma resposta para acompanhar as mudanças de luz solar com erro de 5°.

Em [25], apresentam um sistema de seguimento solar ativo para painéis solares, cuja

operação consiste em ler uma série de valores dos sensores de luz, compará-los e posteriormente posicionar um motor para se alinhar com o maior valor que corresponde à posição do Sol. Toda a parte de controlo deste sistema foi promovida por um microcontrolador PIC16F877. Segundo os autores, este sistema apresentou um acréscimo de 13,33% na geração de energia solar face à inexistência de um sistema de seguimento solar, isto é, um sistema onde o painel fotovoltaico se encontra fixo.

Em [26], integraram câmaras de vídeo em seguidores solares para posicionar diretamente o sistema para o sol. O uso da câmara serve para estimar a posição do sol relativamente ao centro da imagem. Esta informação é usada para definir a relação entre a disposição dos pixel com os valores angulares que redirecionam o sistema de posição. Para tal, apresentam um algoritmo de calibração para estimar um mapeamento preciso, através de uma função de transformação T com o intuito de converter a deslocação dos pixels (x,y) , que equivale à posição do sol num mapa cartesiano, em coordenadas angulares (θ_x, θ_y) , para assim se atingir um seguimento solar de alta precisão.

Em [29], foi projetado e desenvolvido um sistema global de seguimento solar de duplo eixo baseado em equações astronómicas. O sistema utiliza um módulo GPS e uma bússola digital para determinar a localização e o rumo do sistema, respetivamente, usando estes dados como *feedback* para o controlo do sistema. O algoritmo criado gera um banco de dados da trajetória solar utilizando a informação reconhecida pelo módulo de sensor de Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para além disto, os autores introduziram um controlador PID no microcontrolador usado, um PIC18F4431, o que fez com que a precisão dos ângulos de elevação e azimute apresentassem um erro de $0,2^\circ$.

Em [30], descreve um sistema de seguimento solar ativo, que calcula a posição do sol em função da posição e do tempo topocêntrico. É apresentado um sistema automático de seguimento solar por via de um microcontrolador PIC16F877A. Os testes de posicionamento solar incluíram dois testes de calibração do motor primário e um teste de posicionamento heliostático com dois microinterruptores. Os erros de medição dos testes de posicionamento do motor encontravam-se na faixa de $0,22^\circ$, enquanto que os testes de posicionamento solar realizados mostraram um erro de $0,21^\circ$.

O autor de referência [41], descreve detalhadamente o projeto e construção de um protótipo de seguimento solar com dois graus de liberdade, que deteta a luz solar usando LDRs. O circuito de controlo do seguidor solar é baseado num microcontrolador PIC16F84A. Este é programado para detetar a luz solar através das foto-células e, em seguida, atuar o motor para posicionar o painel solar de forma a receber a luz solar máxima.

Os autores de referência [42], dimensionaram um sistema de seguimento solar de dois eixos com supervisão remota. O sistema é composto por um processador ARM BeagleBone Black (BBB), com o Linux como sistema operativo, resistências dependentes de luz e servo motores. Segundo os autores, a facilidade de conectividade à Internet fornecida pelo BBB leva este sistema para o próximo nível, permitindo aos usuários monitorizar o seguimento solar de painéis solares em tempo real, com a quantidade total de eletricidade gerada, de qualquer lugar do mundo.

Os autores de referência [48], apresentaram um método de controlo aberto alternativo, baseado num sistema PLC. Este último tem uma memória programável em que as instruções são armazenadas para implementar várias funções, utilizadas para controlar a atuação dos processos. Foi concebido e incluído um programa no sistema do PLC para determinar as posições das superfícies de seguimento em função do tempo. O programa guia o atuador que, por sua vez, move as superfícies de controlo para as posições requeridas. Foram utilizados dois motores para fazer o seguimento. Um para rodar em torno do eixo horizontal, para controlar o ângulo

de azimute, e o outro para a rodar em torno do eixo vertical, para controlar o ângulo de zênite. Os autores concluíram que este sistema apresentou um aumento da captura solar em 41%, comparativamente com um sistema fixo de 32° de ângulo relativo ao solo.

Em [49], foi feito um estudo a três algoritmos distintos com a função de orientar um painel fotovoltaico para o Sol, seguindo o seu movimento ao longo do dia. O painel encontra-se montado sobre uma estrutura mecânica capaz de o orientar de este para oeste, ou seja, utiliza somente um único eixo. O controlo é feito através de um micro-controlador para recolha de dados de um sensor de tensão e um de corrente. O sensor de tensão é ligado em paralelo ao *output* do painel, ao passo que o sensor de corrente é conectado em série. O micro-controlador calcula a potência obtida a partir dos dados recolhidos, usando a Lei de Ohm, e vai controlar o sistema com um algoritmo baseado na potência calculada. Os algoritmos estudados pelos autores foram os seguintes:

1. No primeiro algoritmo, o microprocessador faz o cálculo da potência para três posições intervaladas de x graus, e a partir dos valores obtidos toma a decisão de rodar para este, oeste ou manter-se no mesmo lugar. Neste, o autor salienta que a inexatidão em prever a melhor posição, especialmente no pôr-do-sol e com nebulosidade, torna o algoritmo problemático.
2. No segundo algoritmo, é feito um seguimento desde este a oeste num movimento passo a passo, isto é, um movimento onde é incrementado um passo com y tamanho ou ângulo, de x em x tempo. O tamanho deste passo é derivado das equações astronómicas. O sistema é um sistema de ciclo aberto uma vez que não possui realimentação (*feedback*) da potência gerada a cada posição. Os autores salientam que os principais fatores que afetam a exatidão e uma toma de decisões corretas são as variações de nascer e pôr-do-sol e a necessidade de métodos precisos para calcular os desvios angulares sofridos ao longo do dia.
3. O terceiro algoritmo, proposto pelos autores, é uma combinação dos dois primeiros algoritmos, o qual opera da seguinte forma: o dia é dividido em cinco períodos de tempo. Durante cada período, o seguimento solar move-se livremente para alcançar a posição “ótima” de acordo com o mecanismo adotado no primeiro algoritmo. No final do período de tempo, o algoritmo força o seguidor para uma posição determinada, dando-se o início do próximo período de tempo. Enquanto se move livremente, o algoritmo compara entre a potência gerada na posição anterior e na atual. Se a alimentação no local atual é maior, o seguidor irá continuar a mover-se na mesma direção. Se a leitura anterior é maior do que a leitura corrente, o seguidor irá inverter a sua direção.

Os autores de referência [50], apresentam um protótipo automático de seguimento solar de dois eixos com um mecanismo de seguimento da posição solar, um sistema de supervisionamento sem fios e um sistema de controlo. É composto por um PLC, motores DC, parafusos de rosca sem fim, foto-sensores, *encoders* e relés de potência. De acordo com o sinal de realimentação proveniente dos *encoders* e sensores, o PLC vai comandar os motores DC de modo a controlar os ângulos de elevação e orientação dos painéis solares, de forma a que estes se mantenham sempre perpendicular à luz solar. Cada parâmetro do sistema é recolhido pelo PLC que, por sua vez, é transmitido, através de um módulo externo, para um programa de supervisão e controlo num computador, através de uma rede sem fios. Este sistema apresentou um aumento na geração de energia proveniente do solar, em comparação com sistemas de ângulo fixo, em cerca de 17 a 25% em dias de sol, e cerca de 8 a 11% em dias nublados.

Em [51], foi realizado um controlador *Fuzzy* para aplicação num sistema de seguimento solar. Este controlador é usado para operar um motor de acordo com o erro proveniente de um foto-sensor, composto por dois foto-díodos, de forma a melhorar o ganho de um conjunto de painéis fotovoltaicos. Para se avaliar os resultados obtidos, os autores fizeram uma comparação com um controlador proporcional (P) convencional. Chegaram à conclusão que o controlador *Fuzzy* apresenta melhores resultados, em termos de ganho e poupança de energia, em ambas situações de presença de radiação solar persistente e sinuosa.

Os autores de referência [52], apresentam um sistema que consiste num sensor LDR, num motor DC e num sistema *wireless* Xbee. Um microcontrolador Atmega32 é o componente principal para controlar o sistema. Este irá seguir a localização do Sol para assegurar que o painel solar se mantenha sempre perpendicular com o Sol, maximizando a potência gerada.

Capítulo 3

Dimensionamento de um Seguidor Solar

Em geral, de uma plataforma desta natureza faz parte um sistema de controlo, destinado a movimentar um coletor solar. Este tem duas funções, seguir o Sol bidimensionalmente e concentrar a luz solar num recetor de energia solar. O sistema integrado, quando completo, geralmente inclui os seguintes elementos e componentes [16]:

1. **Subsistema de transmissão mecânica:** atuadores lineares, engrenagens helicoidais, unidades lineares, unidades de rotação e unidades de engrenagens planetárias fazem parte do sistema de posicionamento para focar o Sol;
2. **Motores elétricos:** motores elétricos DC ou AC para impulsionar as unidades mecânicas, através de controlo por corrente, frequência ou velocidade;
3. **Sistema de armazenamento de energia (baterias):** sistema *backup* de bateria para o armazenamento de energia e requisitos de start-up;
4. **Sistema de deteção de posição/movimento:** *encoders*, sensores de inclinação, foto díodos e resistências fotossensíveis para monitorizar a posição atual do instrumento, enquanto se desloca para a posição desejada;
5. **Algoritmo de posição solar:** algoritmo para calcular continuamente o vetor solar, como sejam os ângulos de azimute e de elevação solares;
6. **Unidade de controlo:** dispositivo programável de modo a coordenar os modos de operação, bem como a estratégia de controlo para posicionar o sistema de acordo com o algoritmo de posição ou das coordenadas provenientes do sensor solar;
7. **Interruptores limitadores:** dispositivos para impedir o movimento mecânico para além dos limites pré-definidos, a fim de evitar danos ao seguidor e cabos;
8. **Dispositivos com capacidades sensoriais atmosféricas e/ou ambientais:** deteção da intensidade de luz, piranómetro, anemómetro, sensor de temperatura ambiente, sensor de humidade e sensores de pressão atmosférica para detetar qualquer emergência ou riscos ambientais;
9. **Carga útil:** o sistema que se pretende apontar diretamente para o sol, sendo geralmente um elemento ótico, lente, coletor solar ou um sistema refletor com meios de colheita de energia solar.

No trabalho apresentado, vai-se dar destaque aos seguintes aspetos: os motores usados, a unidade de controlo, os interruptores limitadores e dispositivos com capacidades sensoriais atmosféricas/ambientais.

3.1 Considerações Físicas e Mecânica Tomadas

A principal consideração que se teve em conta foi o movimento aparente que o Sol toma durante o dia. O seguidor teria que seguir de leste para oeste, correspondente ao azimute, e num sentido vertical, de baixo para cima e vice-versa, a que corresponde à altitude solar. Posto isto, começou-se por fazer um primeiro esboço do seguidor solar, no qual se tomou como ponto de partida para modulação de um protótipo. Este foi subdividido em duas partes: a primeira correspondia à base e tampo circular que faria com que o seguidor tomasse o movimento rotacional para seguir o Sol em azimute, e a segunda seria composta por duas torres e um suporte para uma carga útil, tendo este último na sua composição um veio que lhe desse mobilidade para seguir o Sol em altitude. O esboço encontra-se na Figura 3.1. A fim de se dar mobilidade a ambas partes, seria necessário tomar o ângulo apresentado pelo movimento aparente do Sol por minuto. Como este toma um ângulo de aproximadamente $0,25^\circ$ por minuto, escolheram-se dois motores, um Nema 14 e um Nema 17, com engrenagens planetárias acopladas de forma a se conseguir uma maior resolução de passo, o mais próximo do desejado. As características dos dois motores encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características dos Motores Escolhidos.

	Nema 14	Nema 17
Tipo de Motor	Passo Bipolar	Passo Bipolar
Ângulo do Passo ($^\circ$)	0,35	0,35
Binário de Retenção (Ncm)	83,9	121,2
Corrente Nominal por fase (A)	0,8	0,4
Resistência de fase (ohm)	6,8	30
Tensão Recomendada (V)	12-24	12-24
Indutância (mH \pm 20%(1KHz))	10	34

Como ambos apresentam um ângulo de passo de $0,35^\circ$, dimensionou-se um sistema de correias síncronas e polias de forma a atingir um ângulo de $0,25^\circ$. Para tal, teve que se tomar

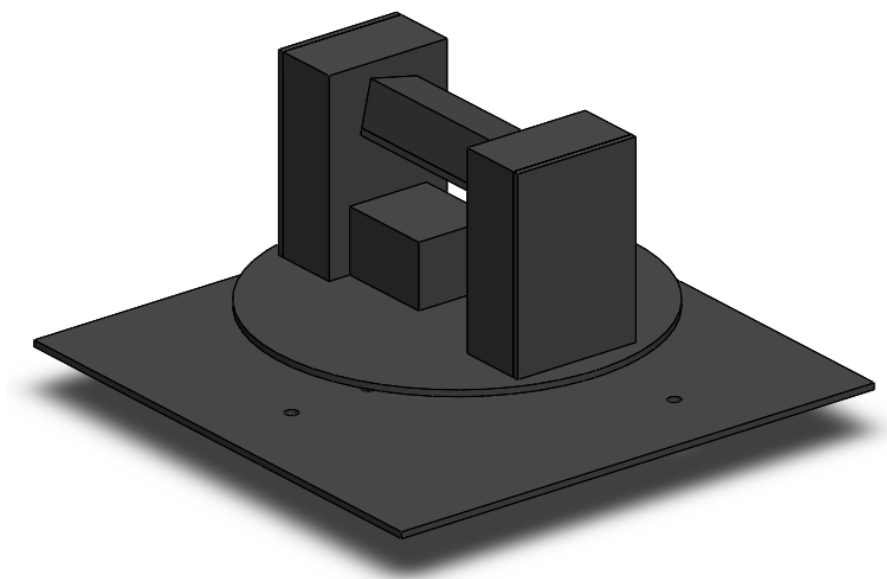


Figura 3.1: Esboço do protótipo do seguidor solar.

em conta a seguinte expressão:

$$Passo_e \times z_1 = Passo_s \times z_2 \quad (3.1)$$

Rearranjando de forma a se obter dois rácios:

$$\frac{Passo_e}{Passo_s} = \frac{z_2}{z_1} \quad (3.2)$$

Onde:

- $Passo_e$ - ângulo de passo de entrada no sistema - 0,35,
- $Passo_s$ - ângulo de passo de saída do sistema - 0,25,
- z_1 - número de dentes da polia condutora,
- z_2 - número de dentes da polia conduzida.

Pelo rácio entre os ângulos de passo, obtem-se o valor de 1,4. As polias que se escolherem, terão que tomar um rácio de número de dentes que seja igual a 1,4. Ou seja, combinaoes de, por exemplo, uma polia de 14 dentes e outra de 10 dentes, ou uma de 28 dentes e outra de 20 dentes, de 32 e 30, etc. Quanto maior fosse o número de dentes, maior se tornava a polia, logo teria que se escolher um número de dentes mais baixo. No caso em questão, adquiriu-se polias de 28 e 20 dentes. Com isto, passou-se ao cálculo da comprimento da correia a usar, usando a seguinte expressão matemática [53]:

$$l_B = \frac{p}{2} (z_2 + z_1) + \frac{p \times \alpha_i}{\pi} (z_2 - z_1) + 2C \times \cos \alpha_i \quad (3.3)$$

Em que:

- l_B - comprimento da correia, em mm,
- p - distância entre dentes da correia, em mm,
- α_i - ângulo de inclinaao que a correia toma aquando da saída da polia mais pequena para a maior, calculado através da expressão seguinte [53]:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{p(z_2 - z_1)}{2\pi \times C} \quad (3.4)$$

- C - distância entre os centros das polias, em mm.

Para este cálculo, é necessário fixar uma distância entre os centros das polias (C) de forma a se obter o comprimento de correia. Inicialmente, durante os primeiros esboços do protótipo, tinha-se fixado em 90 mm, o que daria uma correia com um comprimento aproximado de 300 mm:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{5(28 - 20)}{2\pi \times 90} \approx 0,071^\circ \quad (3.5)$$

$$l_B = \frac{5}{2} (28 + 20) + \frac{5 \times 0,071}{\pi} (28 - 20) + 2 \times 90 \times \cos 0,071 \approx 300,5 \text{ mm} \quad (3.6)$$

No entanto, só era possível adquirir uma correia de 305 mm de comprimento. Consequentemente, de forma a se obter este valor em l_B , a distância C passou a tomar o valor de 92,3 mm:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{5(28 - 20)}{2\pi \times 92,3} \approx 0,069^\circ \quad (3.7)$$

$$l_B = \frac{5}{2}(28 + 20) + \frac{5 \times 0,069}{\pi}(28 - 20) + 2 \times 92,3 \times \cos 0,069 \approx 305,0 \text{ mm} \quad (3.8)$$

A partir desta ideia, partiu-se para uma primeira modelação em três dimensões, através do software Solidworks da empresa Dassault Systemes, para uma primeira visualização do mesmo, de forma a se ter noção da complexidade do sistema, apontar falhas e melhorias que seriam necessárias para um movimento suave de toda a estrutura, com o objetivo de criar um protótipo em madeira do tipo MDF.

O primeiro ponto a mencionar passou pelo sistema de polias e correias. Para que funcionassem corretamente, seria necessário que as correias tivessem o mínimo de folga possível para que os sistemas rodassem com o passo desejado. Posto isto, recorreu-se à modelação de duas peças com um encaixe para suportar os motores e com uma capacidade móvel sobre a superfície onde iria ser aparafusada, com o intuito de ajustar a tensão das correias, observadas na Figura 3.2 a) e b). Ambas as peças foram impressas numa impressora 3D, nomeadamente uma Prusa i3.

Segundo ponto, a abordagem do veio central para mover a base superior do seguidor. Foi modelado um veio específico para o efeito, onde se teve que tomar em conta as dimensões dos rolamentos a usar para dar mobilidade à estrutura, e à altura entre bases. No entanto, também foi modelada uma peça, impressa posteriormente, na qual se suportariam dois rolamentos específicos para lidar com forças axiais, aparafusada à base inferior (Figura 3.2 c)). Com esta peça, em conjunto com o veio forjado, foi possível dar uma mobilidade bastante suave, sem qualquer tipo de barreira ao movimento da base superior.

Por último, fez-se uma limitação do movimento da base superior e do suporte da carga útil de forma a limitar o movimento do seguidor, sem causar danos e/ou impedimentos na passagem dos cabos de alimentação, tanto dos motores como dos LDR utilizados. Posto isto, utilizou-se 4 botões com o intuito de limitar o campo de movimento do seguidor. Em azimute, ou seja, na base superior, o campo ficou limitado entre 50° e 310° , e em zénite, nomeadamente para o suporte da carga, limitou-se para 0° e 90° . Sendo que neste último, foi modelado um componente para tocar nos botões quando se atinge as limitações do campo (Figura 3.2 d)). Irá ser abordado na próxima secção os circuitos de ligação para cada botão limitador. Os desenhos técnicos de todos estes componentes, encontram-se nos Apêndices A a E.

3.2 Considerações Eletrónicas Tomadas

Para o controlo de todo o sistema proposto, será necessário possuir *drivers* de potência para o controlo dos motores de passo, e respetivo uso de um microcontrolador para dar ordem de quando se deverá rodar ou não os motores. Ou seja, de quando o driver de potência deverá fluir corrente para as bobinas dos motores de passo. Segue-se uma breve explicação das características do *driver* escolhido para o efeito, o microprocessador utilizado e as ligações e cálculos necessários para o funcionamento dos motores usados.

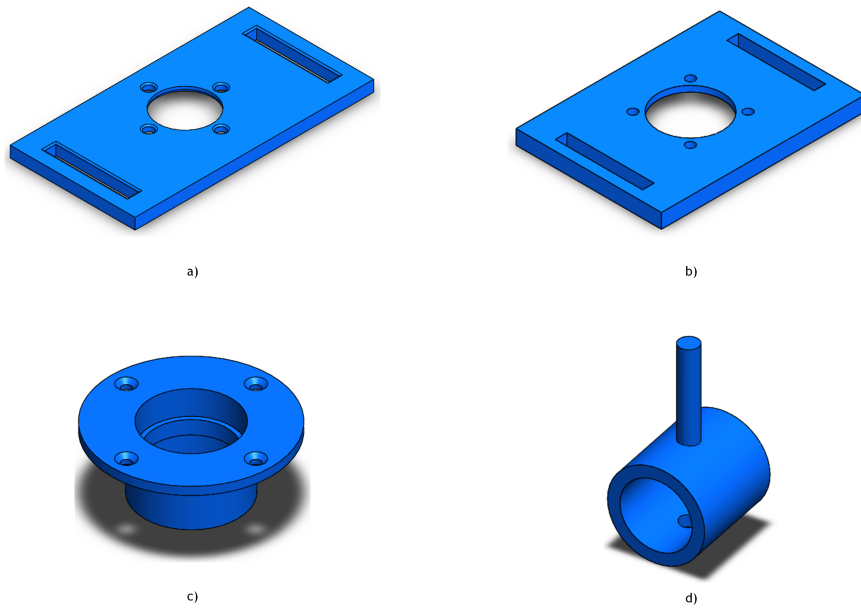


Figura 3.2: Componentes modelados e impressos para uso no protótipo de seguimento solar.

3.2.1 Microcontrolador Texas Instruments MSP430G2553 com *LaunchPad*

A família de microcontroladores de ultra-baixa potência MSP430 da Texas Instruments é constituída por vários dispositivos com diferentes conjuntos de periféricos, voltados para várias aplicações. A arquitetura, combinada com cinco modos de baixa potência, é otimizada para alcançar uma grande autonomia em termos de custos de bateria. Caracterizado pela arquitetura RISC, onde o conjunto de instruções e os modos de endereçamento são relativamente pequenos, de 16 bits, registros de 16 bits e compiladores que contribuem para uma máxima eficiência de código. No trabalho em questão, foi utilizado o microcontrolador MSP430G2553 com as seguintes características:

Tabela 3.2: Características do MSP430G2553 [54].

Características	MSP430G2553
Frequência (MHz)	16
Memória não volátil (kB)	16
RAM (kB)	0,5
GPIO	16
I2C	1
SPI	2
UART	1
ADC	ADC10 - 8 canais
Comparadores	8
V_{CC} mínimo	1,8
V_{CC} máximo	3,6
Consumo Ativo (μ A/MHz)	330
Consumo <i>Standby</i> (μ A)	0,7
Tempo de Despertar (μ s)	1,5
Características Adicionais	Watchdog, Sensor Temperatura, <i>Brown Out Reset</i> , IrDA

O *LaunchPad* da Texas Instruments, Figura 3.3, é uma ferramenta de prototipagem de

baixo custo para a família de microprocessadores MSP430 que fornece emulação *on-board* para programação e depuração por via USB. Possui também um botão de pressão de função geral, dois LEDs, um botão de *Reset*, dois *headers* de expansão e um *socket* DIP de 20 pinos para colocar microcontroladores de 14 a 20 pinos. A placa é alimentada por via da porta mini-USB com uma tensão de 5V, convertendo-a para 3.6V com a ajuda de um regulador LDO. A tensão de 3.6V é rotulada de V_{CC} na placa e as linhas V_{CC} e GND são expandidas para os *headers* J1, J2 e J6.

A secção de emulação cria uma interface entre o microcontrolador e o ambiente de programação, o que permite ao usuário programar o dispositivo de memória e depurar o código incorporado, passo a passo, para inspecionar a execução do programa e os registos internos. As secções de emulação também incluem um conversor USB para UART que pode ser configurado como interface entre um microcontrolador e um computador através de uma comunicação em série.

Todos os pinos do microcontrolador são expandidos para os *headers* J1 e J2 de forma a facilitar o uso dos portos do dispositivo durante a prototipagem. Consoante as necessidades do usuário, estes *headers* poderão tomar lugar a conectores machos ou fêmeas.

Uma das características que o MSP430 possui, sendo fundamental para este projeto, é a presença de um núcleo conversor analógico-digital de 10 bit. Em muitas aplicações de sistemas embutidos é necessário processar dados analógicos do mundo real. Exemplos de entradas analógicas passam por sensores que medem luz, temperatura, som, ou toque. Ao contrário de um interruptor ou outra entrada digital que se liga e desliga, uma entrada analógica varia ao longo de um intervalo contínuo de valores possíveis.

O núcleo ADC converte uma entrada analógica numa representação digital de 10 bit e armazena o resultado no registo ADC10MEM. O núcleo usa dois níveis de tensão programáveis / selecionáveis (V_{R+} e V_{R-}) para definir os limites superior e inferior da conversão. A saída digital, N_{ADC} é igual à escala completa, 1023, quando o sinal de entrada é igual ou superior a V_{R+} , e zero quando o sinal de entrada é igual ou inferior a V_{R-} . O canal de entrada e os níveis de tensão de referência, V_{R+} e V_{R-} , são definidos na memória de controlo de conversão.

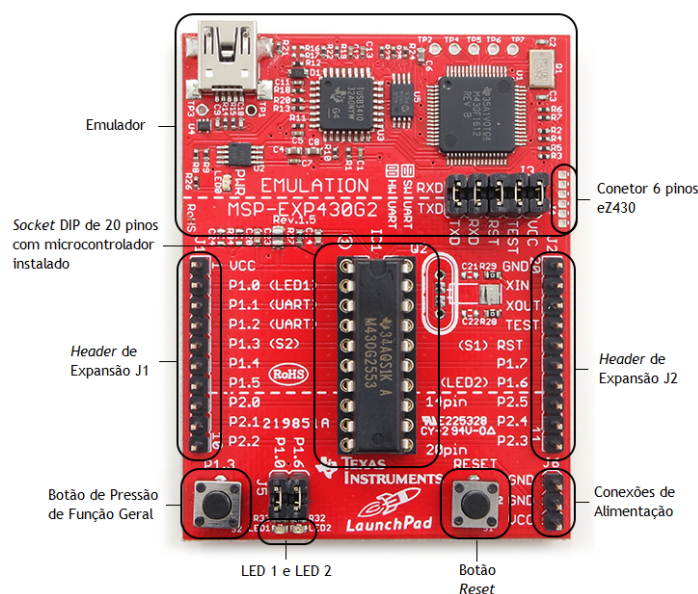


Figura 3.3: *LaunchPad* da Texas Instruments com MSP430G2553 montado no *socket* DIP. Adaptado de [54].

A fórmula de conversão para o resultado proveniente do ADC é:

$$N_{ADC} = 1023 \times \frac{V_{IN} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}} \quad (3.9)$$

O núcleo do ADC é configurado por dois registos de controlo, ADC10CTL0 e ADC10CTL1. O núcleo é habilitado com o bit ADC10ON. Os bits de controlo do ADC só podem ser modificados quando ENC = 0, isto é, quando o ato de conversão do ADC se encontra desabilitado. ENC deve ser configurado para 1 antes de qualquer início de conversão.

A comunicação série do MSP430 é tratada pelo periférico denominado USCI (Universal Serial Communications Interface), sendo este também fundamental para este trabalho. Trata-se de um periférico capaz de lidar com vários formatos de comunicação série, síncronos e assíncronos como o SPI, o I2C, o IrDA, o UART. O MSP430G2553 possui dois módulos USCI denominados como USCI_A0 e USCI_B0 para manusear com os vários formatos de comunicação. USCI_A0 pode ser configurado para lidar com o LIN, o IrDA, o SPI e a comunicação série assíncrona (UART), enquanto que o USCI_B0 pode lidar com o SPI e o I2C.

3.2.2 Driver A4988

De forma a se poder controlar os motores de passo mencionados, usaram-se dois *drivers*, um para cada motor, nomeadamente o *driver* A4988 manufaturado pela empresa Pololu. Este permite o controlo de um motor de passo bipolar de até 2 A de corrente de saída por bobina. Apresenta ainda as seguintes características:

1. uma interface de controlo de passo e direção simples;
2. cinco resoluções de passos diferentes, nomeadamente uma resolução de passo completo, meio passo, quarto de passo, oitavo de passo e décimo sexto de passo;
3. um controlo de corrente ajustável, o que permite que se defina, através de um multímetro, uma saída de corrente máxima, possibilitando o uso de tensões acima da tensão nominal de um motor de passo, para alcançar maiores taxas de passo;
4. um controlo por *chopper* inteligente que seleciona automaticamente o modo correto de decaimento de corrente (decaimento rápido ou decaimento lento)
5. proteções contra curto circuito, contra o funcionamento sob excesso de temperatura, o funcionamento sob subtensão e para com distorções de cruzamento (*crossover*) de corrente.

O *driver* A4988 requer uma tensão de alimentação lógica (3 - 5,5 V) a ser fornecida através dos pinos VDD e GND, e uma tensão de alimentação de motor (8 - 35 V) fornecida pelos pinos VMOT e GND. Como este *driver* usa condensadores cerâmicos de baixa ESR, isto é, uma baixa resistência equivalente em série, torna-o suscetível a receber picos de tensão LC destrutivos, danificando permanentemente a placa. Por isso, a alimentação deve possuir condensadores de desacoplamento apropriados, o mais próximo possível da placa, e devem ser capazes de fornecer as correntes esperadas.

3.2.2.1 Tamanho do passo e do micro-passo

Os motores de passo têm tipicamente uma especificação de tamanho de passo, por exemplo, 1,8° ou 200 passos por revolução, que se aplica a passos completos. O *driver* A4988 tem a

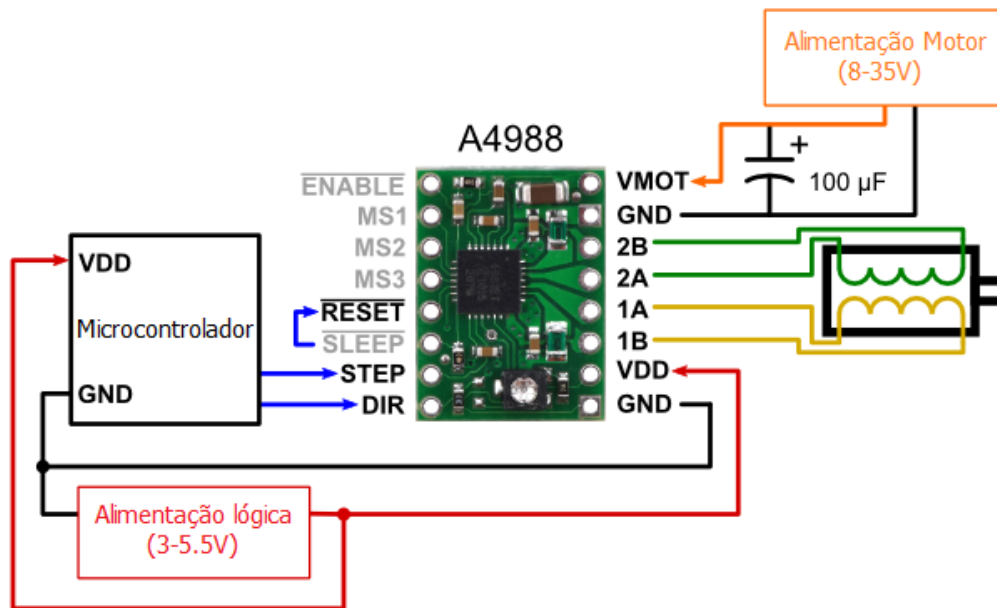


Figura 3.4: Esquema de conexão de um motor de passo a um *driver* A4988. Adaptado de [55].

capacidade para fazer *microstepping*, ou seja, de criar micro-passos dentro do número total de passos específicos de um motor, o que permite resoluções mais altas. Isto é conseguido através da alimentação das bobinas do motor com níveis de corrente intermediários. Por exemplo, a condução de um motor em modo de um quarto passo dará a um motor de 200 passos por revolução 800 micro-passos por revolução, usando quatro níveis de corrente diferentes.

As entradas MS1, MS2 e MS3 presentes no *driver* A4988, correspondentes à resolução tomada por o motor, permitem a seleção a partir das cinco resoluções de passo de acordo com a tabela abaixo. As entradas MS1 e MS3 possuem resistências internas *pull-down* de 100 k Ω , e a entrada MS2 possui uma resistência interna *pull-down* de 50 k Ω . Se estes três pinos se encontrarem não alimentados irá resultar numa resolução de passo completo.

Tabela 3.3: Habilitação do modo micro-passo no *driver* A4988. Adaptado de [55].

MS1	MS2	MS3	Resolução do micro-passo
Baixo	Baixo	Baixo	Um passo
Alto	Baixo	Baixo	Meio passo
Baixo	Alto	Baixo	Um quarto de passo
Alto	Alto	Baixo	Um oitavo de passo
Alto	Alto	Alto	Um décimo sexto de passo

Para que as várias formas de resolução funcionem corretamente, o limite de corrente deve ser ajustado suficientemente baixo para que a limitação de corrente seja ativada. Caso contrário, os níveis de corrente intermediários não serão mantidos corretamente e o motor saltará micro-passos.

3.2.2.2 Limitação de corrente

Uma maneira de maximizar o desempenho do motor de passo é o uso de um valor de tensão o mais alto desejado, necessário para a aplicação projetada. Este aumento permite, geralmente, taxas de passo e um binário de passo mais elevados dado que a corrente pode mudar mais rapidamente nas bobinas após cada passo. No entanto, para usar com segurança tensões

acima da tensão nominal de um motor de passo, a corrente da bobina deve ser ativamente limitada para evitar que exceda a corrente nominal do motor.

O *driver* A4988 suporta essa limitação de corrente ativa, e o potenciômetro *trimmer* na placa pode ser usado para definir o limite de corrente. Primeiro, é necessário calcular o valor da tensão de referência (V_{REF}) que corresponda ao valor de limite de corrente desejado, para posteriormente se ajustar o potenciômetro do *driver* até ser medido o valor calculado no respectivo pino V_{REF} . A equação para o cálculo da tensão de referência é a seguinte:

$$V_{REF} = 8 \times I_{MAX} \times R_{CS} \quad (3.10)$$

Onde:

- I_{MAX} - limite máximo de corrente desejado,
- R_{CS} - valor da resistência sensora de corrente - 0,050 Ω .

De notar que o *driver* A4988 apresenta diferentes valores de corrente aquando do modo de utilização de passo. No caso de se usar o motor de passo em modo de passo completo, a corrente que se irá observar é de apenas 70% da configuração atual do limite de corrente. Mas se se usar um modo de micro-passo, surge com outras percentagens de corrente, como pode ser observado na seguinte tabela:

Tabela 3.4: Percentagem de corrente em cada modo de utilização de passo. Adaptado de [56].

N.º Passo Completo	N.º Meio Passo	N.º ¹ / ₄ de Passo	N.º ¹ / ₈ de Passo	N.º ¹ / ₆ de Passo	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Ângulo Elétrico
	1	1	1	1	100,00	0,00	0,0
				2	99,52	9,80	5,6
			2	3	98,08	19,51	11,3
				4	95,69	29,03	16,9
		2	3	5	92,39	38,27	22,5
				6	88,19	47,14	28,1
			4	7	83,15	55,56	33,8
				8	77,30	63,44	39,4
1	2	3	5	9	70,71	70,71	45,0

3.2.2.3 Entradas de controle

Cada impulso injetado na entrada STEP corresponde a um micro-passo na direção selecionada pelo pino DIR. Tanto o pino STEP como o pin DIR não são habilitados por uma tensão interna e, como tal, não deverão ficar desconectados. Se se quiser apenas a rotação numa única direção, o pino DIR pode ser conectado diretamente em VCC ou GND. O *chip* possui três entradas distintas para controlo dos estados de energia, nomeadamente os pinos:

- \overline{ENABLE} - Liga ou desliga todas as saídas FET. Quando definido como alto, as saídas são desabilitadas. Quando configurado como baixo, o controlo interno habilita as saídas.
- \overline{RESET} - Configura o tradutor para um estado de origem predefinido e desliga todas as saídas FET. Todos os impulsos no pino STEP são ignoradas até se definir a entrada RESET como alto.

- \overline{SLEEP} - Para minimizar o consumo de energia quando o motor não está em uso, esta entrada desativa grande parte dos circuitos internos, incluindo as saídas FET, o regulador de corrente e a bomba de carga. Quando este pino se encontra no estado baixo, o *driver* A4988 entra em modo de suspensão. No estado inverso, permite o funcionamento normal, bem como o seu arranque. Ao sair do modo de suspensão, para permitir que a bomba de carga estabilize, é necessário existir um atraso de 1 ms antes de se emitir um impulso no pino STEP.

3.2.3 Cálculo de Limitação de Corrente no *Driver* A4988

Para que o funcionamento dos motores de passo seja dentro dos seus parâmetros máximos, é necessário tomar em conta a corrente máxima por fase de cada um. Como foi mencionado anteriormente, a corrente nominal por fase dos motores Nema 14 e Nema 17 corresponde a 0.8 A e 0.4 A, respetivamente. Para limitar que as bobinas dos motores sejam alimentadas com correntes superiores a estes valores, tem que se calcular, através das expressão (3.10), o valor da tensão de referência que o *driver* A4988 terá de possuir. Procedendo aos cálculos, o *driver* para o motor Nema 14 terá de possuir um valor de V_{REF} :

$$V_{REF} = 8 \times 0,8 \times 0,05 = 0,32V \quad (3.11)$$

O *driver* para o motor Nema 17 terá de possuir um valor de V_{REF} :

$$V_{REF} = 8 \times 0,4 \times 0,05 = 0,16V \quad (3.12)$$

Como em modo de passo completo, a corrente irá ser 70% do limite definido, será esperado medir uma corrente por fase de 0,56 A para o motor Nema 14, e uma corrente por fase de 0,28 A para o motor Nema 17.

3.2.4 Considerações ao Seguimento Solar por Malha Fechada

O objetivo deste género de seguimento solar assenta no controlo do protótipo por via de dois pares de LDRs, um para detetar o movimento do Sol em azimute, e o outro em zénite. Para isto, foi necessário usar o ADC10 presente no MSP430G2553, e os respetivos drivers A4988 para cada motor.

Para que o MSP430 possa medir a luz incidente nos LDR, utiliza-se um circuito divisor de tensão resistivo, isto é, um circuito composto por duas resistências, R1 e R2, sendo a primeira um LDR, com um nó entre elas de onde se ramifica uma saída para se obter uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada, V_0 , e que varie consoante a variação de intensidade luminosa sobre os LDR (Figura 3.5). Neste tipo de circuitos, se as duas resistências forem de igual valor, a tensão resultante será metade da tensão de entrada. Quanto maior for o valor de R1 em relação ao valor de R2, menor será a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Quando um LDR é usado como R1 no circuito, a tensão de saída aumentará proporcionalmente à intensidade luminosa incidente no LDR. A saída de tensão dos circuitos divisores resistivos pode ser calculada usando a seguinte expressão matemática:

$$V_0 = \frac{R2}{R2 + R1} \times V_{CC} \quad (3.13)$$

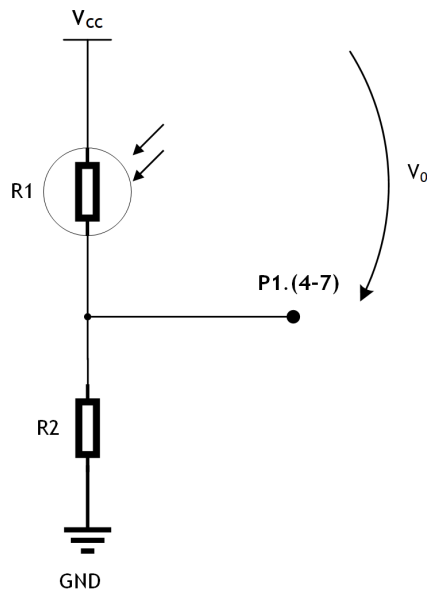


Figura 3.5: Circuito divisor de tensão resistivo com LDR.

A seleção do valor da resistência R2 tem que ter em conta o seguinte: uma vez que se quer usar um par de LDR para se verificar variações de intensidade de luz consoante a movimentação do Sol, é necessário que ambos os LDR estejam o mais próximos possível em termos de sensibilidade para com os diferentes valores de luminosidade presente. Por isso, começou-se por utilizar resistências na ordem dos $1\text{ k}\Omega$ e verificou-se se a tensão de saída V_0 para cada LDR se encontravam próximas, em 3 situações de luminosidade diferente: baixa, média e alta. Sendo baixa num ambiente relativamente escuro, média num ambiente de sombra, e alta com incidência direta do Sol. Para o par de LDR que faz o seguimento em azimute, as resistências R2 escolhidas para cada LDR, este e oeste, tomaram os valores de $1\text{ k}\Omega$, respetivamente. Para o par de LDR que faz o seguimento em zénite, as resistências R2 tomaram os valores de $1\text{ k}\Omega$ para norte e $1,2\text{ k}\Omega$ para sul. No entanto, para que se note diferenças de luminosidade em caso de incidência direta de luz, tem que se recorrer a um obstáculo ou a uma diferença de inclinação da base onde os LDR assentam, para que se gere uma sombra sob uma das resistências. Sendo a sombra uma indicação de que o Sol encontra-se numa posição diferente, ao qual o seguidor terá que se reposicionar.

Com isto em mente, procedeu-se à modelação de dois componentes suporte, recorrendo à trigonometria, um para cada par de LDR. O princípio passou por utilizar uma peça com uma haste de comprimento h , em que o centro de cada LDR estaria a uma distância x desta haste. A observação da Figura 3.6 torna mais fácil a compreensão desta temática. Nesta temos 3 fases, uma em que o Sol incide mais sobre o LDR do lado esquerdo, uma em que se encontram ao mesmo nível de incidência, e uma em que incide mais sobre o LDR do lado direito. Nas fases de desequilíbrio, a sensibilidade dos LDR difere, logo o controlo terá que atuar de forma a tender o sistema para o equilíbrio. Ou seja, o objetivo pretendido é a de que o seguidor esteja sempre na fase de equilíbrio. Consoante a posição do Sol em relação à haste, o ângulo que este faz com a haste proporciona o surgimento, ou não, de uma sombra sobre o LDR. O ângulo de incidência da luz é o ponto fulcral nesta fase. Dependendo da precisão pretendida para o efeito, quanto mais pequeno for o ângulo de precisão, mais os LDR terão que estar próximos da haste, e vice-versa. Por exemplo, se se pretender um ângulo de 25° e fixando uma altura da haste de 25 mm , irá se

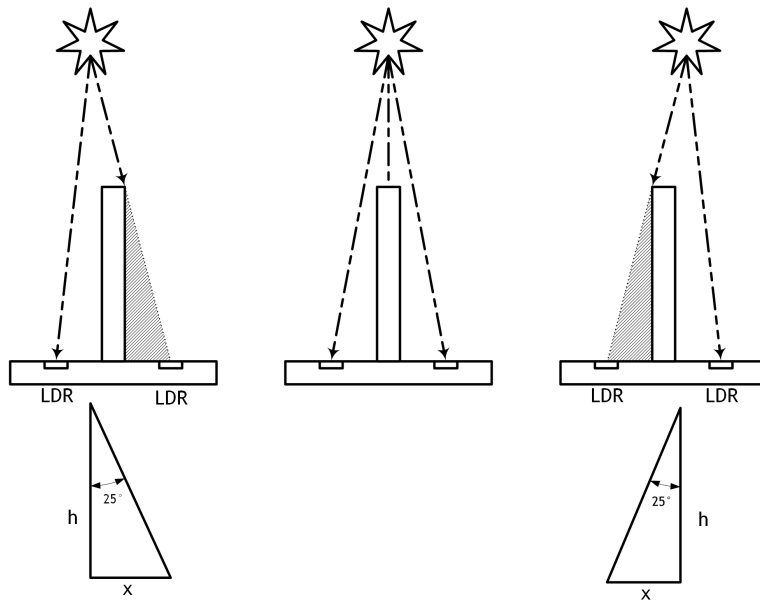


Figura 3.6: Princípio de funcionamento para o suporte dos LDR.

obter o valor da distância do centro do LDR à haste, x , pela seguinte expressão:

$$x = \tan(25) \times 25 \approx 11,7\text{mm} \quad (3.14)$$

No projeto em questão, usou-se uma haste com 25 mm de altura, 9,5 mm de distância x para ambos componentes, tendo como diferença a orientação dos pares em cada suporte. Os produtos finais, impressos na impressora 3D, podem ser observados na Figura 3.7, e respectivos desenhos técnicos nos Apêndices F e G.

Para se limitar o campo de luz incidente nos LDR, de forma a evitar interferências provenientes de outras fontes luminosas, modelaram-se quatro peças, duas para cada suporte. Podem ser observados na Figura 3.8, onde o a) e o b) correspondem à base de seguimento em azimute lado oeste e este, respectivamente, e c) para a base de seguimento em zênite, sendo esta última semelhante tanto para norte como para sul. Os respectivos desenhos técnicos podem ser acedidos nos Apêndices H, I e J.

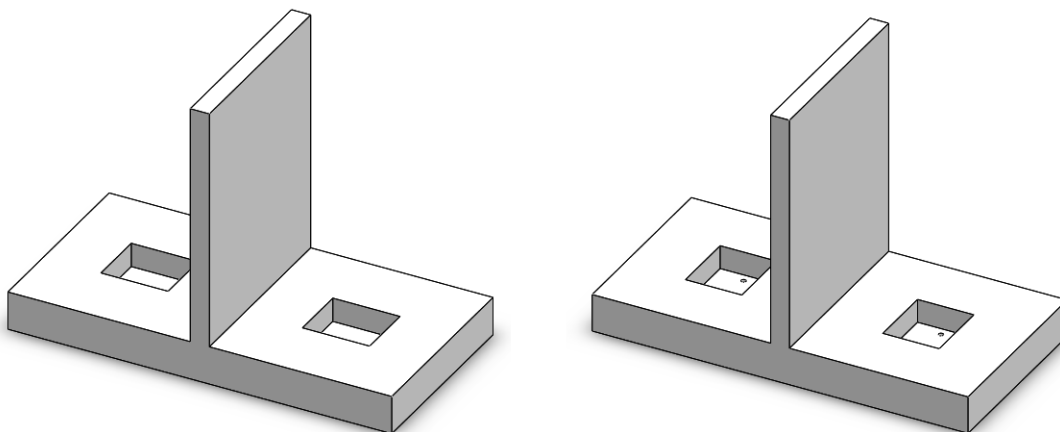


Figura 3.7: Componentes de Suporte para os LDR. Componente esquerdo referente ao seguimento em Azimute, e direito ao seguimento em Zênite.

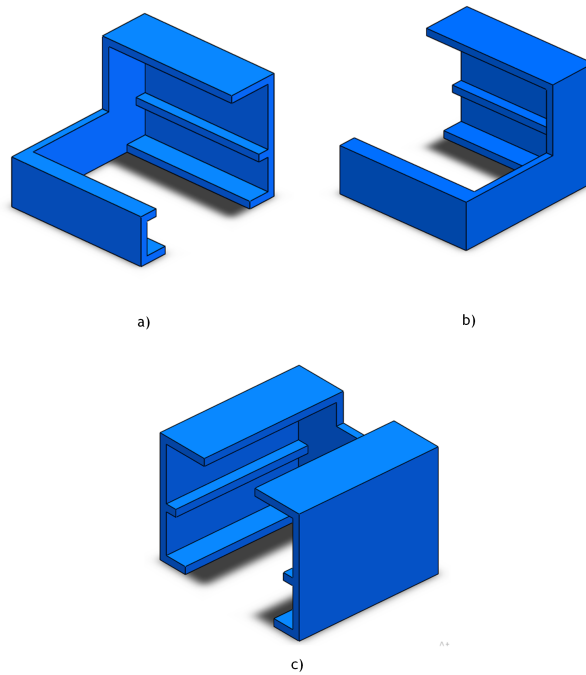


Figura 3.8: Componentes limitadores de campo de luz incidente para os componentes de suporte dos LDRs.

Seguidamente, após colocação destes componentes no protótipo, procedeu-se às ligações dos circuitos com os LDR ao microcontrolador, Figura 3.9, dos motores de passo aos drivers de potência e MSP430, Figura 3.10, e sua programação para controlar o seguidor sob um controlo ativo, abordada no capítulo seguinte.

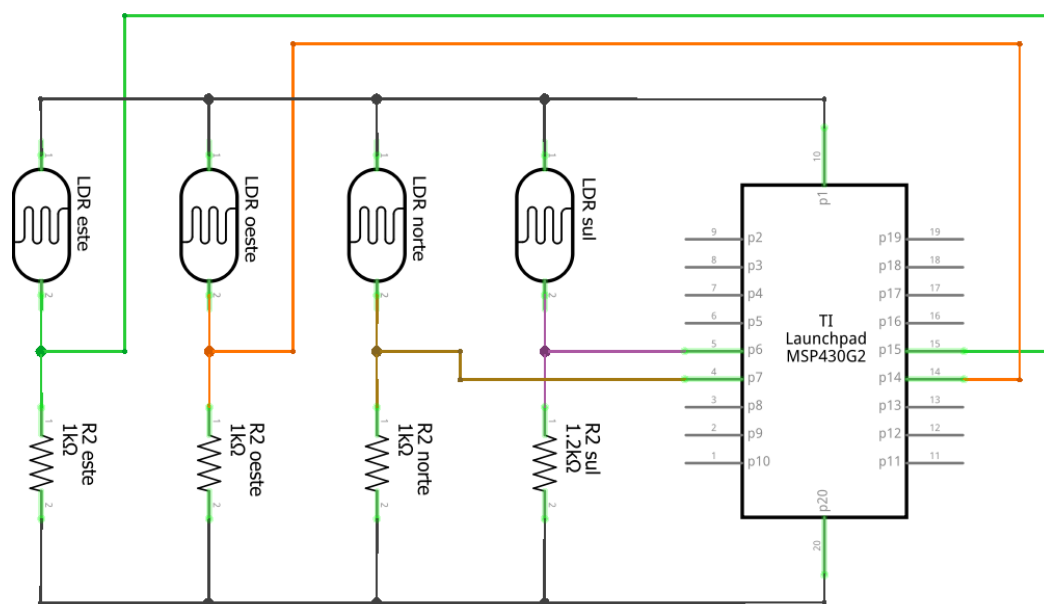


Figura 3.9: Esquema de ligações dos LDR ao MSP430.

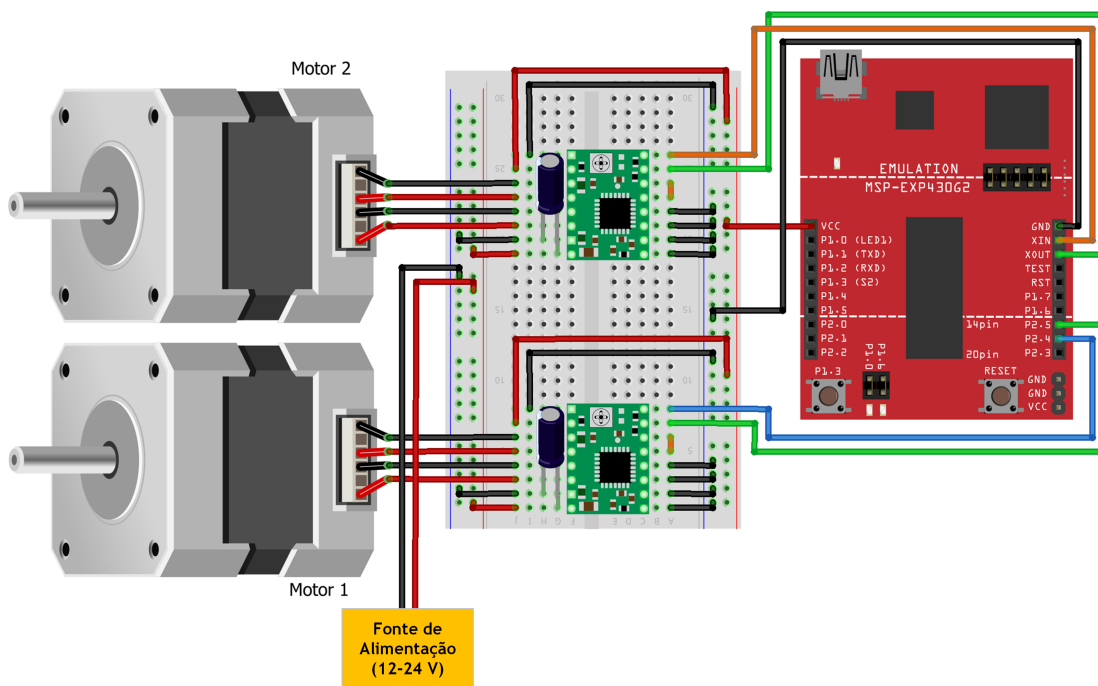


Figura 3.10: Esquema de ligações dos motores com os A4988 e, consecutivamente, ao MSP430.

Capítulo 4

Software Desenvolvido para o Controlo de Seguimento Solar

Como evidenciado no capítulo 2, existem várias formas que podem ser abordadas para se ter um seguimento solar preciso, desde controlos ativos a passivos. No trabalho abordado, dividiu-se o projeto em três fases:

- Primeira Fase - Seguimento solar através do uso de resistências dependentes de luz, ou seja, seguimento solar ativo por malha fechada.
- Segunda Fase - Seguimento solar através do uso de algoritmo de posição solar, correspondente a um seguimento solar ativo por malha aberta.
- Terceira Fase - Seguimento solar com o aglomerado de ambas fases anteriores, isto é, um seguimento solar misto.

4.1 Primeira Fase - Seguimento Solar por Malha Fechada

Este controlo seguiu o fluxograma apresentado na Figura 4.1. Neste, podemos ver três blocos distintos, os quais passam a ser descritos a seguir.

No primeiro bloco, “Inicialização e Configuração MSP430G2553”, é feita a inicialização dos portos requeridos e a configuração do ADC10. Em primeiro lugar, o relógio *Watchdog* é parado, uma vez que não será usado nesta aplicação. De seguida, faz-se um *reset* manual dos portos do MSP430, habilita-se o porto P1.0, configurando-o como 0 para estar desligado quando

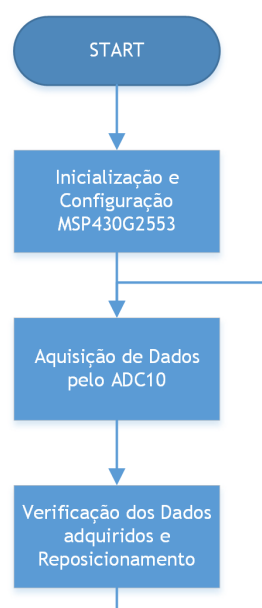


Figura 4.1: Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo por malha fechada (Fase 1).

não habilitado pelos botões limitadores. Neste caso, a função deste passa por habilitar o LED1 do *Launchpad* quando um botão de limitação de curso fosse pressionado. Habilitam-se os portos P2.4 a P2.7, para as entradas STEP e DIR dos drivers A4988. De salientar que os portos P2.6 e 2.7 funcionam como portos XIN e XOUT de ligação a um cristal externo que pode ser conectado ao *Launchpad*. Por isso, usou-se o comando P2SEL para os habilitar como portos I/O digitais. Define-se os portos P2.0 a P2.3 como entradas, ativam-se as resistências *pull-up*, pelo comando P2REN, as interrupções nestes portos, P2IE, e configura-se a interrupção de alto para baixo, pelo comando P2IES. Estes portos correspondem aos portos de ligação dos botões limitadores de campo. Quando pressionados, irão retornar o valor 0, indicando que o botão foi pressionado e, como tal, o microcontrolador terá que interromper o programa para correr a rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção do porto. Segue-se o excerto de código referente a estas configurações.

```
1 // Configuração de Relógios
2
3 WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD;
4
5 // Configuração de Portos
6
7 P1DIR = 0xFF;
8 P1OUT = 0x00;
9 P2DIR = 0xFF;
10 P2OUT = 0x00;
11
12 P1DIR |= BIT0;
13 P1OUT &= ~BIT0;
14 P2SEL &= ~(BIT6 + BIT7);
15 P2DIR |= BIT4 + BIT5 + BIT6 + BIT7;
16
17 P2DIR &= ~(BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3);
18 P2REN = BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;
19 P2IE |= BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;
20 P2IES = 0x00;
21 P2IES |= BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;
```

Finalizando a configuração dos portos, procede-se à configuração do ADC10. Através do registo ADC10CTL0, definiu-se a referência do ADC, SREF, o tempo e espera da amostragem, ADC0SHT, a amostragem e conversão como múltipla, MSC, a ativação do ADC, ADC10ON, e a habilitação de interrupções por parte do ADC, ADC10IE. Com o registo ADC10CTL1, configurou-se o modo de sequência de conversão do ADC como repetir a sequência de canais, CONSEQ, e configurou-se os canais de entrada como mais alto para uma sequência de conversões, INCH, a partir de A7, correspondente ao porto P1.7. Por fim, com o registo ADC10DTC1, definiu-se o número de conversões em quatro, e habilitou-se os portos P1.4 a P1.7 como analógicos para receberem o valor das quedas de tensão provenientes dos circuitos divisores de tensão dos LDRs. Após a configuração do ADC, habilitou-se as interrupções globais do CPU e procedeu-se à reposição do seguidor solar para a sua posição inicial. Esta passa pela utilização dos botões limitadores de campo. Dá-se ordem para os motores rodarem para o sentido do início de campo até tocarem nos botões respetivos. Quando tal acontece, o seguidor encontra-se reposicionado

no ponto de partida. Segue-se trecho de código referente à configuração do ADC10 e reposição do seguidor.

```
1 // Configuração do ADC
2
3 ADC10CTL1 = INCH_7 + CONSEQ_3;
4 ADC10CTL0 = SREF_0 + ADC10SHT_2 + MSC + ADC10ON + ADC10IE;
5 ADC10DTC1 = 0x04;
6 ADC10AE0 |= BIT4 + BIT5 + BIT6 + BIT7;
7
8 _BIS_SR(GIE);
9
10 //Colocação na posição de partida.
11
12 Mot2C(1050);
13 Mot1CC(370);
```

No próximo bloco, como o nome indica, procede-se à aquisição de dados por parte do ADC. Usou-se um ciclo para que o núcleo ADC esteja em constante amostragem e conversão dos portos P1.4 a P1.7. Todos os valores que irão ser convertidos pelo ADC são guardados em memória, e de forma a serem usados recorreu-se ao registo ADC10SA para transferir os dados para uma matriz, denominada *adc*. Em primeiro lugar, o bit ENC encontra-se a 0 e, para se dar ordem de início para começar a funcionar, o registo tem que ser configurado a 1. Em unísono, dá-se a ordem de início de amostragem e conversão. Após estar completa, o MSP430 entra em modo de baixo consumo. No entanto, como o registo DTC foi configurado ($ADC10DTC1 > 0$), o bit ADC10IFG é habilitado quando uma transferência de bloco é concluída, e o contador de transferência interno é reiniciado. Logo, como as interrupções globais foram ativas, gera-se uma solicitação de interrupção após a transferência de todos os dados guardados em memória para a matriz *adc*. A rotina de serviço das interrupções irá forçar o MSP a sair do modo de poupança de energia, retornando para o ciclo. Posteriormente, os dados guardados em matriz são diferenciados em Este, Oeste, Norte e Sul, e o MSP430 segue para o próximo bloco funcional. No retorno a este bloco, o bit ENC é definido a 0 para se ordenar de novo a transferência de dados para a matriz *adc*, recomeçando o ciclo de ativação do núcleo ADC. O excerto de código referente à aquisição de dados é o seguinte:

```
1 // Configuração do ADC
2
3 ADC10CTL0 &= ~ENC;
4 while (ADC10CTL1 & BUSY);
5 ADC10SA = (unsigned int)adc;
6 ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC;
7
8 Este = adc[0];
9 Oeste = adc[1];
10 Norte = adc[2];
11 Sul = adc[3];
12
13 __bis_SR_register(CPUOFF);
```

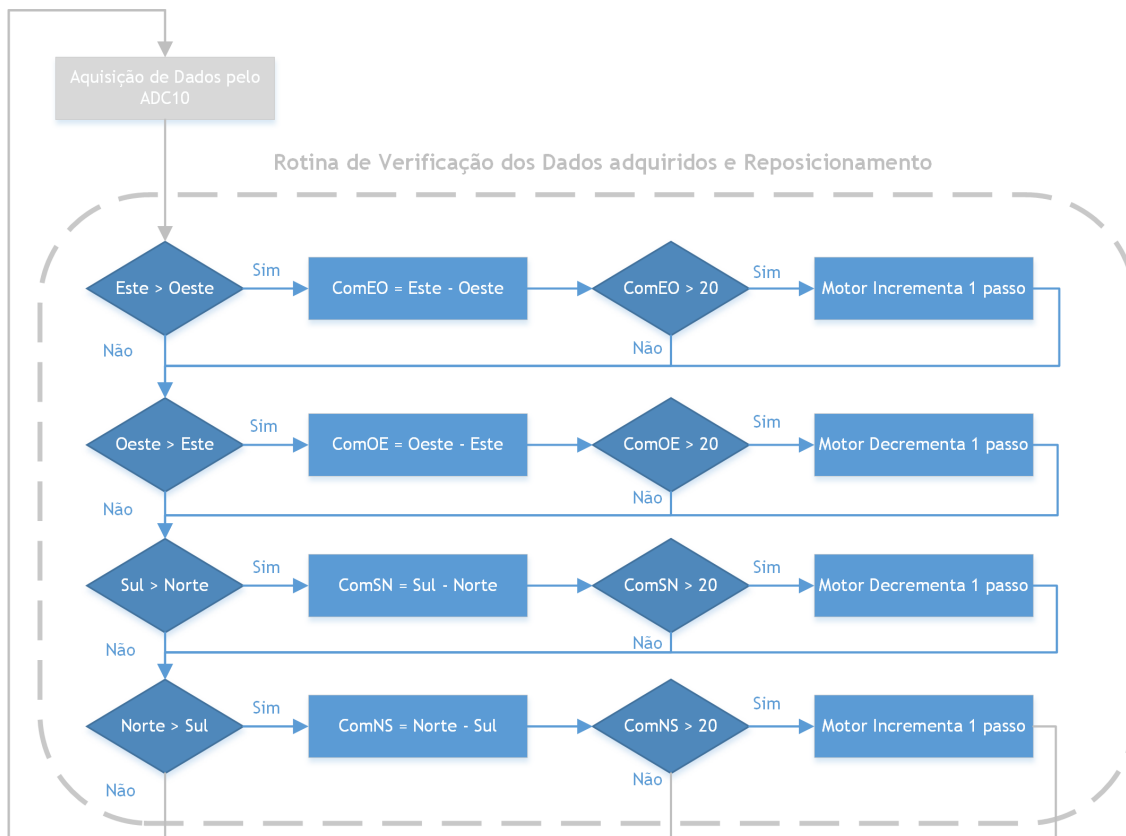


Figura 4.2: Fluxograma da rotina de verificação de dados adquiridos e reposicionamento.

No último bloco funcional, é realizado o tratamento dos valores este, oeste, norte e sul, como retratado no fluxograma da Figura 4.2. Este passa por quatro verificações de valor, duas para o eixo de azimute, este maior que oeste e oeste maior que este, e duas para o eixo de zénite, sul maior que norte e norte maior que sul. Exemplificando com o primeiro passo, se este for maior que oeste, é feita uma subtração entre os dois valores. O valor resultante é conferido se é superior a 20. Se for, o motor incrementa um passo, senão passa para a próxima verificação de valor. Para norte maior que sul, o procedimento é igual. Para oeste maior que este e para sul maior que norte, o procedimento é igual à exceção de que o motor decrementa um passo. Cada vez que as verificações de valor não se comprovam, o processo passa para a seguinte. Após conclusão da rotina de verificação de dados, o programa retorna ao bloco de aquisição de dados, recomeçando o ciclo de controlo ativo.

Por último, aquando uma pressão de um dos botões limitadores de campo, o microcontrolador para o curso normal de funcionamento e salta para a rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção dos portos P2.x, onde estão conectados os botões limitadores de campo. Nos portos P2.0 e P2.1 estão conectados os botões referentes ao limite de campo inferior e superior em azimute, respetivamente, e nos portos P2.2 e P2.3 os referentes aos limites inferior e superior em zénite, respetivamente (Figura 4.3). Consoante o botão pressionado, a rotina segue o fluxograma da Figura 4.4. Como o vetor de interrupção serve para qualquer um destes portos, tem que se fazer uma primeira verificação do porto que acionou a interrupção. Feita a averiguação e as devidas instruções de movimento do seguidor, é removida a *flag* de interrupção e o MSP retorna ao curso normal de funcionamento de onde foi interrompido.

Os resultados provenientes deste tipo de controlo serão abordados no capítulo seguinte.

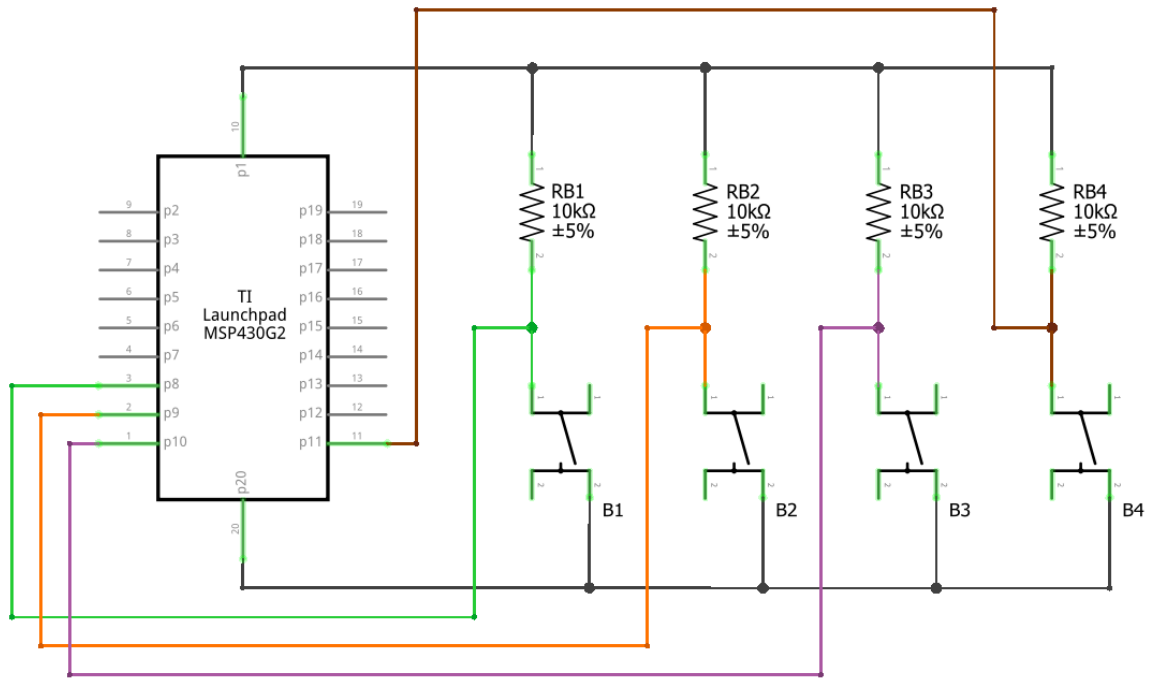


Figura 4.3: Esquema de ligações dos botões limitadores de campo ao microcontrolador.

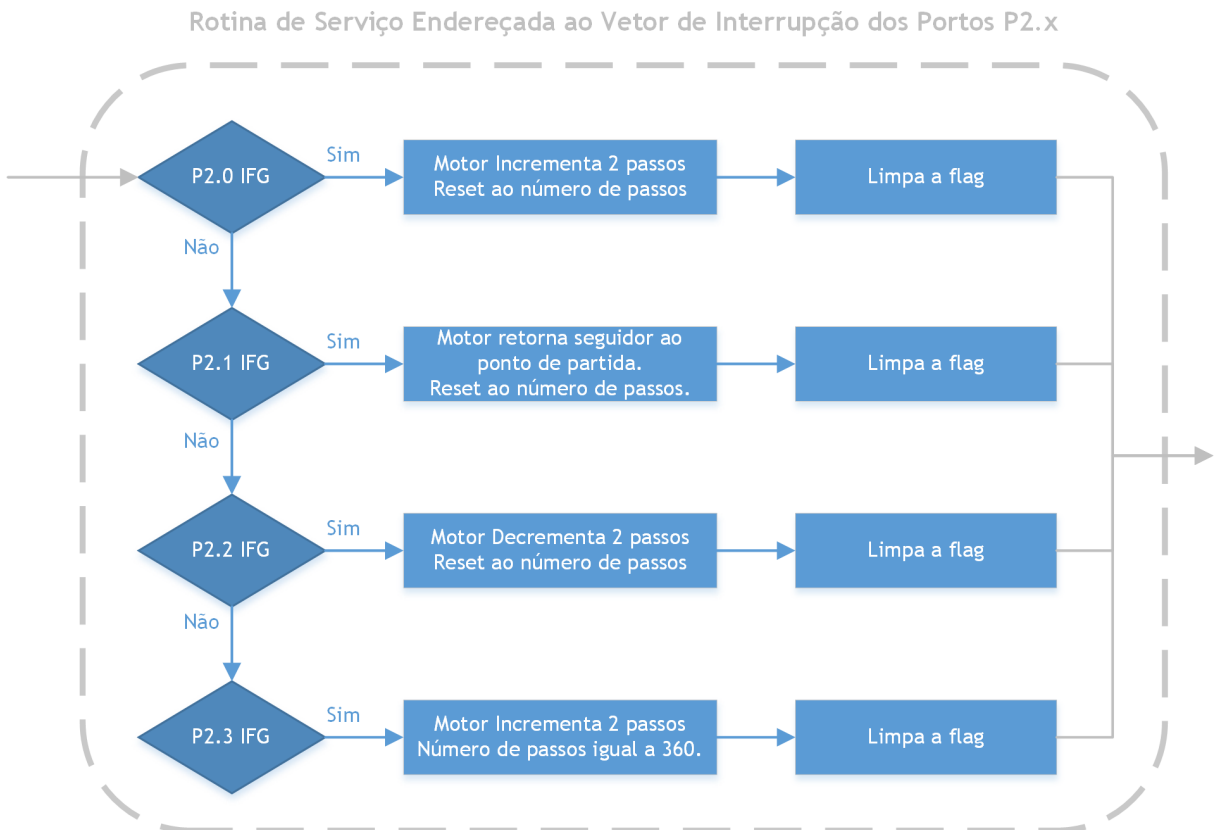


Figura 4.4: Fluxograma da rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção dos portos P2.x.

4.2 Segunda Fase - Seguimento Solar por Malha Aberta

O objetivo desta fase passa pela utilização de um algoritmo de cálculo de posicionamento solar de forma a apontar o seguidor para as coordenadas respetivas onde o Sol se enquadra.

O algoritmo implementado denomina-se SPA - *Solar Position Algorithm*, primeiramente mencionado no capítulo 2, secção 2.4.1.1. Este utiliza fórmulas matemáticas de génese astronómica, tendo como objetivo o seguimento da posição do Sol numa dada localização do globo. Uma vantagem deste algoritmo é o facto de não ser influenciado pelas condições climáticas, ou seja, a inexistência do Sol num dado dia não irá interferir no posicionamento solar do seguidor. Este algoritmo foi desenvolvido por Jean Meeus em 1991, tendo sido sujeito a atualizações posteriores, sendo que a última atualização foi editada por Ibrahim Reda e Afshin Andreas em 2008, no laboratório da NREL - *National Renewable Energy Laboratory* [40]. Antes de se mencionar o procedimento para o SPA, é importante realçar os vários tipos de escalas de tempo usadas na astronomia:

- Tempo Universal (UT) - também denominado como tempo de Greenwich, é uma escala de tempo baseada no movimento de rotação da Terra, contado a partir da meia-noite (0 horas). Esta escala é o parâmetro usado para calcular a posição do Sol neste algoritmo;
- Tempo Atómico Internacional (TAI) - escala de tempo que utiliza a informação combinada de vários relógios atómicos de alta precisão;
- Tempo Universal Coordenado (UTC) - escala de tempo padrão pela qual o mundo regula os relógios e o tempo. É mantido com uma margem de erro máxima de 0,9 segundos de UT, fazendo sincronismos periódicos de 1 segundo;
- Tempo Terrestre (TT) - escala de tempo de efemérides para observações da superfície da Terra.

As relações matemáticas existentes entre escalas de tempo são as seguintes:

$$TT = TAI + 32,184 \quad (4.1)$$

$$UT = TT - \Delta T \quad (4.2)$$

onde ΔT corresponde à diferença entre o tempo de rotação da Terra com o tempo terrestre.

$$UT = UTC + \Delta UT \quad (4.3)$$

em que ΔUT é a fração de segundo adicionada ou removida ao UTC para ajustar a rotação irregular da Terra.

Para se implementar o algoritmo SPA até se obterem como objetivo final as coordenadas do Sol em azimute e zénite, é necessário seguir o seguinte procedimento:

1. Cálculo do dia e século Juliano.

O dia Juliano (JD) começa a 1 de Janeiro do ano 4712 a.C. às 12:00:00 UT e é calculado usando UT. De notar que existe um desfasamento de 10 dias entre o calendário Juliano e o Gregoriano, onde o calendário Juliano termina a 4 de Outubro de 1582 (JD = 2299160) e

10 dias depois começa o calendário Gregoriano, a 15 de Outubro de 1582. A fórmula para cálculo de JD é a seguinte:

$$JD = INT(365,25 \times (Y + 4716)) + INT(30,6001 \times (M + 1)) + D + B - 1524,5 \quad (4.4)$$

Em que:

- INT - parte inteira do termo calculado,
- Y - ano,
- M - mês do ano,
- D - dia do mês em formato decimal,
- B - igual a 0 na presença do calendário Juliano ($JD < 2299160$), e igual a $2 - A + INT(A/4)$ na presença do calendário Gregoriano ($JD > 2299160$), onde $A = INT(Y/100)$.

No caso de se pretender usar o tempo local ao passo de UT, basta mudar o fuso horário para uma fração diária (dividindo por 24) e subtrai-se o valor de JD, calculado anteriormente. Para o cálculo do século juliano (JC):

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (4.5)$$

Em que o valor 2451545 corresponde ao dia juliano na data 1 de Janeiro de 2000, época padrão utilizada, e 36525 à multiplicação dos dias médios anuais com a constante correspondente a um século.

2. Cálculo do dia, século e milénio juliano efemérides.

O dia juliano efemérides é calculado pela expressão:

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (4.6)$$

onde 86400 corresponde a 24 horas em segundos.

O século juliano efemérides pela expressão matemática seguinte:

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36252} \quad (4.7)$$

sendo o significado das constantes igual às utilizadas no cálculo de JC. Por fim, para o cálculo do milénio juliano efemérides:

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (4.8)$$

3. Cálculo da longitude, da latitude e do vetor raio heliocêntrico da terra.

O termo heliocêntrico significa que a posição da Terra é calculada em relação ao centro do Sol. Para os próximos cálculos, são necessários a utilização dos termos periódicos do planeta Terra, que se encontram tabelados, e que estão relacionados com a nutação da Terra. Isto é, uma oscilação periódica do eixo de rotação da Terra causado pela interação da força gravitacional da Lua e do Sol sobre a Terra. Primeiramente, são calculados para

cada linha da tabela dos termos periódicos do planeta Terra (ver Apêndice K) os termos $L0_i$ (em radianos):

$$L0_i = A_i \times \cos(B_i + C_i \times JME) \quad (4.9)$$

Em que:

- A_i - valores da i -ésima linha da coluna A da tabela dos termos periódicos do planeta Terra,
- B_i - valores da i -ésima linha da coluna B da tabela dos termos periódicos do planeta Terra,
- C_i - valores da i -ésima linha da coluna C da tabela dos termos periódicos do planeta Terra.

Após todos os cálculos efetuados, é então calculado o somatório de todos os valores de $L0$ correspondentes a cada linha:

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i \quad (4.10)$$

onde n é o número de linhas para o termo $L0$ na Tabela do Apêndice K. Este processo é repetido para os termos $L1$ a $L5$, usando as expressões (4.9) e (4.10), mudando $L0$ para $L1$ a $L5$, e usando os valores correspondentes das colunas A, B e C da Tabela mencionada. Todos estes cálculos são necessários para o cálculo da longitude heliocêntrica da Terra, L , calculada através da seguinte expressão:

$$L = \frac{L0 + L1 \times JME + L2 \times JME^2 + L3 \times JME^3 + L4 \times JME^4 + L5 \times JME^5}{10^8} \quad (4.11)$$

O resultado encontra-se em radianos. No entanto, se for pretendido que o resultado se apresente em graus, terá que se aplicar a seguinte conversão:

$$L_{graus} = \frac{L_{radianos} \times 180}{\pi} \quad (4.12)$$

Por sua vez, o resultado terá que se encontrar entre 0 e 360°. De forma a limitar o resultado a este intervalo, terá que ser criada uma sub-rotina de verificação: se L for menor que 0°, adiciona-se 360°; se L for maior que 360°, subtrai-se 360°.

De seguida, para calcular a latitude heliocêntrica da Terra, B , deve-se tomar o mesmo procedimento mencionado acima, ou seja, usar a expressão (4.9) para calcular os termos de $B0$ e de $B1$, e a expressão (4.10) para fazer o somatório dos termos. De notar que não existem os termos $B2$ a $B5$, o que, conseqüentemente, se deverá substituir estes valores por zero. A expressão (4.11) fica então da seguinte forma:

$$B = \frac{B0 + B1 \times JME}{10^8} \quad (4.13)$$

Este resultado encontra-se em radianos. Se pretendido em graus, deverá proceder-se à sua conversão pela expressão (4.12).

O mesmo acontece para o cálculo do vetor raio heliocêntrico da Terra, R . Usando as expressões (4.9) e (4.10), calculam-se os termos de $R0$ a $R4$ (não existindo o termo $R5$),

fazendo posteriormente o somatório dos termos. A expressão (4.11) apresenta-se da seguinte forma:

$$R = \frac{R0 + R1 \times JME + R2 \times JME^2 + R3 \times JME^3 + R4 \times JME^4}{10^8} \quad (4.14)$$

O resultado desta equação encontra-se em unidades astronómicas. Logo a conversão para graus não se enquadra.

4. Cálculo da longitude e da latitude geocêntrica.

O termo geocêntrico significa que a posição do Sol é calculada em relação ao centro da Terra. Para o cálculo da longitude geocêntrica é utilizada a seguinte expressão:

$$\Theta = L + 180 \quad (4.15)$$

onde L corresponde à longitude heliocêntrica da Terra. Θ tem que ser limitado entre 0° e 360° , usando o exemplo mencionado após (4.12).

Para o cálculo da latitude geocêntrica, usa-se a seguinte expressão:

$$\beta = -B \quad (4.16)$$

em que β também tem que ser limitado entre 0 e 360° .

5. Cálculo da nutação na longitude e obliquidade.

Para o cálculo da nutação na longitude e obliquidade, é necessário calcular em primeiro lugar 5 fatores, denominados de $X0$ a $X4$, em graus, que correspondem:

- $X0$ - média do alongamento da Lua a partir do Sol.

$$X0 = 297,85036 + 445267,111480 \times JCE - 0,0019142 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (4.17)$$

- $X1$ - irregularidade média do Sol.

$$X1 = 357,52772 + 35999,050340 \times JCE - 0,0001603 \times JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (4.18)$$

- $X2$ - irregularidade média da Lua.

$$X2 = 134,96298 + 477198,867398 \times JCE + 0,0086972 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{56250} \quad (4.19)$$

- $X3$ - argumento da latitude da Lua.

$$X3 = 93,27191 + 483202,017538 \times JCE - 0,0036825 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (4.20)$$

- $X4$ - longitude do nó ascendente da órbita média da Lua na eclíptica, medida desde o equinócio médio da data.

$$X4 = 125,04452 - 1934,136261 \times JCE + 0,0020708 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000} \quad (4.21)$$

De seguida, calculam-se os termos de $\Delta\psi_i$ e $\Delta\varepsilon_i$, em 0.0001", usando-se as seguintes expressões matemáticas:

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i \times JCE) \times \sin \left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j} \right) \quad (4.22)$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i + d_i \times JCE) \times \cos \left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j} \right) \quad (4.23)$$

onde:

- a_i, b_i, c_i, d_i - valores listados nas i -ésimas linhas e colunas a, b, c e d da tabela dos termos periódicos para a natação em longitude e obliquidade (Apêndice L),
- X_j - j -ésimos X calculados pelas equações (4.17), (4.18), (4.19), (4.20) e (4.21),
- $Y_{i,j}$ - valor listado nas i -ésimas linhas e j -ésimas colunas da tabela dos termos periódicos para a natação em longitude e obliquidade (Apêndice L).

Com todas estas variáveis calculadas, podemos então prosseguir para o cálculo da natação em longitude, em graus:

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000} \quad (4.24)$$

em que n corresponde ao número de linhas total da tabela do Apêndice L, igual a 63.

E para o cálculo da natação em obliquidade, em graus:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (4.25)$$

6. Cálculo da verdadeira obliquidade da eclíptica.

Primeiro calcula-se a média da obliquidade da eclíptica, em segundo de arco, pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_0 = 84381,448 - 4680,93U - 1,55U^2 + 1999,25U^3 - 51,38U^4 - 249,67U^5 - 39,05U^6 + 7,12U^7 + 27,87U^8 + 5,79U^9 + 2,45U^{10} \quad (4.26)$$

onde:

$$U = \frac{JME}{10} \quad (4.27)$$

Obtendo-se o valor da média da obliquidade, podemos então calcular a verdadeira obliquidade da eclíptica, em graus:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (4.28)$$

7. Cálculo da correção da aberração.

$$\Delta\tau = -\frac{20,4898}{3600 \times R} + \Delta\varepsilon \quad (4.29)$$

Em que R corresponde ao vetor raio heliocêntrico da Terra, calculado em (4.14).

8. Cálculo da longitude aparente do Sol.

$$\lambda = \Theta + \Delta\psi + \Delta\tau \quad (4.30)$$

Onde:

- Θ - longitude geocêntrica calculada em (4.15),
- $\Delta\psi$ - nutação em longitude calculada em (4.24),
- $\Delta\tau$ - correção da aberração calculada em (4.29).

9. Cálculo do tempo sideral aparente de Greenwich.

Primeiro calcula-se o tempo sideral médio de Greenwich, em graus, pela seguinte expressão:

$$v_0 = 280,46061837 + 360,98564736629 \times (JD - 2451545) + 0,000387933 \times JC^2 - \frac{JC^3}{38710000} \quad (4.31)$$

O resultado desta expressão tem que se encontrar entre o intervalo de 0 a 360°. Como tal, terá que ser limitado usando o exemplo mencionado após (4.12). Após isto, procede-se ao cálculo do Tempo Sideral Aparente de Greenwich, em graus:

$$v = v_0 + \Delta\psi \times \cos(\varepsilon) \quad (4.32)$$

10. Cálculo da ascensão geocêntrica do Sol.

$$\alpha = \arctan 2 \left(\frac{\sin \lambda \times \cos \varepsilon - \tan \beta \times \sin \varepsilon}{\cos \lambda} \right) \quad (4.33)$$

Onde $\arctan 2$ é a função \arctan aplicada ao numerador e ao denominador de forma a manter α entre o intervalo $-\pi$ e π . De seguida, usando a expressão (4.12), converte-se α em graus, e limita-se para o intervalo de 0° a 360° usando o exemplo mencionado após (4.12).

11. Cálculo da inclinação geocêntrica do Sol.

$$\delta = \arcsin(\sin \beta \times \cos \varepsilon + \cos \beta \times \sin \varepsilon \times \sin \lambda) \quad (4.34)$$

Onde δ é positivo ou negativo se o Sol se encontrar a norte ou a sul do equador, respetivamente. Uma vez que o resultado se encontra em radianos, usando (4.12) converte-se o valor para graus.

12. Cálculo do ângulo horário local.

$$H = v + \sigma - \alpha \quad (4.35)$$

Em que σ corresponde à longitude geográfica do observador, positiva ou negativa para este ou oeste de Greenwich, respetivamente. O resultado proveniente desta expressão tem que ser limitado entre o intervalo de 0° a 360° , usando o exemplo mencionado após (4.12).

13. Cálculo da ascensão topocêntrica do Sol.

O termo topocêntrico significa que a posição do Sol é calculada através da posição local do observador na superfície da Terra. Para calcular a ascensão topocêntrica do Sol, tem que se obter, em primeiro lugar, a paralaxe horizontal equatorial do Sol:

$$\xi = \frac{8,794}{3600 \times R} \quad (4.36)$$

de seguida, obter os termos u, x, y

$$u = \arctan 0,99664719 \times \tan \varphi \quad (4.37)$$

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} \times \cos \phi \quad (4.38)$$

$$y = 0,99664719 \times \sin u + \frac{E}{6378140} \times \sin \phi \quad (4.39)$$

onde:

- φ - corresponde à latitude geográfica do observador, positiva ou negativa, a norte ou a sul do equador, respetivamente. De mencionar que o valor $0,99664719$ é igual a $(1 - f)$ em que f corresponde ao achatamento da Terra;
- E - corresponde à elevação do observador em relação ao nível médio do mar, em metros.

Prossegue-se ao cálculo da paralaxe da ascensão do Sol:

$$\Delta\alpha = \arctan 2 \left(\frac{-x \times \sin \xi \sin H}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (4.40)$$

Como o valor se encontra em radianos, tem que ser convertido através da equação (4.12). Por fim, calcula-se a ascensão topocêntrica do Sol, em graus:

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (4.41)$$

14. Cálculo da inclinação topocêntrica do Sol.

$$\delta' = \arctan 2 \left(\frac{(\sin \delta - y \times \sin \xi) \times \cos \Delta\alpha}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (4.42)$$

15. Cálculo do ângulo horário local topocêntrico

$$H' = H - \Delta\alpha \quad (4.43)$$

16. Cálculo do ângulo topocêntrico de zénite.

Para se obter o ângulo topocêntrico de zênite é necessário fazer, em primeiro lugar, o cálculo do ângulo topocêntrico de elevação sem refração atmosférica, cujo resultado é expresso em radianos e, como tal, tem que ser convertido para graus através da expressão (4.12).

$$e_o = \arcsin(\sin \phi \times \sin \delta' + \cos \phi \times \cos \delta' \times H') \quad (4.44)$$

Posteriormente é feito o cálculo da refração atmosférica, em graus.

$$e_o = \frac{P}{1010} \times \frac{283}{273 + T} \times \frac{1,02}{60 \times \tan \left(e_o + \frac{10,3}{e_o + 5,11} \right)} \quad (4.45)$$

Em que:

- P - pressão média local anual, em milibar (mbar),
- T - temperatura média local anual, em °C.

Podemos então calcular o ângulo topocêntrico de elevação e de zênite, ambos em graus:

$$e = e_o + \Delta e \quad (4.46)$$

$$\theta = 90 - e \quad (4.47)$$

17. Cálculo do ângulo topocêntrico de azimute. Por fim, para calcular o segundo ângulo necessário para o seguimento solar, procede-se ao cálculo do ângulo topocêntrico astronómico de azimute:

$$\Gamma = \arctan 2 \left(\frac{\sin H'}{\cos H' \times \sin \phi - \tan \delta' \times \cos \phi} \right) \quad (4.48)$$

O valor resultante desta expressão tem que ser limitado ao intervalo de 0° a 360° pelo exemplo mencionado após (4.12).

Por fim, através da equação seguinte obtém-se o ângulo topocêntrico de azimute, em graus:

$$\Phi = \Gamma + 180 \quad (4.49)$$

O valor resultante tem que ser limitado ao intervalo de 0° e 360° pelo exemplo mencionado após (4.12).

Com este procedimento do algoritmo SPA em consideração, começou-se pela sua implementação no software de cálculo e simulação MATLAB, da empresa Mathworks. Em primeiro lugar, fez-se um *script* com todo o procedimento do algoritmo SPA, de forma a fornecer os dados necessários para o seguimento solar. Posteriormente, o objetivo passou por se criar uma interface gráfica onde o usuário introduziria os valores de entrada necessários para o algoritmo SPA correr, sendo o ano, o mês, o dia, a hora, o minuto, o segundo, o fuso horário, a latitude, a longitude, a altitude, a pressão atmosférica média anual do local, a temperatura média anual do local e o ΔT os *inputs* necessários. O valor de ΔT é calculado ou predito pelo IERS, de onde

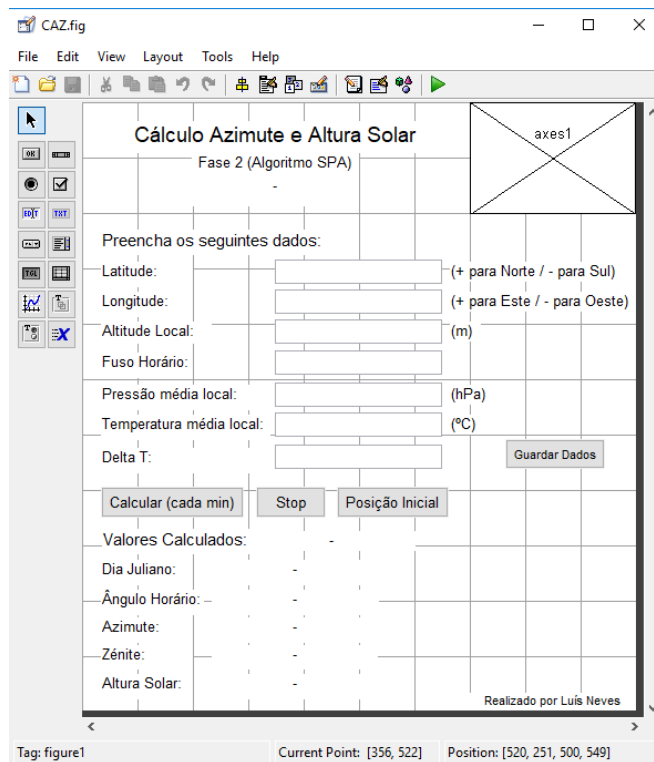


Figura 4.5: Toolbox GUIDE do MATLAB para criação de interfaces gráficas.

pode ser acedido e retirado em [57], e a data e a hora são automaticamente captados pelo MATLAB no instante em que se corre o algoritmo.

O GUI apresenta quatro botões: “Calcular (a cada min)”, “STOP”, “Posição Inicial” e “Guardar Dados”. O primeiro botão corre o algoritmo SPA, calcula todos as variáveis mencionadas na descrição do procedimento e apresenta os valores do dia juliano, ângulo horário, azimute, zénite e altura solar na interface. Posteriormente, envia os dados de azimute e zénite pela porta de comunicação (COM) endereçada ao microprocessador. Todo este processo está temporizado para ocorrer de minuto a minuto. O botão “STOP” serve para parar o temporizador inicializado no botão “Calcular (a cada min)”, de forma a parar o processo quando desejado. O botão “Posição Inicial” tem como função enviar ao microcontrolador os ângulos de zénite e azimute correspondentes à posição de partida do seguidor solar. E por fim, o último botão tem como função guardar os dados introduzidos para a próxima sessão de início do GUI, para não ser sempre necessário a introdução dos mesmos dados a cada vez que se faz uma nova sessão do GUI. Para isto, utilizou-se a toolbox GUIDE do MATLAB para criar o visual do GUI, como visto na Figura 4.5. Após a sua criação, partiu-se para a sua programação, estando dividida em quatro partes:

1. Programação da inicialização do GUI.
2. Programação de parâmetros a executar previamente ao seu surgimento, ou seja, a função de tornar o GUI visível.
3. Execução dos objetos de inserção de dados e botões presentes no GUI.
4. Programação da função do temporizador.

Na primeira, é feita a criação de uma estrutura, onde são definidos todos os parâmetros

e funções necessárias para o GUI correr, como a sua dimensão, a função de tornar o GUI visível e a função que retorna resultados. Segue-se o excerto de código referente a esta fase.

```
1 gui_Singleton = 1;
2 gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
3                   'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
4                   'gui_OpeningFcn', @CAZ_OpeningFcn, ...
5                   'gui_OutputFcn', @CAZ_OutputFcn, ...
6                   'gui_LayoutFcn', [] , ...
7                   'gui_Callback',  []);
8
9 if nargin && ischar(varargin{1})
10     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
11 end
12
13 if nargin
14     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
15 else
16     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
17 end
```

Na segunda parte, é feita a programação da função *CAZ_OpeningFcn*. Nesta é definido: a linha de comando de saída do GUI; criado um gráfico para se introduzir a imagem referente ao logo da Universidade da Beira Interior e respetivo comando para a tornar visível; a definição de uma variável que guarda a hora e data no preciso instante que é lançado o GUI, com o objetivo de surgir no cabeçalho da interface; a definição de um temporizador, cujo objetivo serve para enviar dados para o microcontrolador dentro de um intervalo de tempo desejado, neste caso de um minuto; a estrutura de atualização de todos os objetos presentes na interface gráfica; carregamento dos dados introduzidos na sessão anterior do GUI. De notar que a função apontada ao temporizador, nomeadamente a função *updateCallback*, é onde se encontra o algoritmo SPA e respetiva programação para enviar os dados para o microcontrolador, como se menciona mais à frente. Segue-se o excerto de código respetivo desta segunda parte.

```
1 function CAZ_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
2
3 handles.output = hObject;
4
5 axes(handles.axes1)
6 imshow('Logo.jpg')
7
8 ti = datestr(now);
9 set(handles.clocki, 'String', ti)
10
11 handles.tmr = timer('Name', 'TMRCalc', ...
12                   'Period', 30, ...
13                   'StartDelay', 0, ...
14                   'TasksToExecute', inf, ...
15                   'ExecutionMode', 'fixedSpacing', ...
16                   'TimerFcn', {@updateCallback, handles.figure1});
```

```

17
18 guidata(hObject, handles);
19 LoadData(handles);

```

A função referente a *LoadData*, com o objetivo de carregar os dados introduzidos da sessão anterior, foi programada da seguinte forma: inicialmente, verifica se existe o ficheiro onde foram guardados os *inputs*. Se existir, abre o ficheiro e carrega os valores diretamente no GUI, antes de surgir no ambiente de trabalho. Segue-se excerto do respetivo código.

```

1 function LoadData(handles)
2
3 fileName = 'state.mat';
4
5 if exist(fileName)
6     load(fileName)
7     set(handles.Latitude, 'String', state.Latitude);
8     set(handles.Longitude, 'String', state.Longitude);
9     set(handles.Fuso, 'String', state.Fuso);
10    set(handles.Altitude, 'String', state.Altitude);
11    set(handles.Pmed, 'String', state.Pmed);
12    set(handles.Tmed, 'String', state.Tmed);
13    set(handles.deltaT, 'String', state.deltaT);
14 end

```

Em terceiro lugar, para executar todos os objetos de inserção de dados e botões presentes no GUI, estes possuem duas funções associadas, a função que as cria (*CreateFcn*) e a função que retorna o seu valor (*Callback*). No caso em questão, existem sete objetos de inserção de dados - Latitude, Longitude, Altitude, Fuso, Pressão Média, Temperatura Média e Delta T - e quatro botões - Guardar Dados, Calcular, STOP e Posição Inicial. Para guardar todos os dados introduzidos no GUI para o cálculo dos ângulos de azimute e zénite, basta guardá-los numa estrutura que, por sua vez, é guardada num ficheiro, de onde estes irão ser carregados na próxima sessão de início da interface. É importante referir que nas funções de retorno dos botões Calcular e STOP é feito o começo e a paragem do controlo do temporizador. É através destes comandos que se dá a ordem de correr e parar o algoritmo SPA. A programação respetiva destes objetos pode ser observado no excerto de código seguinte.

```

1 function Latitude_Callback(hObject, eventdata, handles)
2
3 function Latitude_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
4     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
5         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
6         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
7     end
8
9 function Longitude_Callback(hObject, eventdata, handles)
10
11 function Longitude_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
12     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
13         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

14         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
15     end
16
17 function Altitude_Callback(hObject, eventdata, handles)
18
19 function Altitude_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
20     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
21         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
22         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
23     end
24
25 function Fuso_Callback(hObject, eventdata, handles)
26
27 function Fuso_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
28
29     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
30         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
31         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
32     end
33
34
35 function Pmed_Callback(hObject, eventdata, handles)
36
37 function Pmed_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
38     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
39         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
40         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
41     end
42
43
44 function Tmed_Callback(hObject, eventdata, handles)
45
46 function Tmed_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
47     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
48         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
49         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
50     end
51
52 function deltaT_Callback(hObject, eventdata, handles)
53
54 function deltaT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
55     if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), ...
56         get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
57         set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
58     end
59
60 function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

61     start(handles.tmr);
62
63 function STOP_Callback(hObject, eventdata, handles)
64     stop(handles.tmr);
65
66 function SaveData_Callback(hObject, eventdata, handles)
67
68     state.Latitude = (get(handles.Latitude, 'String'));
69     state.Longitude = (get(handles.Longitude, 'String'));
70     state.Fuso = (get(handles.Fuso, 'String'));
71     state.Altitude = (get(handles.Altitude, 'String'));
72     state.Pmed = (get(handles.Pmed, 'String'));
73     state.Tmed = (get(handles.Tmed, 'String'));
74     state.deltaT = (get(handles.deltaT, 'String'));
75     save ('state.mat', 'state')

```

Por último, a programação da função *updateCallback*, fulcral para o desempenho proposto para a interface gráfica. Primeiramente, é apontada uma variável *handles* para obter os dados da estrutura de atualização de todos os objetos presentes na interface gráfica. Se esta estrutura não for um conjunto vazio, então começa o processo de extração dos dados necessários para correr o algoritmo SPA. Em primeiro lugar é extraída a hora atual, pelo comando *datestr(now,13)*, no formato 'HH:MM:SS', para mostrar numa caixa de texto a hora a que se iniciou o processo. Depois extrai-se a data e a hora para uma variável *C*, pelo comando *clock*, onde o ano, o mês, o dia, a hora, o minuto e o segundo são guardados numa matriz. É feita a separação destes dados para as respetivas variáveis com o mesmo nome, extraídos os dados da latitude, da longitude, do fuso horário, da altitude do local, da pressão atmosférica média anual do local, da temperatura média anual do local, e do ΔT inseridos pelo usuário. Com todos estes valores, é então corrido o algoritmo SPA de onde surge os valores dos ângulos de azimute e zénite, necessários para o seguimento solar. De todos os valores calculados, foram escolhidos para serem apresentados no GUI os resultados do dia juliano, do ângulo horário, de azimute, de zénite, e a altura solar. Segue-se excerto de código referente a esta descrição.

```

1 function updateCallback(hObject, event, hFigure)
2
3 handles = guidata(hFigure);
4 if ~isempty(handles)
5     clockf = datestr(now,13);
6     set(handles.clockf, 'String', clockf)
7
8     C = clock;
9     ano = C(1);
10    mes = C(2);
11    dia = C(3);
12    hora = C(4);
13    minuto = floor(C(5));
14    segundo = floor(C(6));
15
16    latitude = str2double(get(handles.Latitude, 'String'));

```

```

17 longitude = str2double(get(handles.Longitude, 'String'));
18 fuso = str2double(get(handles.Fuso, 'String'));
19 altitude = str2double(get(handles.Altitude, 'String'));
20 Pmed = str2double(get(handles.Pmed, 'String'));
21 Tmed = str2double(get(handles.Tmed, 'String'));
22 deltaT = str2double(get(handles.deltaT, 'String'));
23
24 [JD, Ldeg, Bdeg, R, H, deltapsi, deltaepsilon, epsilon, thetaz, phi, ...
25                               modthetaz, modphi, e, mode] = ...
26                               SPALN(ano, mes, dia, hora, minuto, ...
27                               segundo, fuso, latitude, longitude, ...
28                               altitude, Pmed, Tmed, deltaT);
29
30 set(handles.JDval, 'String', num2str(JD, 10));
31 set(handles.Hval, 'String', num2str(H, 4));
32 set(handles.AzimuthVal, 'String', num2str(phi, 5));
33 set(handles.ZenVal, 'String', num2str(thetaz, 4));
34 set(handles.AlturaVal, 'String', num2str(e, 4));

```

Por fim, cabe agora à interface gráfica fazer o envio dos dados para o microprocessador. Primeiramente, o MATLAB, pelo comando *instrfind* irá verificar se se encontra um dispositivo ligado a uma determinada COM. No caso em questão, o MSP430 encontrava-se ligado à COM4 do computador portátil usado. Após isto, faz-se uma verificação se a porta se encontrava ocupada ou não. Se não, é definida a COM4 com uma taxa de transferência de 9600 bps. Senão, o que indica que se encontra aberta a transmissão e já definida, é então encerrada. Após feita a verificação de estado da COM, passa então ao envio dos dados. Abre a porta COM, envia em primeiro plano o valor do ângulo de azimute e, após uma pausa de 50 ms, o valor do ângulo de zénite. Depois de cada transmissão de dados, esta é encerrada. Segue-se excerto de código referente a transmissão dos dados pela COM4 para o microprocessador.

```

1 s = instrfind('Type', 'serial', 'Port', 'COM4', 'Tag', '');
2
3 if isempty(s)
4     s = serial('COM4', 'BaudRate', 9600);
5 else
6     fclose(s);
7     s = s(1);
8 end
9
10 fopen(s);
11 fprintf(s, '%5.0f\r', modphi);
12 disp('Value sent to Serial Port (modphi):');
13 disp(modphi);
14 fclose(s);
15
16 pause(0.05);
17
18 fopen(s);

```

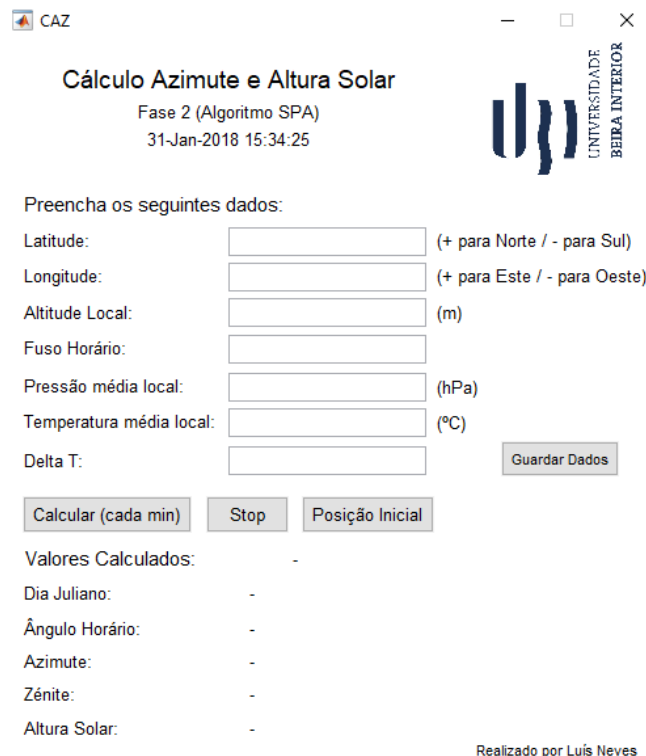


Figura 4.6: Interface gráfica para cálculo dos valores de azimute e zénite e envio para microcontrolador.

```

19  fprintf(s, '%5.0f\r', mode);
20  disp('Value sent to Serial Port (thetaz):');
21  disp(mode);
22  fclose(s);
23
24  end

```

Com isto, o temporizador encontra-se a contar em plano de fundo o tempo de um minuto, até ao qual irá esperar para repetir, novamente, todo este processo de cálculo do algoritmo SPA e sucessiva transmissão dos ângulos para o microprocessador. O resultado final desta interface gráfica pode ser observado na Figura 4.6.

Este GUI é parte determinante para que seja feito um seguimento solar por controlo de malha aberta. Não obstante, fica toda a programação do microcontrolador para receber e interpretar a informação recebida. Assim sendo, o controlo seguiu o fluxograma apresentado na Figura 4.7, onde se pode observar um encadeamento mais complexo que o da Fase 1. No primeiro bloco, “Inicialização e Configuração MSP430G2553”, faz-se a inicialização dos portos requeridos e da UART. Em primeiro lugar, o relógio *Watchdog* é parado, uma vez que não será usado. Como é pretendido que a UART do microcontrolador seja configurada para transmitir a 9600 bps, com 8 databits, sem paridade e com 1 stop bit, é necessário começar por definir o oscilador interno controlado digitalmente (DCO), para criar um *clock* de 1 MHz, e usar o SMCLK como o relógio para a UART. Este último servirá para gerar o BRCLK, usado para fornecer os tempos necessários para transmissão e receção de dados. Para gerar um relógio preciso de 1 MHz, carregam-se as constantes de calibração do registo do sistema do *Basic Clock* e do registo de controle do DCO, nomeadamente CALBC1_1MHZ e CALDCO_1MHZ. Segue-se trecho de código referente a estas configurações.

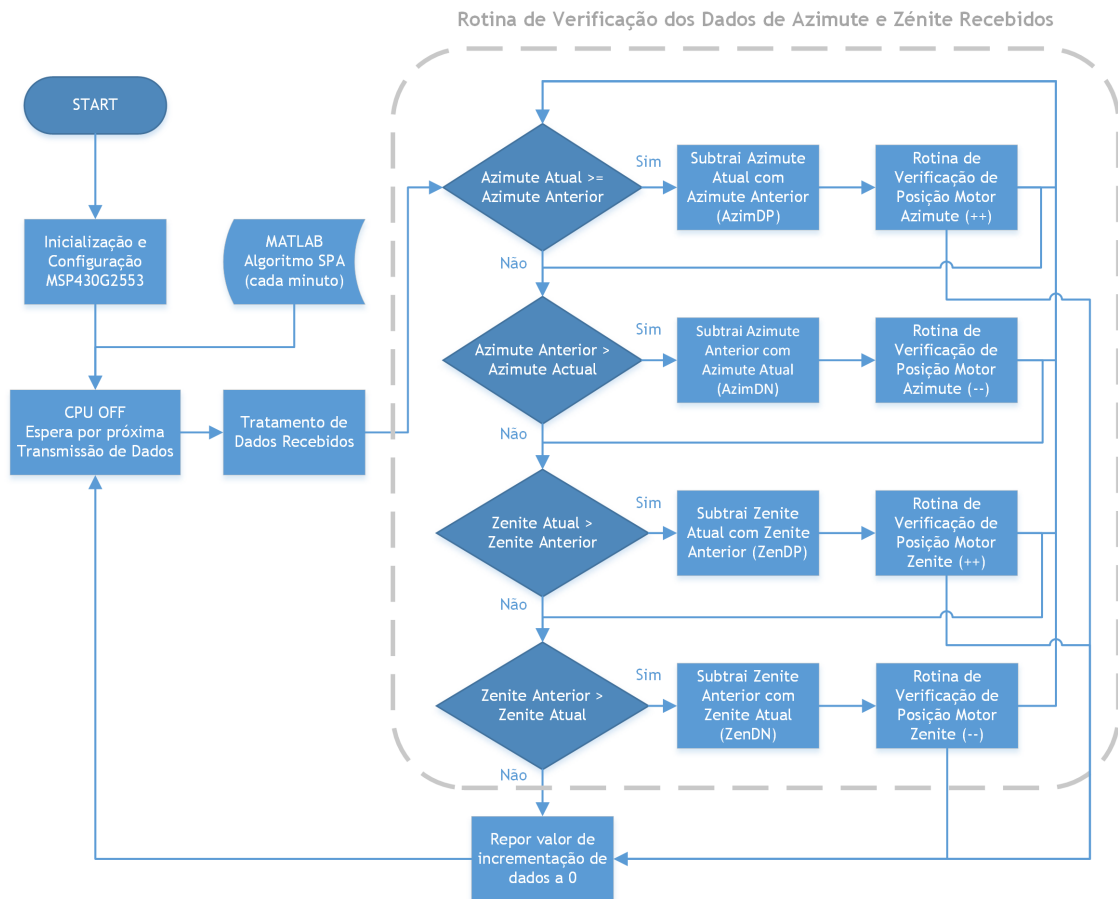


Figura 4.7: Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo por malha aberta (Fase 2).

```

1 // Configuração dos Relógios
2
3 WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
4 DCOCTL = 0x00;
5 BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ;
6 DCOCTL = CALDCO_1MHZ;

```

Tal como na Fase 1, faz-se um *reset* manual dos portos do MSP430, habilita-se o porto P1.0, configurando-o como 0 para estar desligado quando não habilitado pelos botões limitadores, para habilitar o LED1 do *Launchpad* quando um botão de limitação de curso fosse pressionado. Configuram-se os portos P1.1 e P1.2 para receção e transmissão de dados, respetivamente, por onde o módulo USCI irá comunicar. Habilitam-se os portos P2.4 a P2.7 como saídas, para as entradas STEP e DIR dos drivers A4988, usufruindo do comando P2SEL para os habilitar como portos I/O digitais. Define-se os portos P2.0 a P2.3 como entradas, ativam-se as resistências *pull-up*, ativam-se as interrupções nestes portos, correspondentes aos portos de ligação aos botões limitadores de campo, e configura-se a interrupção de alto para baixo. Quando pressionados, irão retornar o valor 0, indicando que o botão foi pressionado e, como tal, o microcontrolador terá que interromper o programa para correr a rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção do porto. Segue-se excerto de código referente à configuração dos portos.

```

1 // Configuração de Portos
2
3 P1DIR = 0xFF;

```

Table 15-4. Commonly Used Baud Rates, Settings, and Errors, UCOS16 = 0

BRCLK Frequency [Hz]	Baud Rate [Baud]	UCBRx	UCBRSx	UCBRFx	Maximum TX Error [%]		Maximum RX Error [%]	
32,768	1200	27	2	0	-2.8	1.4	-5.9	2.0
32,768	2400	13	6	0	-4.8	6.0	-9.7	8.3
32,768	4800	6	7	0	-12.1	5.7	-13.4	19.0
32,768	9600	3	3	0	-21.1	15.2	-44.3	21.3
1,048,576	9600	109	2	0	-0.2	0.7	-1.0	0.8
1,048,576	19200	54	5	0	-1.1	1.0	-1.5	2.5
1,048,576	38400	27	2	0	-2.8	1.4	-5.9	2.0
1,048,576	56000	18	6	0	-3.9	1.1	-4.6	5.7
1,048,576	115200	9	1	0	-1.1	10.7	-11.5	11.3
1,048,576	128000	8	1	0	-8.9	7.5	-13.8	14.8
1,048,576	256000	4	1	0	-2.3	25.4	-13.4	38.8
1,000,000	9600	104	1	0	-0.5	0.6	-0.9	1.2
1,000,000	19200	52	0	0	-1.8	0	-2.6	0.9
1,000,000	38400	26	0	0	1.8	0	2.6	1.8

Figura 4.8: Excerto da Tabela 15-4 do *datasheet* do MSP430G2553, de onde se retiram os valores para UCBRx e UCBRSx.

```

4 P1OUT = 0x00;
5 P2DIR = 0xFF;
6 P2OUT = 0x00;
7
8 P1DIR |= BIT0;
9 P1OUT &= ~BIT0;
10 P1SEL |= BIT1 + BIT2;
11 P1SEL2 |= BIT1 + BIT2;
12 P2SEL &= ~(BIT6 + BIT7);
13 P2DIR |= BIT4 + BIT5 + BIT6 + BIT7;
14
15 P2DIR &= ~(BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3);
16 P2REN = BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;
17 P2IE |= BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;
18 P2IES = 0x00;
19 P2IES |= BIT0 + BIT1 + BIT2 + BIT3;

```

Com os portos configurados, passamos para a configuração dos registos da UART. Uma vez que estamos a lidar com o USCI_A0, teremos que configurar cinco registos de controlo, nomeadamente o UCA0CTL0, o UCA0CTL1, o UCA0BR0, o UCA0BR1 e o UCA0MCTL, de forma a que a UART funcione a 9600 bps, com 8 databits, sem paridade e com 1 stop bit. Em primeiro plano, antes de se fazer alterações nos registos do módulo USCI, este tem que ser colocado no estado de *reset*, ou seja, através do registo UCA0CTL1, habilita-se o bit UCSWRST, equivalente ao estado em causa.

Como o primeiro registo, UCA0CTL0, corresponde às configurações de seleção de paridade (bits UCPEN e UCPAR), de direção da transmissão de dados (LSB ou MSB primeiro, bit UCMSB), do comprimento dos caracteres (bit UC7BIT), do número de stop bits (bit UCSPB) e dos modos de transmissão série (bit UCMODEx e UCSYNC), nesta situação, todos os bits tomam valor zero. Logo o registo não precisa de ser configurado. No registo UCA0CTL1, é seleccionado o bit UCSSEL_2, correspondente à seleção da fonte de relógio SMCLK para o BRCLK. Para configurar os registos UCA0BR0 e UCA0BR1, de forma a se obter uma taxa de 9600 bps, recorre-se à tabela 15-4 do

datasheet do MSP430G2553, de onde se concluí que o registo UCA0BR0 tomará o valor 104, como se pode visualizar na Figura 4.8. O registo UCA0BR1 tomará o valor 0. Ambos são registos de 8 bits usados para ajustar o valor do relógio gerador da taxa de transmissão, através da divisão inteira do SMCLK. Ou seja, o relógio possui uma frequência de 1 MHz, e com o valor 104 indicado na tabela do *datasheet*, a divisão de 1 MHz por 104 resulta em aproximadamente 9615. Não é igual a 9600, o que resultará numa acumulação de erro ao longo do tempo. No entanto, com o registo UCA0MCTL, que controla a modulação da taxa de transmissão, o erro pode ser limitado dentro de um valor máximo. Para isto, é habilitado o bit UCBS0 referente à modulação indicada para esse efeito. Os valores máximos de erro tanto para transmissão como receção podem ser observados na Figura 4.8. Com este procedimento, a UART encontra-se configurada para receber e enviar dados. Para finalizar o bloco funcional “Inicialização e Configuração MSP430G2553”, são ativas as interrupções globais do CPU, de forma a que quando receber dados provenientes do MATLAB possa sair do modo de baixo consumo, e definidos os valores de partida para azimute e zénite. Segue-se trecho de código referente à configuração da UART.

```

1 // Configuracao UART Hardware
2
3 UCA0CTL1 |= UCSWRST;
4 UCA0CTL1 |= UCSSEL_2;
5 UCA0BR0 = 104;
6 UCA0BR1 = 0;
7 UCA0MCTL = UCBS0;
8 UCA0CTL1 &= ~UCSWRST;
9 IE2 |= UCA0TXIE;
10 IE2 |= UCA0RXIE;
11
12 _BIS_SR(GIE);
13
14 // Colocação na posição de partida.
15
16 Mot2C(1050);
17 Mot1C(370);

```

Na próxima etapa, o microcontrolador começa em modo de baixo consumo, ficando a aguardar por dados enviados pelo MATLAB. Quando tal acontece, o MSP sai deste modo e entra na rotina de serviço endereçada ao vetor de interrupção da receção de dados da USCI, nomeadamente o vetor USCIAB0RX_VECTOR. Antes de se explicar como esta rotina se desenrola, é necessário ter em conta o seguinte: os valores dos ângulos provenientes do GUI são enviados para o microcontrolador, caracter por caracter. Logo, à medida que o MSP recebe cada caracter, este tem que os guardar para depois serem tratados de forma a se recriar o valor original do ângulo calculado no MATLAB. O valor do ângulo de azimute é enviado em primeiro lugar, e será composto por 6 caracteres na totalidade, o ângulo de zénite é enviado posteriormente e é composto por 5 caracteres, com um espaço em branco entre ambos os valores. Ou seja, o MATLAB irá enviar um total de 12 caracteres para o microcontrolador. Então, nesta rotina de interrupção, os dados que forem recebidos e salvos no registo UCA0RXBUF são guardados numa matriz de caracteres, RVal, de tamanho correspondente à totalidade de caracteres recebidos, através de uma variável de incrementação de dados i1.

```

1 #pragma vector=USCIAB0RX_VECTOR

```

```

2 __interrupt void USCI0RX_ISR(void)
3 {
4     P1OUT |= BIT0;
5     __bic_SR_register_on_exit(CPUOFF);
6     data = UCA0RXBUF;
7     if (data == ' '){
8         data = 48;
9     }
10    RVal[i1] = data;
11    i1++;
12    P1OUT &= ~BIT0;
13 }

```

Com esta matriz, entramos para o próximo bloco funcional do fluxograma da Figura 4.7, “Tratamento de Dados Recebidos”. Neste bloco, é feita a consolidação dos dados recebidos no valor calculado no MATLAB. No formato de caracter, a numeração inicia-se pelo valor 48, isto é, zero corresponde a 48, um corresponde a 49, etc. Logo, em primeiro lugar, é necessário fazer a conversão de caracter para número inteiro pela subtração do valor retido pelo microcontrolador por 48. Depois de estarem todos transformados em números, é feita a recolocação da posição de cada dígito na sua casa numérica específica. Para mais fácil se entender este processo, vejamos este exemplo: o microcontrolador recebe como valores de ângulo de azimute e zênite, 150,15 e 45,15 graus, respetivamente. O MSP retém estes dígitos individualmente. Temos então para o ângulo de azimute, os números 1, 5, 0, 1, e 5. De forma a recriar o valor pretendido, basta então multiplicar as primeiras três unidades por 100, 10 e 1, e dividir as últimas duas por 10 e 100, finalizando com a adição de todos os valores. No entanto, teve que se tomar em conta que o microcontrolador em questão não tem capacidade suficiente para completar a divisão dos valores de forma a obtermos 0,1 e 0,05, por exemplo. Logo, decidiu-se tornar o valor de 150,15 em 15015, sendo este enviado diretamente pelo MATLAB. Neste caso, basta então multiplicar por 10000, 1000, 100, 10 e 1 para ficarmos com o valor pretendido. O mesmo ocorre para o valor do ângulo de zênite, notando-se que este estará sempre entre 0° e 90°, diferenciando em menos uma multiplicação. Exemplificando matematicamente, passaria pela seguinte denotação:

$$\begin{cases} a = (Az1 - 48) \times 10000 \\ b = (Az2 - 48) \times 1000 \\ c = (Az3 - 48) \times 100 \\ d = (Az4 - 48) \times 10 \\ e = (Az5 - 48) \end{cases}$$

$$\begin{cases} f = (Zen1 - 48) \times 1000 \\ g = (Zen2 - 48) \times 100 \\ h = (Zen3 - 48) \times 10 \\ j = (Zen4 - 48) \end{cases}$$

$$\begin{cases} AzimN = a + b + c + d + e \\ ZenN = f + g + h + j \end{cases}$$

AzimN e *ZenN* serão então os valores de ângulo de azimute e zênite, gerados pelo GUI.

Segue-se o excerto de código referente a esta transformação de dados.

```
1  while (i < 5){
2      RValString1[i] = RVal[i];
3      RValString2[i] = RVal[i+6];
4      i++;
5  }
6  i = 0;
7
8  while (i1 >= 12){
9      a = (RValString1[0]-48)*10000;
10     b = (RValString1[1]-48)*1000;
11     c = (RValString1[2]-48)*100;
12     d = (RValString1[3]-48)*10;
13     e = (RValString1[4]-48);
14     f = (RValString2[0]-48)*1000;
15     g = (RValString2[1]-48)*100;
16     h = (RValString2[2]-48)*10;
17     j = (RValString2[3]-48);
18
19     AzimN = a + b + c + d + e;
20     ZenN = f + g + h + j;
21     i1 = 0;
22
23     while (i2 < 12){
24         RVal[i2] = 0;
25         i2++;
26     }
27     break;
28 }
```

Com estes, inicia-se a “Rotina de Verificação dos Dados de Azimute e Zénite recebidos” cuja função guiará a estrutura seguidora para a posição do Sol. Posto isto, esta rotina encontra-se subdividida em 4 partes:

1. Verificação do ângulo de azimute atual/recebido perante o anterior.

Em primeiro plano, existe um bloco de decisão, onde se faz a comparação se o valor de ângulo recebido é igual ou superior ao valor anterior. Se não for o caso, segue-se o ponto seguinte. Em caso afirmativo, é feita a subtração entre estes os dois valores, resultando na variável *AzimDP*. Com esta, entramos noutra rotina, denominada “Rotina de posição motor azimute (++)” onde irá ocorrer a incrementação de passos do motor para reposicionar o seguidor. Esta rotina pode ser vista em mais detalhe através da Figura 4.9. Nesta, é feito um encadeamento sucessivo consoante o valor de *AzimDP*. Se for superior a 26000, correspondente ao limite máximo do campo em azimute, 310° ($260 + 50$), o programa sai da rotina. Se superior a 7000, o motor irá incrementar 280 passos, correspondente a 70° de deslocação, faz uma atualização do ângulo anterior para o atual, e regressa novamente ao início da rotina de verificação de dados. Caso contrário, passa para a próxima verificação. Este último processo é semelhante para 5000, 2500, 1000, 500, 250, 100, 50 e 25, onde o motor incrementa 200, 100, 40, 20, 10, 4, 2 e 1 passos, respetivamente, seguido

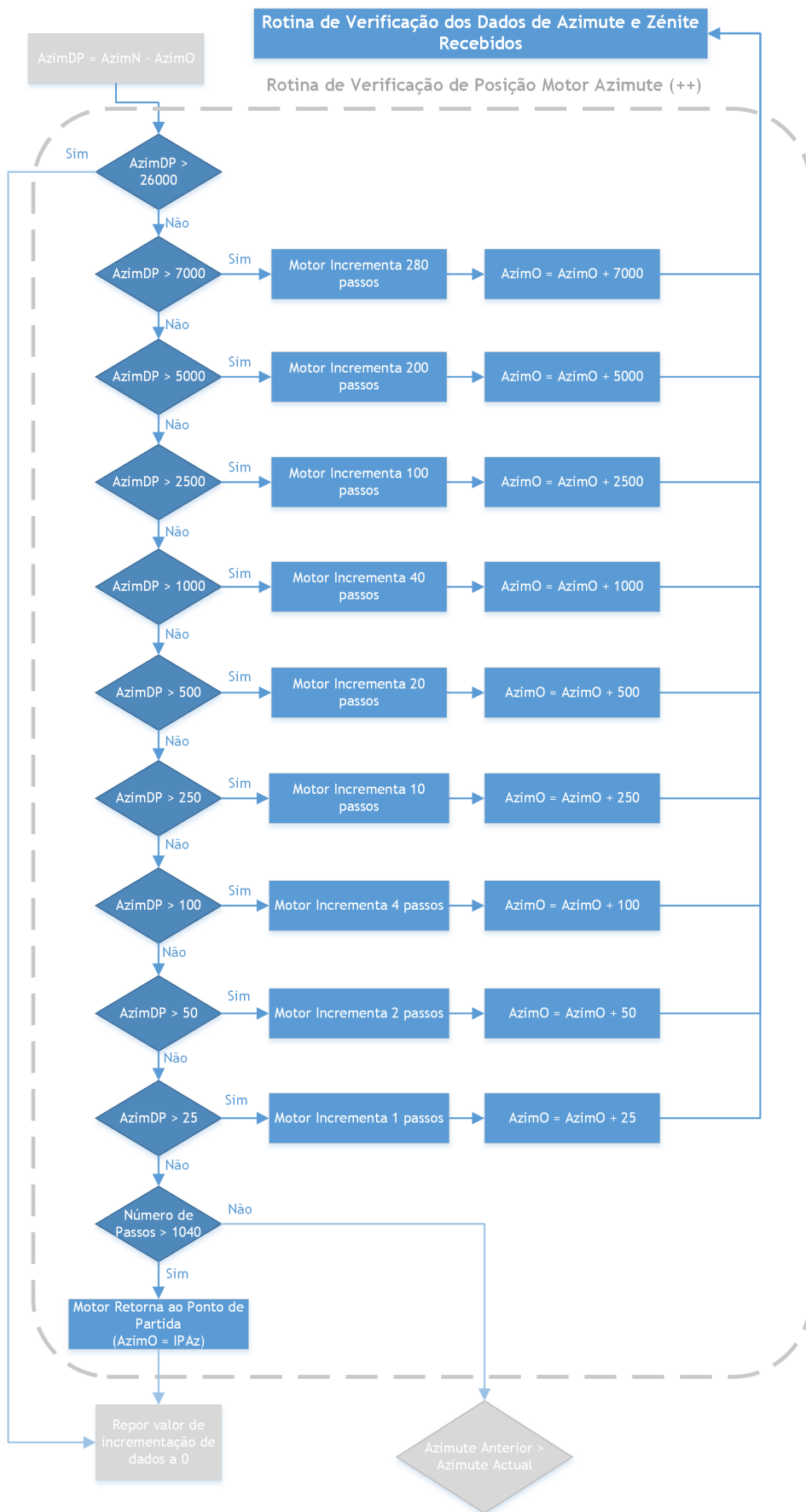


Figura 4.9: Rotina de verificação de posição do motor em azimute (++).

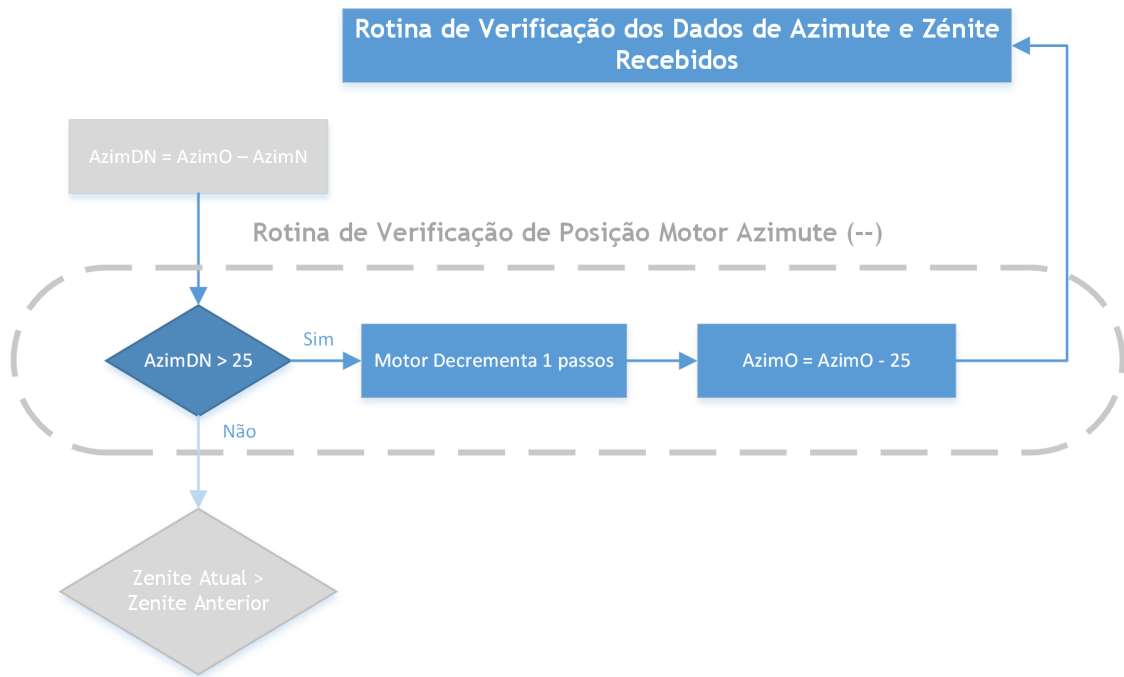


Figura 4.10: Rotina de verificação de posição do motor em azimute (-).

da atualização de ângulo atual e retorno ao início da rotina de verificação de dados. No último caso, se $AzimDP$ não for superior a 25, é feita uma verificação do número de passos incrementados pelo motor. Se for superior a 1040, correspondente ao raio de ação máximo em azimute de 310° , o motor irá regressar ao ponto de partida, decrementando 1040 passos e atualiza o ângulo atual para o ponto de partida, de 50° . Após isto, sai da rotina. Em caso negativo, o programa segue para a próxima subdivisão de rotina.

2. Verificação do ângulo de azimute anterior com o atual/recebido.

Inicia-se com um bloco de decisão, onde se faz a comparação se o valor de ângulo anterior é superior ao valor atual. Se não for o caso, segue para o ponto seguinte. Em caso afirmativo, é feita a subtração entre estes os dois valores, resultando na variável $AzimDN$. Com esta, entramos noutra rotina, denominada “Rotina de Posição Motor Azimute (-)” onde irá ocorrer a decrementação de passos do motor para reposicionar o seguidor. Esta rotina pode ser vista na Figura 4.10. Esta só possui uma verificação, a de 25, correspondente a um passo, uma vez que em azimute o seguidor solar só deverá seguir no sentido de Este para Oeste, sendo que esta corresponde ao sentido inverso. Em caso afirmativo, decrementa um passo, atualiza o ângulo atual e regressa ao início da rotina. Caso contrário, segue para a próxima subdivisão. Esta pequena rotina tem como função fazer algum ajuste que possa surgir na eventualidade de ocorrer uma anomalia.

3. Verificação do ângulo de zénite atual/recebido perante o anterior.

Em primeiro lugar, existe um bloco de decisão, onde se faz a comparação se o valor de ângulo recebido é igual ou superior ao valor anterior. Em caso negativo, segue-se o ponto seguinte. Em caso afirmativo, é feita a subtração entre estes dois valores, resultando na variável $ZenDP$. Com esta, entramos noutra rotina, denominada “Rotina de posição motor zénite (++)” onde irá ocorrer a incrementação de passos do motor para o suporte do seguidor. Esta rotina pode ser vista em mais detalhe através da Figura 4.11. Nesta, é feito um encadeamento de blocos de decisão sucessivos consoante o valor de $ZenDP$. Se for

superior a 9000, correspondente ao limite máximo do campo em zénite, 90°, o programa saí da rotina. O mesmo acontece se for igual a 0°, correspondente ao limite mínimo e ao ponto de partida. Se superior a 1000, 500, 250, 100, 50 ou 25 o motor irá incrementar 40, 20, 10, 4, 2 e 1 passos, respetivamente, faz uma atualização do ângulo anterior para o atual, e regressa novamente ao início da rotina de verificação de dados. Caso contrário, passa para a próxima verificação. No último caso, se $ZenDP$ não for superior a 25, é feita uma verificação do número de passos incrementados pelo motor. Uma vez que pode ocorrer o caso em que o Sol possa atingir um azimute igual a 90°, fez-se uma limitação para acima desse ângulo, mais concretamente para 92°. Se for o caso, o motor irá regressar ao ponto de partida, decrementando 368 passos e atualiza o ângulo atual para o ponto de partida, de 0°. No entanto, esta situação só poderá ocorrer em caso de falha do botão limitador de campo. Este encontra-se na posição certa de 90°, o que fará com que o seguimento nesta vertente nunca passará dos 90°. Após isto, saí da rotina.

4. Verificação do ângulo de zénite anterior com o atual/recebido.

Nesta subdivisão, o procedimento é o inverso do anterior. Faz-se a comparação se o valor de ângulo anterior é superior ao valor de ângulo recebido. Em caso negativo, finaliza-se a “Rotina de verificação dos dados de azimute e zénite recebidos”. Em caso afirmativo, é feita a subtração entre estes os dois valores, resultando na variável $ZenDN$. Com esta, entramos noutra rotina, denominada “Rotina de posição motor zénite (-)” onde irá ocorrer a decrematação de passos do motor para o suporte do seguidor. Esta rotina pode ser vista em mais detalhe através da Figura 4.12. Como se pode observar, o encadeamento é igual ao fluxograma da Figura 4.11, com a particularidade de em vez do motor incrementar passos, decrementa.

Após calibração do seguimento solar perante os ângulos recebidos, a variável de incrementação de dados $i1$ é posta a zero, indicando que o microcontrolador se encontra pronto a receber um novo conjunto de dados provenientes do MATLAB. Posto isto, o MSP é posto em modo de baixo consumo e fica a aguardar por novos dados, recomeçando novamente o ciclo de controlo da Fase 2.

4.3 Terceira Fase - Seguimento Solar Misto

O objetivo desta fase passa pela junção dos controlos efetuados nas Fases 1 e 2, ou seja, um controlo onde o sistema irá seguir o Sol em primeiro plano através do algoritmo, e usa o *feedback* da componente sensora das resistências dependentes de luz para fazer as devidas correções necessárias ao sistema. Posto isto, o controlo segue o fluxograma funcional observado na Figura 4.13. Como comum nas duas primeiras fases, o primeiro bloco passa pela inicialização e configuração dos portos necessários, a configuração do ADC10 e da UART presentes no MSP430. Neste ponto, todos os portos usados e configurações escolhidas são iguais às fases anteriores. De seguida, como descrito na Fase 2, o microcontrolador fica em espera pelos dados calculados no MATLAB dos ângulos de azimute e zénite. Posteriormente, os dados são tratados e inicia-se a verificação de posicionamento do seguidor solar. Após todo este procedimento, é então feita a aquisição de dados pelo ADC10 dos valores de queda de tensão dos LDR. Inicia-se, então, a rotina de *feedback* do controlo. Se se encontrar na posição correta, o MSP entra em modo de baixo consumo, à espera do próximo pacote de dados proveniente do MATLAB. Caso contrário, faz a

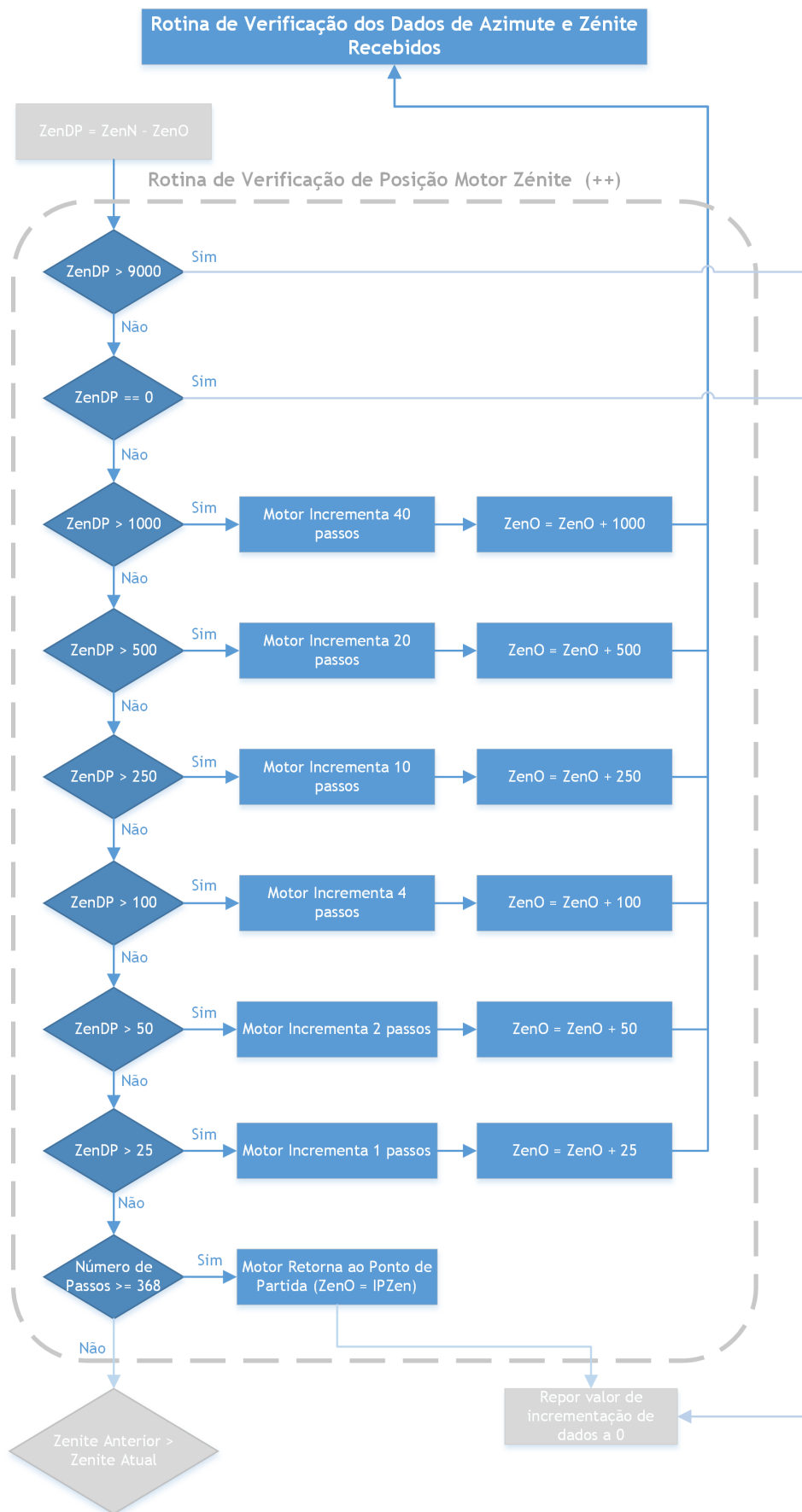


Figura 4.11: Rotina de verificação de posição do motor em zénite (++)

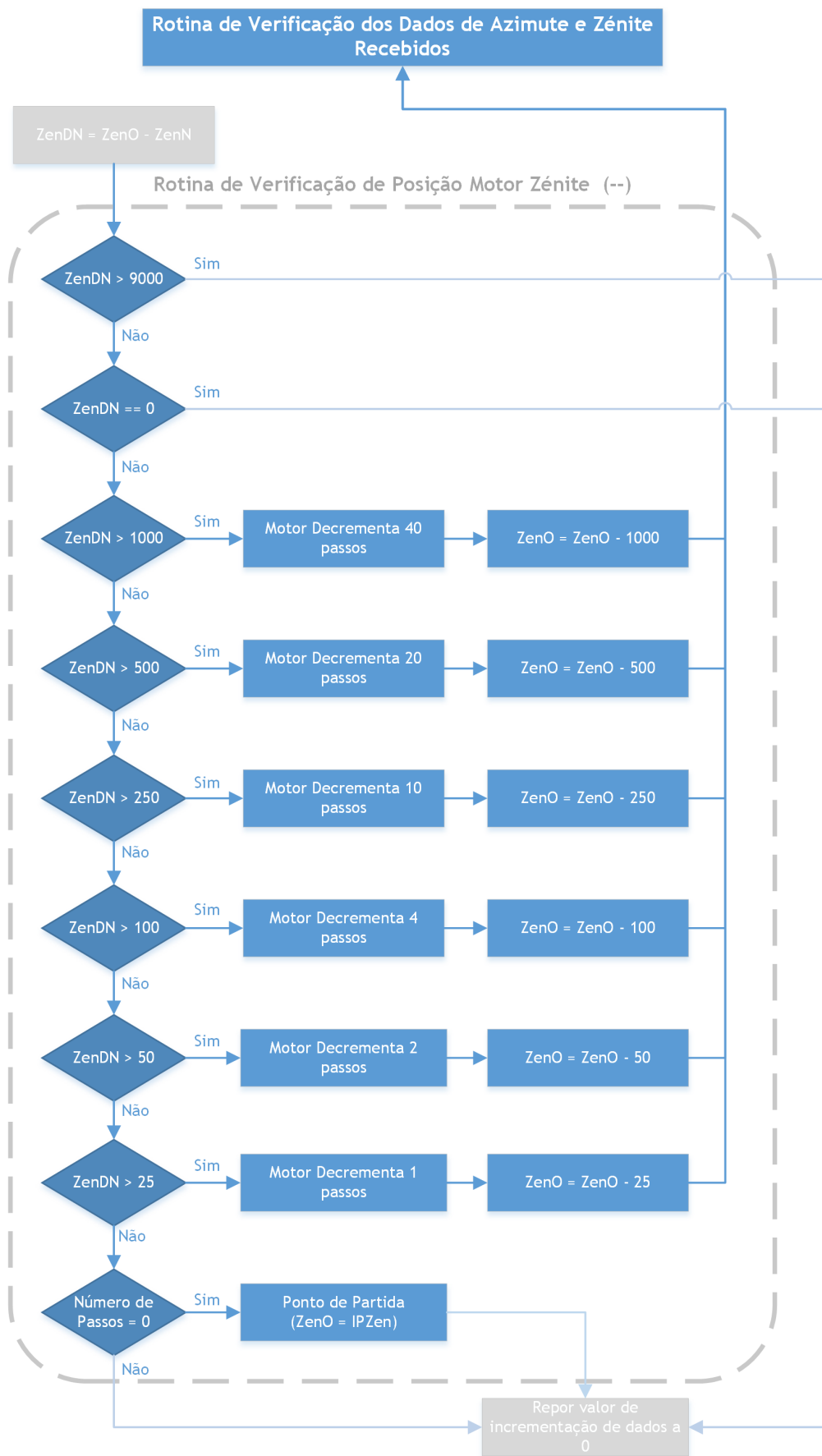


Figura 4.12: Rotina de verificação de posição do motor em zénite (-).

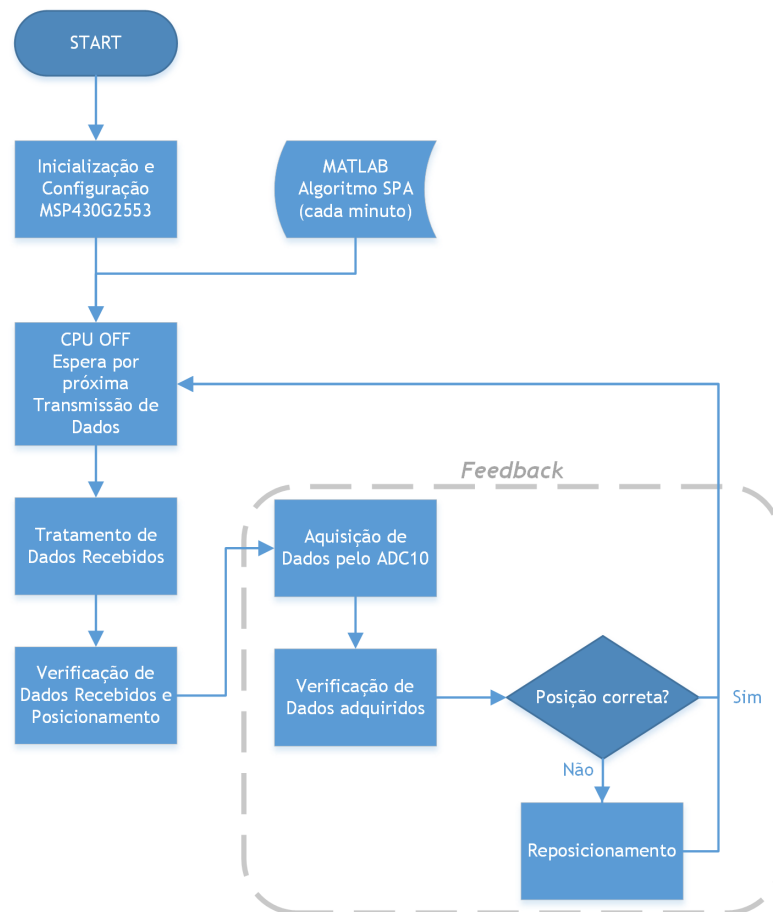


Figura 4.13: Fluxograma funcional do seguidor solar em controlo misto (Fase 3).

devida correção necessária e, quando completa, entra novamente em modo baixo consumo, a aguardar dados.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusões

Os objetivos propostos para este trabalho assentaram: no desenvolvimento de três tipos de controlo para seguimento solar; na manufatura de um seguidor solar e na inclusão do microcontrolador MSP430G2553 da Texas Instruments nos três controlos desenvolvidos, uma vez que não se encontra na literatura o seu uso para este género de aplicações. Todos estes objetivos foram cumpridos, sendo que levantaram diversas questões quanto à sua funcionalidade para radiometria solar.

Assim, desenvolveram-se os três tipos de controlo de seguimento solar, os quais, através da realização de testes experimentais, tanto em ambiente laboratorial como em ambiente externo, mostraram serem capazes de seguir o trajeto solar com um erro relativamente pequeno. No que diz respeito aos resultados do primeiro controlo de seguimento solar, nomeadamente pelo uso de dois pares de LDRs, constatou-se que, inicialmente, existia um erro relativamente grande no eixo de azimute. Tal aconteceu devido a um erro de cálculo no dimensionamento dos suportes dos LDRs, o que induziu um erro inicial de 20° . Para colmatar esta falha, aumentou-se a grossura da haste do suporte das resistências, de forma a que a distância dos LDRs à haste fosse mínima; assim o erro foi reduzido para um valor teórico compreendido entre $0,5^\circ$ e 1° . Após as alterações realizadas e executados alguns testes, o controlo em questão mostrou ser capaz de seguir a trajetória solar. O segundo controlo, por via da implementação do algoritmo SPA, demonstrou ser prometedora face à fiabilidade por apresentar um erro de $0,0003^\circ$. Todavia, na realização dos testes experimentais, este algoritmo apresentou uma variação de erro entre 1° e 3° , o que poderá estar relacionado com a instrumentação do seguidor solar. Em terceiro lugar, o controlo referente à junção dos dois controlos anteriores, acabou por corrigir o erro demonstrado no segundo método, mas apresentou igualmente um erro compreendido entre $0,5^\circ$ e 1° .

Durante os testes com o protótipo, foram exibidos comportamentos estranhos por parte do seu controlo. O microprocessador estava programado para desempenhar uma determinada função mas, na realidade, observou-se que o efetuava de forma errónea. Através da inclusão de ferrite nos cabos de alimentação dos motores de passo, chegou-se à conclusão que existiam interferências a serem injetadas no circuito, induzidas pela componente indutiva dos motores, o que, de fato, afetava o bom funcionamento do MSP430. Após a introdução da ferrite, o comportamento do microcontrolador normalizou, seguindo o que estava programado.

Em suma, os três tipos de controlo mostraram-se promissores para o seguimento solar. Contudo, se a aplicação destes controlos tivesse a função de otimizar a produção de energia solar por parte de um painel fotovoltaico, o erro seria mínimo e demonstraria um acréscimo de produção em comparação com painéis fixos. Como a aplicação pretendida seria para radiometria solar, os erros apresentados pelo seguidor e, conseqüentemente, dos controlos desenvolvidos, teoricamente continuaria a ser grande. Logo, neste ponto, o contexto desta dissertação mantém em aberto a possibilidade de prosseguir o desenvolvimento do seguidor, mediante a introdução de outra instrumentação.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como referido anteriormente, os resultados obtidos nesta dissertação demonstraram que o protótipo necessita de mais investimento para que tenha, de fato, um seguimento com uma precisão mais elevada. Formulam-se assim sugestões futuras para este tema.

Em primeiro lugar, a utilização de um protótipo em madeira, do tipo MDF, serviu para testar se, de forma concreta, as metodologias propostas para o seguimento eram eficazes ou não. Como mostrou ser viável para a aplicação proposta, o próximo passo a tomar será a criação de um protótipo em alumínio, de forma a suportar o ambiente exterior hostil, como as condições meteorológicas e climáticas adversas. A próxima sugestão refere-se ao microcontrolador empregue. O objetivo proposto para a sua utilização foi cumprido, uma vez que se conseguiu criar um controlo de seguimento solar através da sua inclusão no projeto. No entanto, demonstrou limitações em alguns níveis, como o número total de portos disponíveis e memória para resolução de operações matemáticas. No que diz respeito aos portos, tornou impossível, por exemplo, incluir-se um *encoder* em ambos os motores, para garantir que ambos dariam o número de passos que lhes eram comandados pelo MSP430. Para o último ponto, para tornar o sistema mais independente, seria possível criar um controlo estritamente à base do microcontrolador, onde o algoritmo SPA e todos os dados necessários para a cálculo dos ângulos de azimute e zénite pudessem ser incluídos, não havendo a necessidade de conexão direta a um computador, para receber dados proveniente do MATLAB. Assim, propõe-se para trabalho futuro a inclusão de um microprocessador com maior número de portos disponíveis e memória RAM.

Outras propostas de trabalho passariam pela: inclusão ou de *encoders*, como referido no parágrafo anterior, ou a inclusão de um sistema de referência de atitude e rumo (AHRS) como *feedback* para o algoritmo SPA, uma vez que ambos trabalham diretamente com os ângulos de azimute e zénite; adição de um RTC para informar o microcontrolador do tempo atual, no caso de se incluir o algoritmo SPA no microprocessador; adição de um módulo *wireless* para envio de dados por parte do microcontrolador para um computador ou servidor, de forma a se conseguir aceder às variáveis calculadas e garantir também um controlo remoto, entrando assim o sistema mais na área da IoT.

Bibliografía

- [1] NOAA National Centers for Environmental Information. (2018, January) State of the climate: Global climate report for annual 2017. [Online]. Available: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713> 1
- [2] C. McConnell, "Aircraft measurements of saharan mineral dust," Ph.D. dissertation, University of Reading, 2009. 1
- [3] R. V. Benito, "Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. caracterización del área del golfo de cádiz." Ph.D. dissertation, Universidad de Valladolid, 2001. 1, 3
- [4] P. R. Buseck and M. Pósfai, "Airborne minerals and related aerosol particles: Effects on climate and the environment," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, no. 7, pp. 3372-3379, 1999. 1
- [5] S. V. Salinas, M. Lan, and S. C. Liew, "Photometer-based aerosol phase functions for simulating the internal radiation field in smoky atmospheres," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, July 2015, pp. 2338-2341. 1, 2
- [6] M. Obregón, S. Pereira, V. Salgueiro *et al.*, "Aerosol radiative effects during two desert dust events in august 2012 over the southwestern iberian peninsula," *Atmospheric Research*, vol. 153, pp. 404 - 415, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809514003767> 1, 2
- [7] A.-B. Mahler, K. Thome *et al.*, "Dust transport model validation using satellite-and ground-based methods in the southwestern united states," in *SPIE Optics+ Photonics*. International Society for Optics and Photonics, 2006, pp. 62 990L-62 990L. 1, 2
- [8] C. Emde, R. Buras *et al.*, "The impact of aerosols on polarized sky radiance: model development, validation, and applications," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 2, pp. 383-396, 2010. 1, 2
- [9] Atmospheric Radiation Analysis - Laboratoire de Météorologie Dynamique. (2015, July) Characterizing aerosols from spaceborne infrared vertical sounders. [Online]. Available: http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=aerosols_old 1
- [10] S. Mukai, M. Yasumoto *et al.*, "Aerosol remote sensing for hazy atmosphere," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International*, July 2014, pp. 4165-4168. 2
- [11] William Winkenwerder, Jr. (2002, October) Environmental exposure report: Particulate matter - final report. [Online]. Available: http://www.gulflink.osd.mil/particulate_final/index.htm 2
- [12] M. Koçak, C. Theodosi, P. Zampas *et al.*, "Particulate matter (pm10) in istanbul: Origin, source areas and potential impact on surrounding regions," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 38, pp. 6891 - 6900, 2011, modeling of Air Quality Impacts, Forecasting and Interactions with Climate. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101000868X> 2

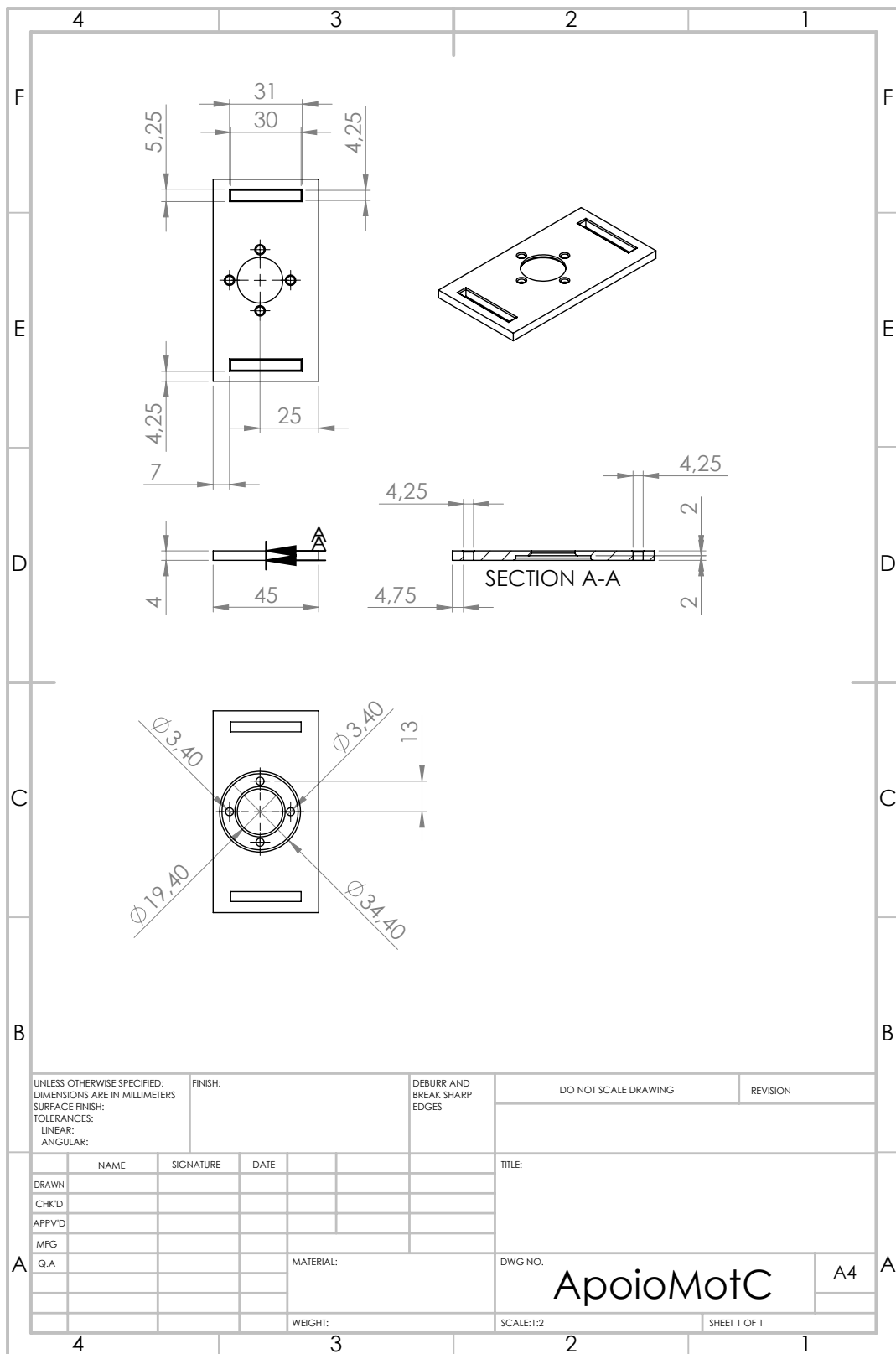
- [13] NASA Earth Observatory. (2016, February) Saharan dust sweeps over the iberian peninsula. [Online]. Available: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=87566> 2
- [14] J. Qiu and X. Zong, "Variation trends of cloud and aerosol optical thicknesses over four sites in china during 1960-2009," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, July 2015, pp. 937-938. 2
- [15] F. M. Emanuel, "Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar," Master's thesis, FCT - UNL, 2009. 5, 15
- [16] G. Prinsloo and R. Dobson, "Solar tracking," 2014. 5, 12, 25
- [17] R. J. M. Cortez, "Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica," Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. 5, 6, 12, 13, 15, 16
- [18] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011. 5, 6, 7, 8, 9
- [19] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 1800-1818, 2009. 5, 6, 8, 10, 11, 12
- [20] S. Wielder, "An introduction to solar energy for scientist and engineer," *John Willy & Sons*, 1982. 6, 8
- [21] M. Haryanti, A. Halim, and A. Yusuf, "Development of two axis solar tracking using five photodiodes," in *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), 2014*. IEEE, 2014, pp. 40-44. 6, 8, 10, 12, 20
- [22] B. A. M. Nascimento, "Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar," Master's thesis, Instituto Politécnico de Viseu, 2015. 6, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16
- [23] E. M. V. Brito de Azevedo, *Diversidade Morfológica - clima, vegetação e ocupação territorial. [projeção visual]*, 2010, comunicação efetuada no âmbito da unidade curricular de Climatologia pela Universidade dos Açores. 8
- [24] S. Ray, "Calculation of sun position and tracking the path of sun for a particular geographical location," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 9, pp. 81-84, 2012. 8
- [25] A. Stjepanović, S. Stjepanović, F. Softić, and Z. Bundalo, "Microcontroller based solar tracking system," in *Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services, 2009. TELSIKS'09. 9th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 518-521. 8, 15, 17, 18, 20
- [26] M. Romero, R. Lemuz, I. O. Ayaquica-Martinez, G. Saldana-Gonz *et al.*, "A calibration algorithm for solar tracking system," in *Artificial Intelligence (MICAI), 2011 10th Mexican International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 139-143. 10, 15, 21
- [27] A. Kassem and M. Hamad, "A microcontroller-based multi-function solar tracking system," in *Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International*. IEEE, 2011, pp. 13-16. 10

- [28] M. T. A. Khan, S. S. Tanzil, R. Rahman, and S. S. Alam, "Design and construction of an automatic solar tracking system," in *Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 326-329. 10, 15
- [29] M. Sidek, W. Hasan, M. A. Kadir, S. Shafie, M. Radzi, S. Ahmad, and M. Marhaban, "Gps based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation," in *Power and Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 245-249. 10, 21
- [30] D. Angelkov, N. Koceska, and S. Koceski, "Low-cost dual-axis system for solar tracking," in *Embedded Computing (MECO), 2014 3rd Mediterranean Conference on*. IEEE, 2014, pp. 169-172. 10, 21
- [31] A. Argeseanu, E. Ritchie, and K. Leban, "New low cost structure for dual axis mount solar tracking system using adaptive solar sensor," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 1109-1114. 10, 11, 12, 15
- [32] V. S. G. Narendrasinh .J. Parmar, Ankit .N. Parmar, "Passive solar tracking system," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 138-144, January 2015. 10, 11
- [33] N. Parmar, A. N. Parmar, and V. S. Gautam, "Passive solar tracking system," *Int J Emerg Technol Adv Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 138-145, 2015. 10
- [34] N. Othman, M. Manan, Z. Othman, and S. Al Junid, "Performance analysis of dual-axis solar tracking system," in *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 370-375. 10, 15
- [35] B.-H. Jeong, J.-H. Park, S.-D. Kim, and J.-H. Kang, "Performance evaluation of dual axis solar tracking system with photo diodes," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 414-417. 10
- [36] P. Sharma and N. Malhotra, "Solar tracking system using microcontroller," in *Non Conventional Energy (ICONCE), 2014 1st International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 77-79. 10
- [37] F. Duerr, Y. Meuret, and H. Thienpont, "Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics," *Optics express*, vol. 21, no. 103, pp. A401-A411, 2013. 13
- [38] A. Argeseanu, E. Ritchie, and K. Leban, "A new solar position sensor using low cost photo-sensors matrix for tracking systems," *WSEAS Trans Power Syst*, vol. 64, pp. 189-198, 2009. 13
- [39] J. H. Meeus, *Astronomical algorithms*. Willmann-Bell, Incorporated, 1991. 14
- [40] I. Reda and A. Andreas, "Solar position algorithm for solar radiation applications," *Solar energy*, vol. 76, no. 5, pp. 577-589, 2004. 14, 44
- [41] N. Barsoum, "Implementation of a prototype for a traditional solar tracking system," in *Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS'09. Third UKSim European Symposium on*. IEEE, 2009, pp. 23-30. 15, 21

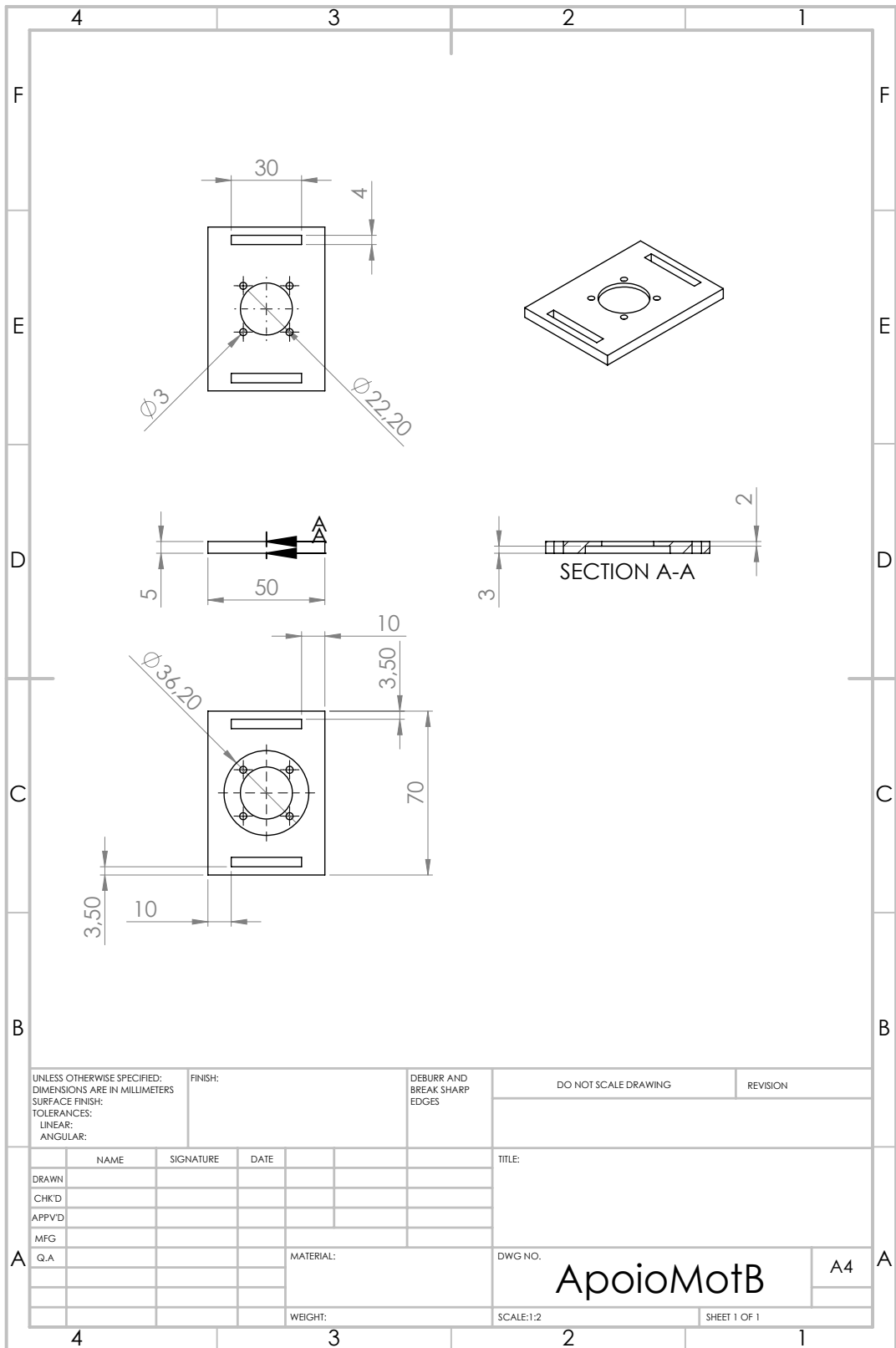
- [42] S. Malge, K. Bhole, and R. Narkhede, "Designing of dual-axis solar tracking system with remote monitoring," in *Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 1524-1527. 15, 21
- [43] M. I. Hossain, S. A. Khan, and M. Shafiullah, "Power maximization of a photovoltaic system using automatic solar panel tracking along with boost converter and charge controller," in *Electrical & Computer Engineering (ICECE), 2012 7th International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 900-903. 15, 17
- [44] Tarun Agarwal. (2014, July) Light activated switch circuit and working functionality. [Online]. Available: <https://www.efxkits.co.uk/light-activated-switch-circuit/> 16
- [45] M. Grant, "Quick start for beginners to drive a stepper motor," *Freescale Semiconductor* http://www.omc-stepperonline.com/stepper-motors-nema-17-stepper-motors-c-1_21.html, 2005. 17, 18, 20
- [46] P. P. Acarnley, *Stepping motors: a guide to theory and practice*. IET, 2002, no. 63. 17, 18
- [47] R. Condit and D. W. Jones, "Stepping motors fundamentals," *Microchip Inc. Publication AN907*, pp. 1-22, 2004. 17, 18
- [48] R. Mamlook, S. Nijmeh, and S. M. Abdallah, "A programmable logic controller to control two axis sun tracking system," *Information Technology Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 1083-7, 2006. 21
- [49] A. Ashi, A. A. Joudeh, M. Shafeey, B. H. Sababha, and S. N. Istehkam, "A pv solar tracking system: Design, implementation and algorithm evaluation," in *Information and Communication Systems (ICICS), 2014 5th International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 1-6. 22
- [50] T.-S. Zhan, W.-M. Lin, M.-H. Tsai, and G.-S. Wang, "Design and implementation of the dual-axis solar tracking system," in *Computer Software and Applications Conference (COMP-SAC), 2013 IEEE 37th Annual*. IEEE, 2013, pp. 276-277. 22
- [51] J.-S. Choi, D.-Y. Kim, K.-T. Park, C.-H. Choi, and D.-H. Chung, "Design of fuzzy controller based on pc for solar tracking system," in *Smart Manufacturing Application, 2008. ICSMA 2008. International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 508-513. 23
- [52] A. Yamin, M. Ibrahim, M. Idroas, and A. Zin, "Embedded solar tracking instrumentation system," in *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International*. IEEE, 2013, pp. 223-227. 23
- [53] R. Perneder and I. Osborne, *Handbook Timing Belts: Principles, Calculations, Applications*. Springer Science & Business Media, 2012. 27
- [54] Tim Youngblood. (2015) Create your first application with ti's launchpad. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/create-your-first-application-with-tis-launchpad/> 29, 30
- [55] Polulu Robotics & Electronics. (2017) A4988 stepper motor driver carrier. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1182> 32
- [56] L. Allegro MicroSystems, "A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection," 2014. 33

[57] United States National Observatory. (2017) IERS Rapid Service/Prediction Center for Earth Orientation Parameters. [Online]. Available: <http://maia.usno.navy.mil/> 52

Apêndice A - Apoio para o motor Nema 14.

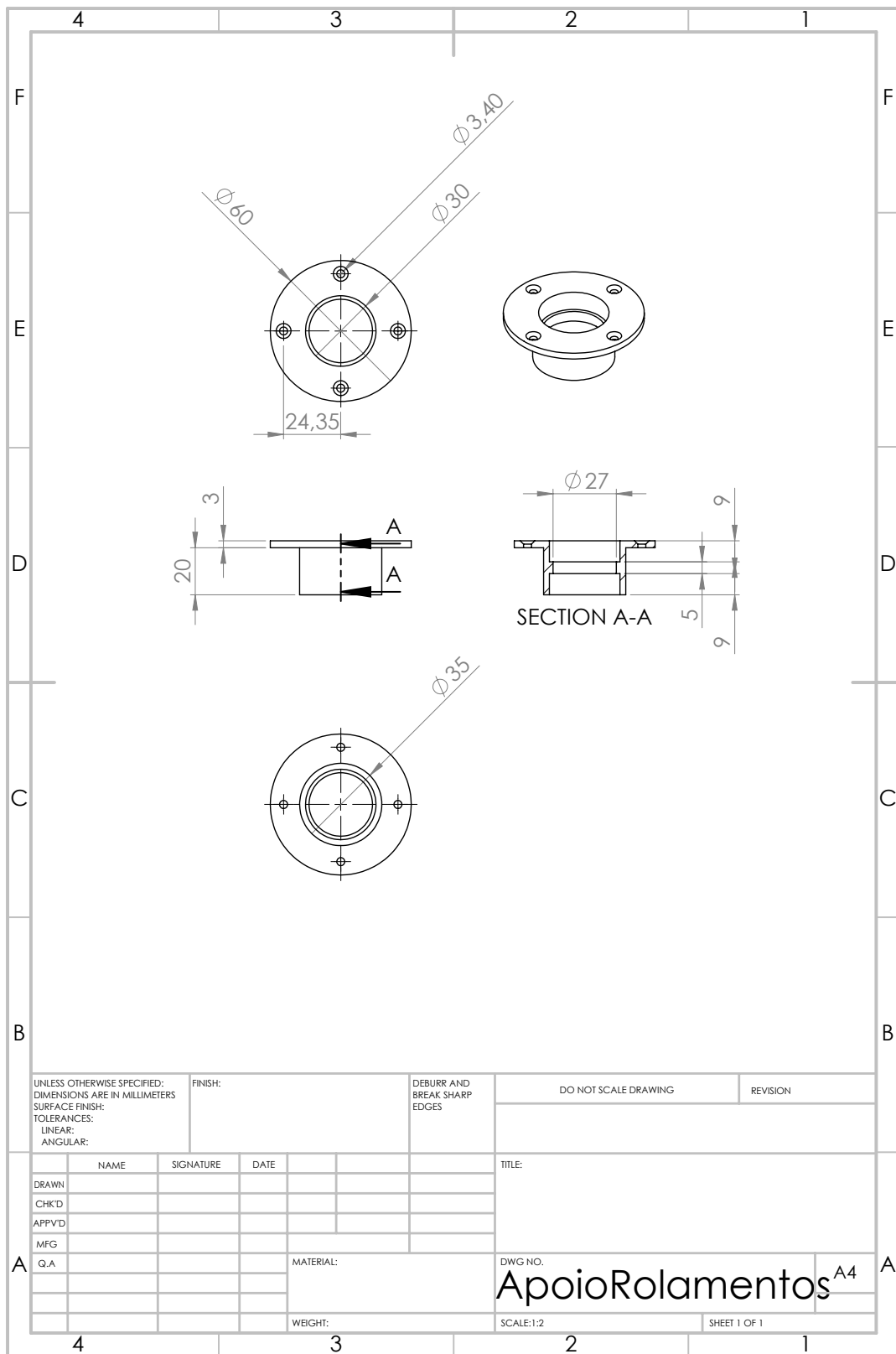


Apêndice B - Apoio para o motor Nema 17.

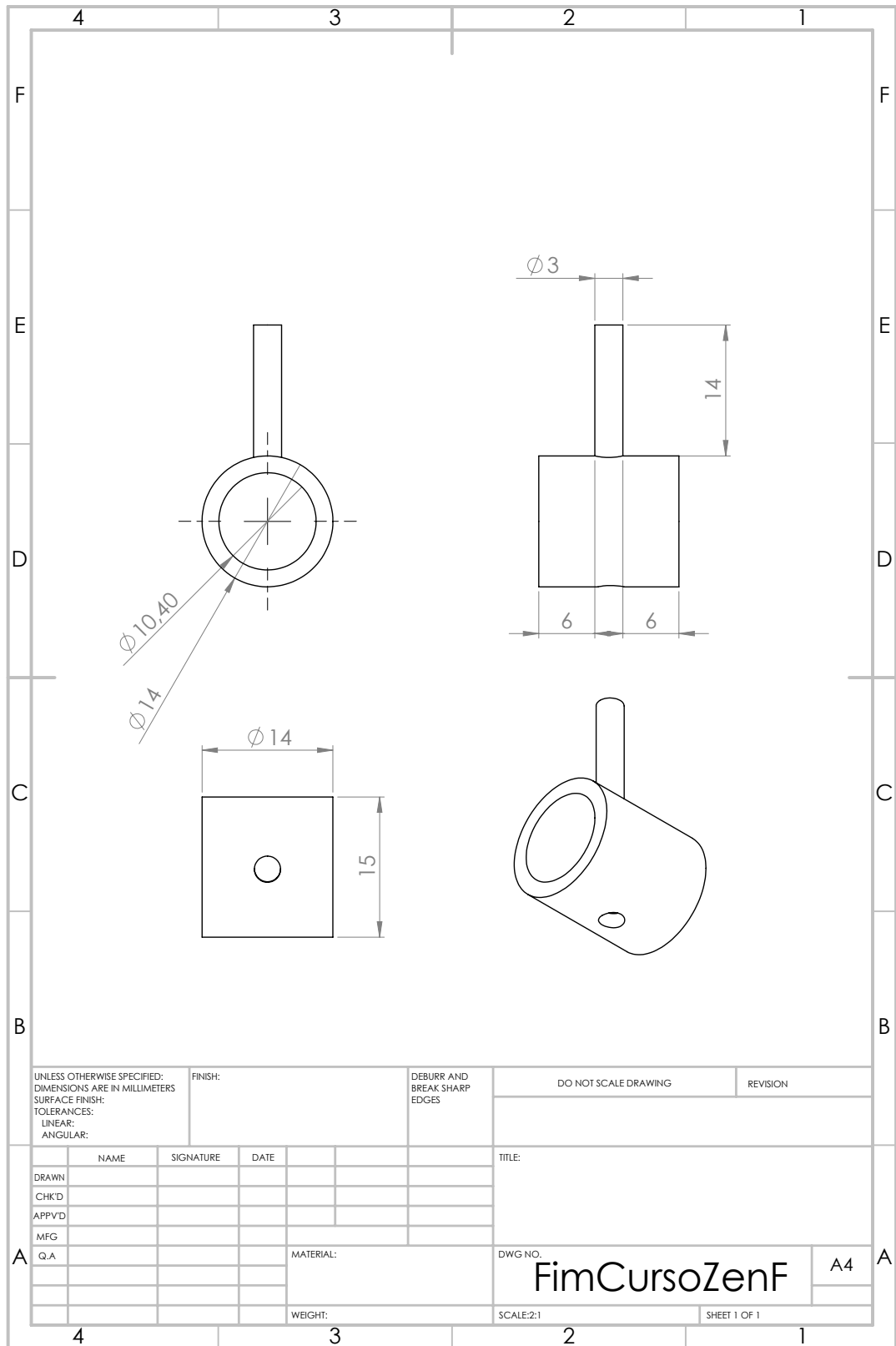


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:				
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A		MATERIAL:			DWG. NO.		A4		
		WEIGHT:			SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1		

Apêndice C - Apoio de rolamentos na base inferior.

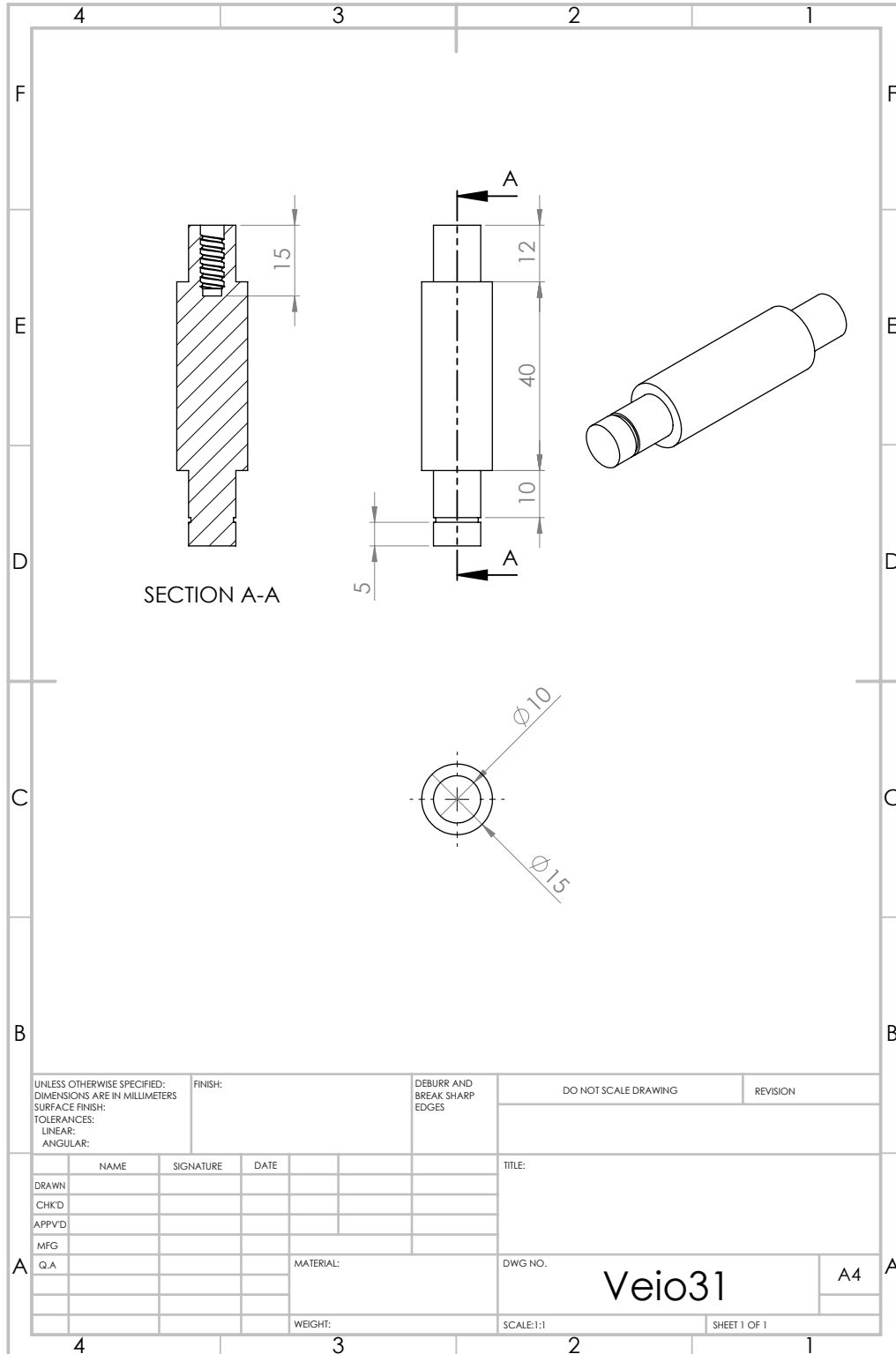


Apêndice D - Fim de curso para zênite.

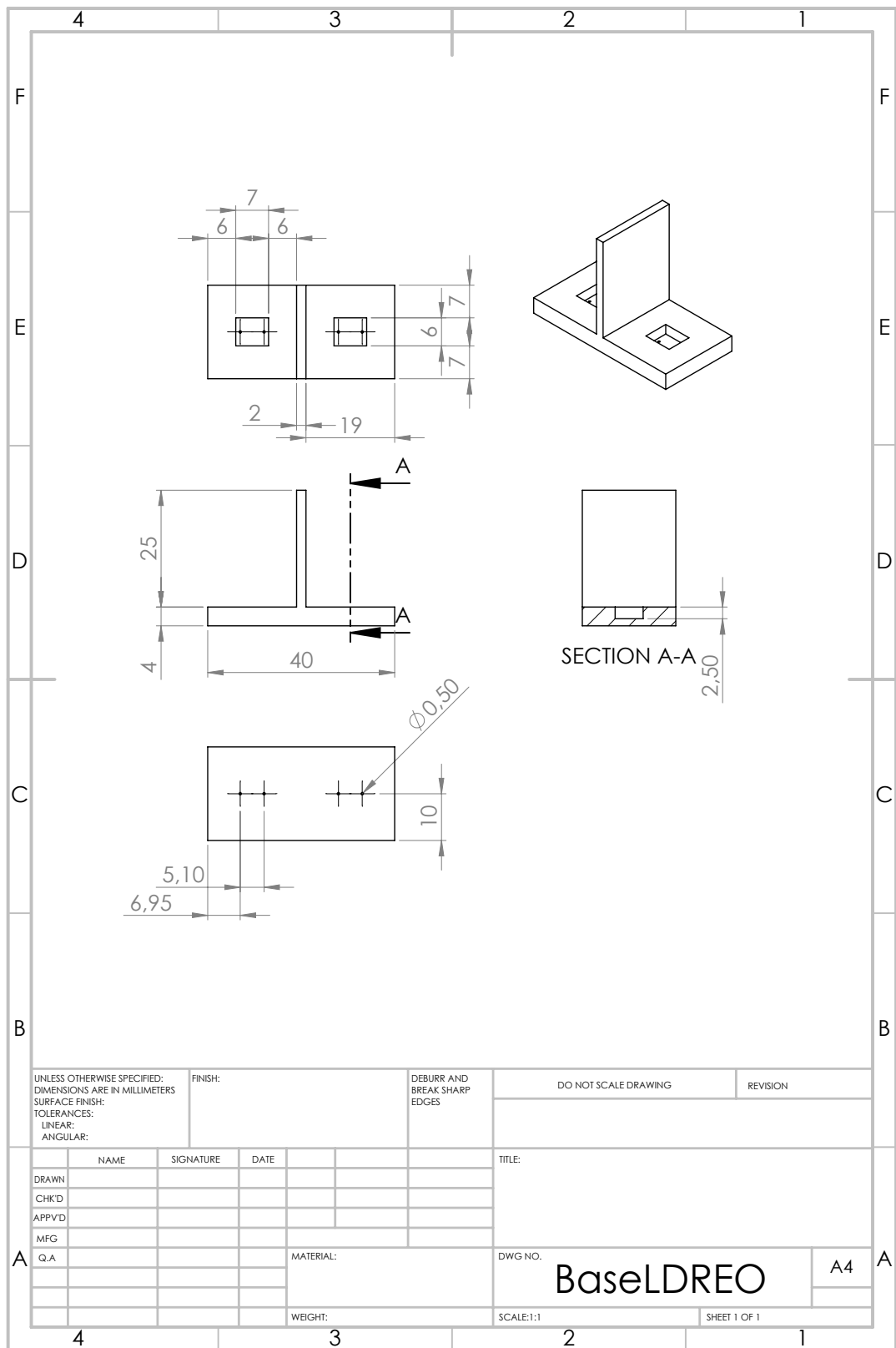


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:				
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A		MATERIAL:		DWG NO.		FimCursoZenF		A4	
		WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1			

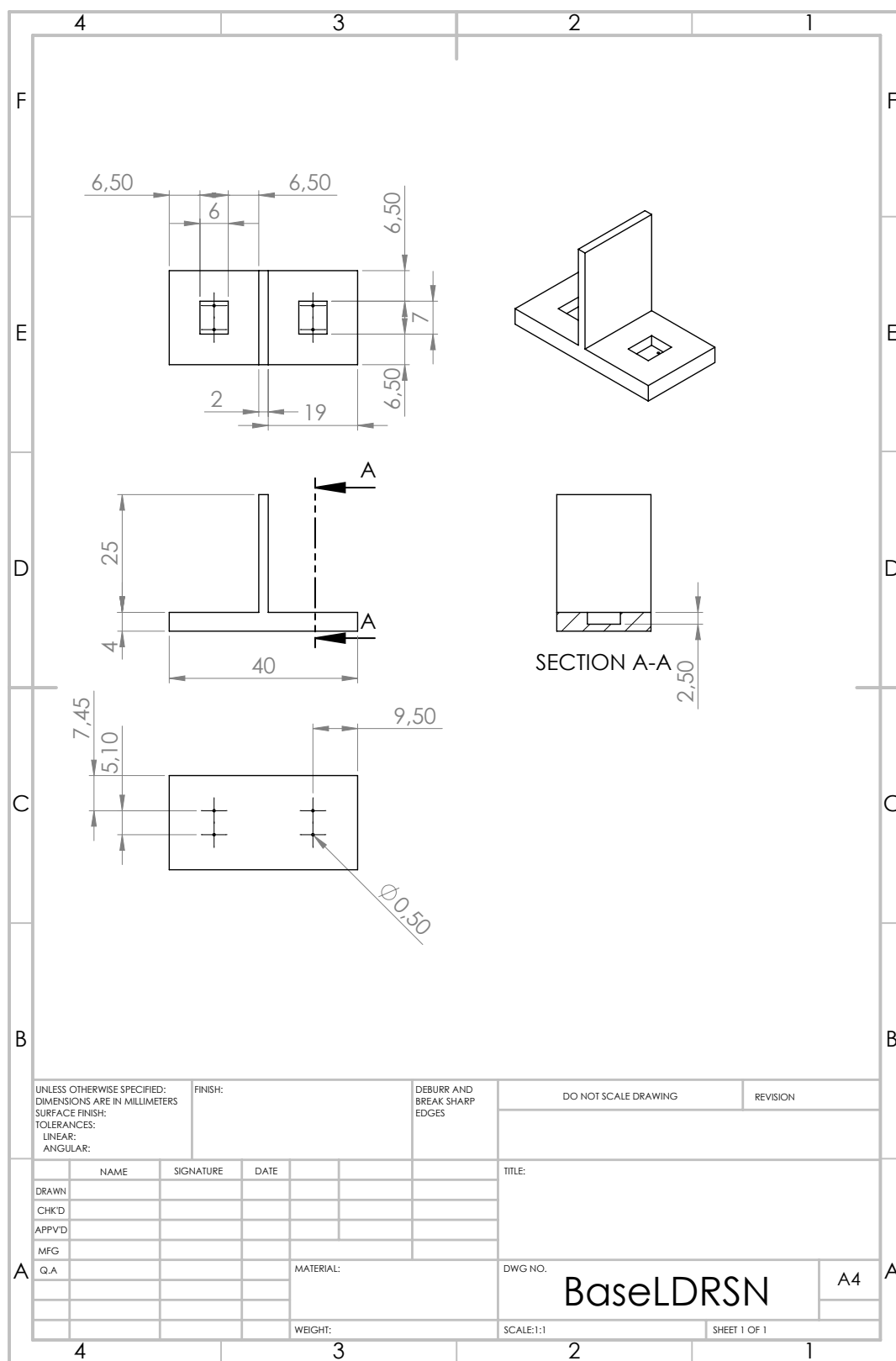
Apêndice E - Veio para movimento da base superior.



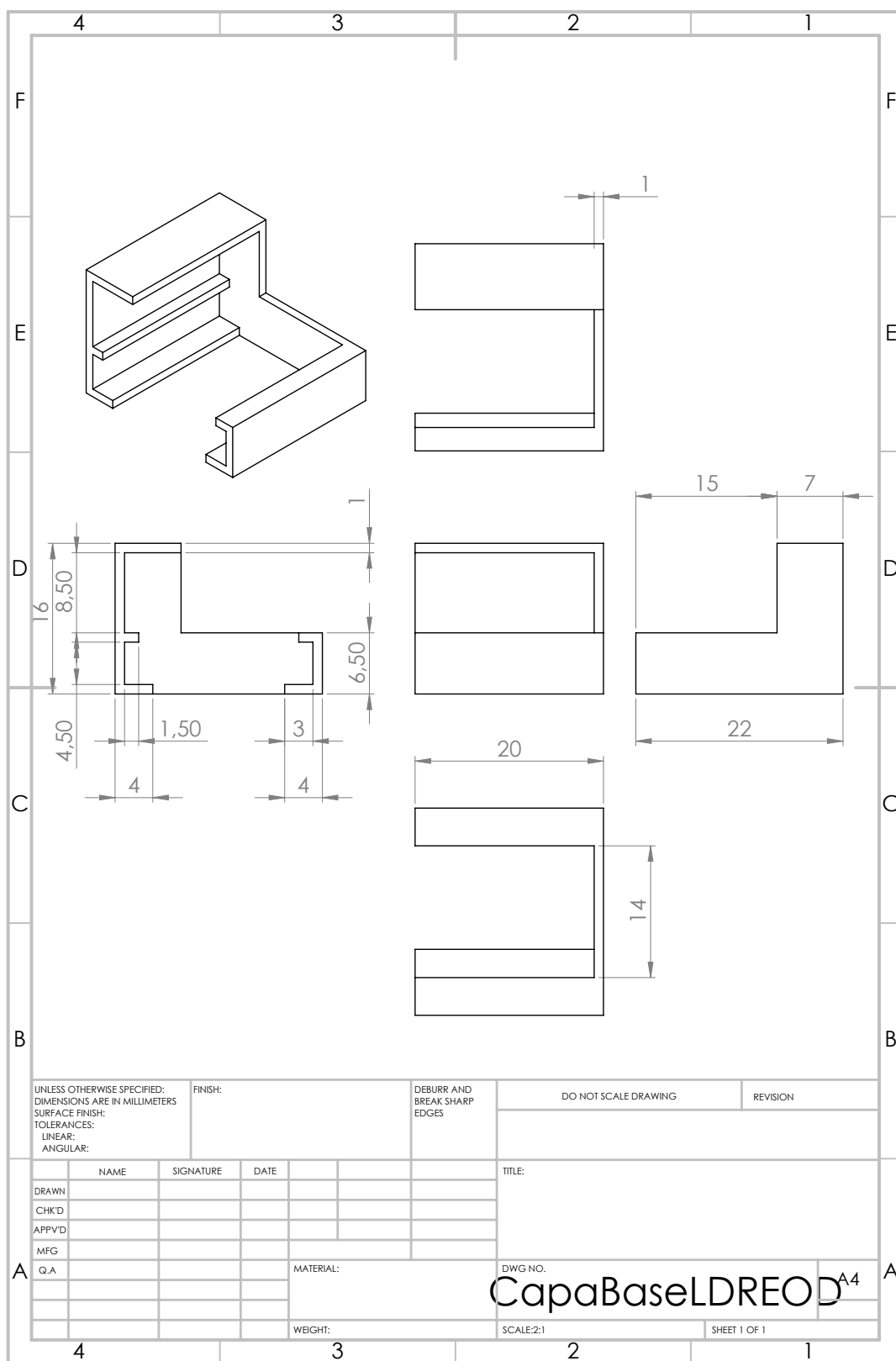
Apêndice F - Suporte para os LDR em Azimute.



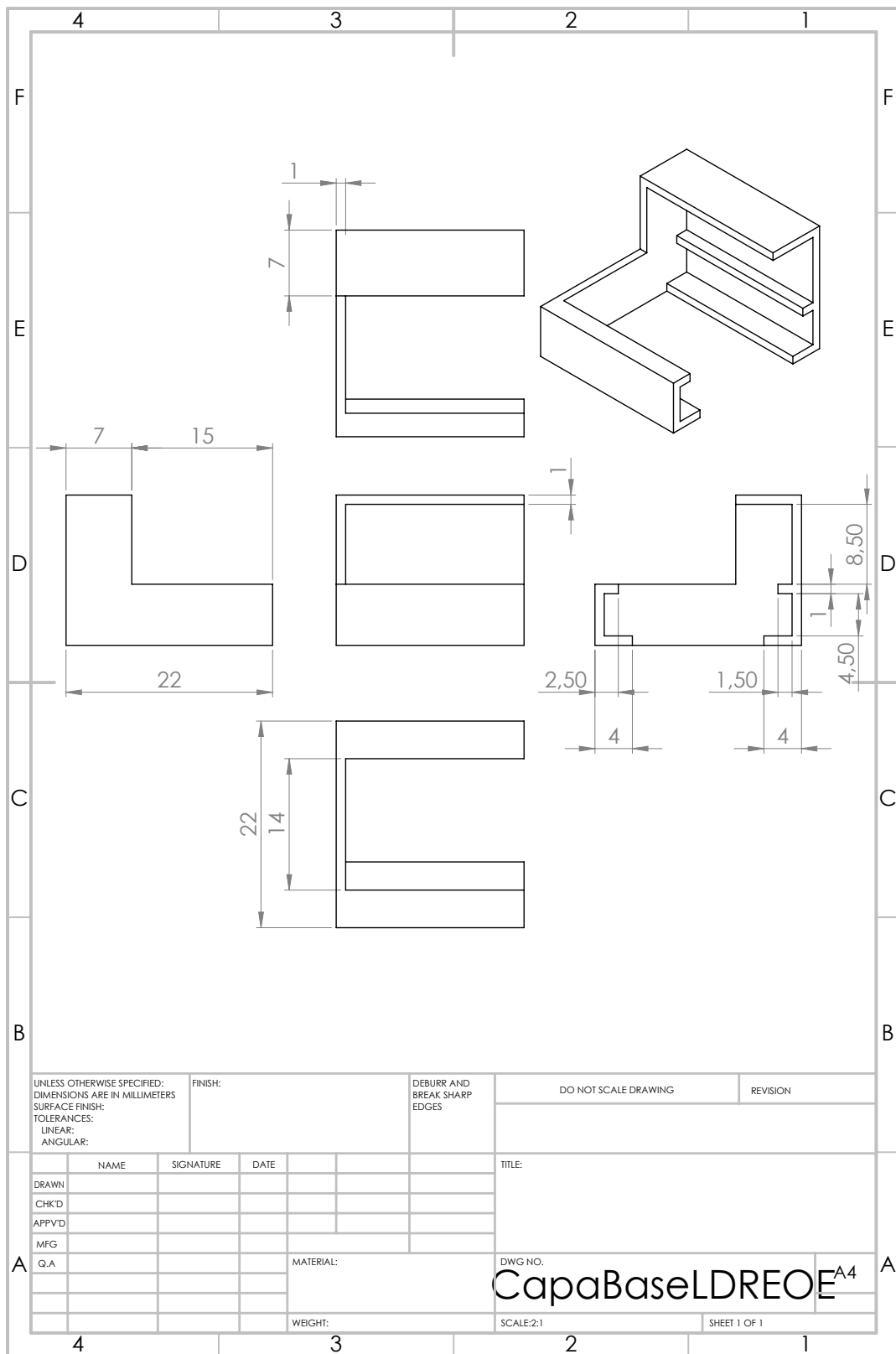
Apêndice G - Suporte para os LDR em Zênite.



Apêndice H - Limitador de campo de luz incidente.



Apêndice I - Limitador de campo de luz incidente.



Apêndice K - Termos Periódicos do Planeta Terra

Termo	Número da Linha	A	B	C
L0	0	175347046	0	0
	1	3341656	4.6692568	6283.07585
	2	34894	4.6261	12566.1517
	3	3497	2.7441	5753.3849
	4	3418	2.8289	3.5231
	5	3136	3.6277	77713.7715
	6	2676	4.4181	7860.4194
	7	2343	6.1352	3930.2097
	8	1324	0.7425	11506.7698
	9	1273	2.0371	529.691
	10	1199	1.1096	1577.3435
	11	990	5.233	5884.927
	12	902	2.045	26.298
	13	857	3.508	398.149
	14	780	1.179	5223.694
	15	753	2.533	5507.553
	16	505	4.583	18849.228
	17	492	4.205	775.523
	18	357	2.92	0.067
	19	317	5.849	11790.629
	20	284	1.899	796.298
	21	271	0.315	10977.079
	22	243	0.345	5486.778
	23	206	4.806	2544.314
	24	205	1.869	5573.143
	25	202	2.458	6069.777
	26	156	0.833	213.299
	27	132	3.411	2942.463
	28	126	1.083	20.775
	29	115	0.645	0.98
	30	103	0.636	4694.003
	31	102	0.976	15720.839
	32	102	4.267	7.114
	33	99	6.21	2146.17
	34	98	0.68	155.42
	35	86	5.98	161000.69
	36	85	1.3	6275.96
	37	85	3.67	71430.7
	38	80	1.81	17260.15
	39	79	3.04	12036.46
	40	75	1.76	5088.63

Continuação na página seguinte.

Continuação da página anterior.

Termo	Número da Linha	A	B	C
	41	74	3.5	3154.69
	42	74	4.68	801.82
	43	70	0.83	9437.76
	44	62	3.98	8827.39
	45	61	1.82	7084.9
	46	57	2.78	6286.6
	47	56	4.39	14143.5
	48	56	3.47	6279.55
	49	52	0.19	12139.55
	50	52	1.33	1748.02
	51	51	0.28	5856.48
	52	49	0.49	1194.45
	53	41	5.37	8429.24
	54	41	2.4	19651.05
	55	39	6.17	10447.39
	56	37	6.04	10213.29
	57	37	2.57	1059.38
	58	36	1.71	2352.87
	59	36	1.78	6812.77
	60	33	0.59	17789.85
	61	30	0.44	83996.85
	62	30	2.74	1349.87
	63	25	3.16	4690.48
L1	0	628331966747	0	0
	1	206059	2.678235	6283.07585
	2	4303	2.6351	12566.1517
	3	425	1.59	3.523
	4	119	5.796	26.298
	5	109	2.966	1577.344
	6	93	2.59	18849.23
	7	72	1.14	529.69
	8	68	1.87	398.15
	9	67	4.41	5507.55
	10	59	2.89	5223.69
	11	56	2.17	155.42
	12	45	0.4	796.3
	13	36	0.47	775.52
	14	29	2.65	7.11
	15	21	5.34	0.98
	16	19	1.85	5486.78
	17	19	4.97	213.3
	18	17	2.99	6275.96
	19	16	0.03	2544.31

Continuação na página seguinte.

Continuação da página anterior.

Termo	Número da Linha	A	B	C
	20	16	1.43	2146.17
	21	15	1.21	10977.08
	22	12	2.83	1748.02
	23	12	3.26	5088.63
	24	12	5.27	1194.45
	25	12	2.08	4694
	26	11	0.77	553.57
	27	10	1.3	6286.6
	28	10	4.24	1349.87
	29	9	2.7	242.73
	30	9	5.64	951.72
	31	8	5.3	2352.87
	32	6	2.65	9437.76
	33	6	4.67	4690.48
L2	0	52919	0	0
	1	8720	1.0721	6283.0758
	2	309	0.867	12566.152
	3	27	0.05	3.52
	4	16	5.19	26.3
	5	16	3.68	155.42
	6	10	0.76	18849.23
	7	9	2.06	77713.77
	8	7	0.83	775.52
	9	5	4.66	1577.34
	10	4	1.03	7.11
	11	4	3.44	5573.14
	12	3	5.14	796.3
	13	3	6.05	5507.55
	14	3	1.19	242.73
	15	3	6.12	529.69
	16	3	0.31	398.15
	17	3	2.28	553.57
	18	2	4.38	5223.69
	19	2	3.75	0.98
L3	0	289	5.844	6283.076
	1	35	0	0
	2	17	5.49	12566.15
	3	3	5.2	155.42
	4	1	4.72	3.52
	5	1	5.3	18849.23
	6	1	5.97	242.73
L4	0	114	3.142	0
	1	8	4.13	6283.08

Continuação na página seguinte.

Continuação da página anterior.

Termo	Número da Linha	A	B	C
	2	1	3.84	12566.15
L5	0	1	3.14	0
B0	0	280	3.199	84334.662
	1	102	5.422	5507.553
	2	80	3.88	5223.69
	3	44	3.7	2352.87
	4	32	4	1577.34
B1	0	9	3.9	5507.55
	1	6	1.73	5223.69
R0	0	100013989	0	0
	1	1670700	3.0984635	6283.07585
	2	13956	3.05525	12566.1517
	3	3084	5.1985	77713.7715
	4	1628	1.1739	5753.3849
	5	1576	2.8469	7860.4194
	6	925	5.453	11506.77
	7	542	4.564	3930.21
	8	472	3.661	5884.927
	9	346	0.964	5507.553
	10	329	5.9	5223.694
	11	307	0.299	5573.143
	12	243	4.273	11790.629
	13	212	5.847	1577.344
	14	186	5.022	10977.079
	15	175	3.012	18849.228
	16	110	5.055	5486.778
	17	98	0.89	6069.78
	18	86	5.69	15720.84
	19	86	1.27	161000.69
	20	65	0.27	17260.15
	21	63	0.92	529.69
	22	57	2.01	83996.85
	23	56	5.24	71430.7
	24	49	3.25	2544.31
	25	47	2.58	775.52
	26	45	5.54	9437.76
	27	43	6.01	6275.96
	28	39	5.36	4694
	29	38	2.39	8827.39
	30	37	0.83	19651.05
	31	37	4.9	12139.55
	32	36	1.67	12036.46
	33	35	1.84	2942.46

Continuação na página seguinte.

Continuação da página anterior.

Termo	Número da Linha	A	B	C
	34	33	0.24	7084.9
	35	32	0.18	5088.63
	36	32	1.78	398.15
	37	28	1.21	6286.6
	38	28	1.9	6279.55
	39	26	4.59	10447.39
R1	0	103019	1.10749	6283.07585
	1	1721	1.0644	12566.1517
	2	702	3.142	0
	3	32	1.02	18849.23
	4	31	2.84	5507.55
	5	25	1.32	5223.69
	6	18	1.42	1577.34
	7	10	5.91	10977.08
	8	9	1.42	6275.96
	9	9	0.27	5486.78
R2	0	4359	5.7846	6283.0758
	1	124	5.579	12566.152
	2	12	3.14	0
	3	9	3.63	77713.77
	4	6	1.87	5573.14
	5	3	5.47	18849.23
R3	0	145	4.273	6283.076
	1	7	3.92	12566.15
R4	0	4	2.56	6283.08

Apêndice L - Termos Periódicos para a Nutação em Longitude e Obliquidade

Coeficientes para Termos Seno					Coeficientes para $\Delta\psi$		Coeficientes para $\Delta\varepsilon$	
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	a	b	c	d
0	0	0	0	1	-171996	-174.2	92025	8.9
-2	0	0	2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1
0	0	0	2	2	-2274	-0.2	977	-0.5
0	0	0	0	2	2062	0.2	-895	0.5
0	1	0	0	0	1426	-3.4	54	-0.1
0	0	1	0	0	712	0.1	-7	
-2	1	0	2	2	-517	1.2	224	-0.6
0	0	0	2	1	-386	-0.4	200	
0	0	1	2	2	-301		129	-0.1
-2	-1	0	2	2	217	-0.5	-95	0.3
-2	0	1	0	0	-158			
-2	0	0	2	1	129	0.1	-70	
0	0	-1	2	2	123		-53	
2	0	0	0	0	63			
0	0	1	0	1	63	0.1	-33	
2	0	-1	2	2	-59		26	
0	0	-1	0	1	-58	-0.1	32	
0	0	1	2	1	-51	27		
-2	0	2	0	0	48			
0	0	-2	2	1	46		-24	
2	0	0	2	2	-38		16	
0	0	2	2	2	-31		13	
0	0	2	0	0	29			
-2	0	1	2	2	29		-12	
0	0	0	2	0	26			
-2	0	0	2	0	-22			
0	0	-1	2	1	21		-10	
0	2	0	0	0	17	-0.1		
2	0	-1	0	1	16		-8	
-2	2	0	2	2	-16	0.1	7	
0	1	0	0	1	-15		9	
-2	0	1	0	1	-13		7	
0	-1	0	0	1	-12		6	
0	0	2	-2	0	11			
2	0	-1	2	1	-10		5	
2	0	1	2	2	-8		3	
0	1	0	2	2	7		-3	
-2	1	1	0	0	-7			

Continuação na página seguinte.

Continuação da página anterior.

Coeficientes para Termos Seno					Coeficientes para $\Delta\psi$		Coeficientes para $\Delta\varepsilon$	
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	a	b	a	b
0	-1	0	2	2	-7		3	
2	0	0	2	1	-7		3	
2	0	1	0	0	6			
-2	0	2	2	2	6		-3	
-2	0	1	2	1	6		-3	
2	0	-2	0	1	-6		3	
2	0	0	0	1	-6		3	
0	-1	1	0	0	5			
-2	-1	0	2	1	-5		3	
-2	0	0	0	1	-5		3	
0	0	2	2	1	-5		3	
-2	0	2	0	1	4			
-2	1	0	2	1	4			
0	0	1	-2	0	4			
-1	0	1	0	0	-4			
-2	1	0	0	0	-4			
1	0	0	0	0	-4			
0	0	1	2	0	3			
0	0	-2	2	2	-3			
-1	-1	1	0	0	-3			
0	1	1	0	0	-3			
0	-1	1	2	2	-3			
2	-1	-1	2	2	-3			
0	0	3	2	2	-3			
2	-1	0	2	2	-3			