

## **Desenvolvimento de um sistema de acompanhamento estelar automatizado com alinhamento polar assistido para astrofotografia amadora.**

### **Development of an automated star tracker system with assisted polar alignment for amateur astrophotography.**

### **Desenvolvimento de un rastreador estelar automatizado con alineación polar asistida para astrofotografia amadora.**

Gabriel Zacheo Costa<sup>1</sup>  
Cristhiano da Costa Herrera<sup>2</sup>

**Resumo:** Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado de acompanhamento estelar e um sistema auxiliar para realizar o alinhamento polar, utilizando sensores (bússola e acelerômetro), algoritmos de controle e o microcontrolador Arduino Uno. O objetivo deste projeto é aumentar a precisão do alinhamento polar de telescópios e um controle preciso da frequência de correção do eixo RA do telescópio, permitindo a captura de fotografias de longa exposição com redução de anomalias decorrentes do movimento aparente das estrelas. O sistema foi testado em condições reais e demonstrou bons resultados, possibilitando a obtenção de fotografias nítidas em exposições de até 20 segundos.

**Palavras-chave:** Astrofotografia. Alinhamento Polar. Rastreamento Estrelar.

**Abstract:** This article presents the development of an automated star tracking system and an auxiliary system to carry out the polar alignment, using sensors (bussole and accelerometer), control algorithms and the Arduino Uno microcontroller. The objective of this project is to increase the precision of the polar alignment of telescopes and a precise control of the speed of correction of the RA axis from telescope, allowing the capture of long-exposure photographs with the reduction of anomalies related to the apparent movement of stars. The system was tested in real conditions and demonstrated good results, making it possible to obtain clear photographs in exposures of up to 20 seconds.

**Keywords:** Astrophotography. Polar Alignment. Star Tracking.

**Resumen:** Este artículo presenta el desarrollo de un sistema automatizado de seguimiento estelar y un sistema auxiliar para realizar el alineamiento polar, utilizando sensores (bussola y acelerómetro), algoritmos de control y el microcontrolador Arduino Uno. El objetivo de este proyecto es aumentar la precisión de la alineación polar del telescopio y controlar la frecuencia de corrección del eixo RA del telescopio, lo que permite capturar fotografías de larga exposición con reducción de anomalías del movimiento aparente de las estrellas. El sistema ha sido probado en condiciones reales y demostrado buenos resultados, pudiendo obtener fotografías nítidas en exposiciones de después de 20 segundos.

**Palabras-clave:** Astrofotografía. Alineación polar. Rastreo de estrellas.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

<sup>1</sup> Graduando em Bacharelado em Engenharia Mecânica. IFSP. ORCID: 0009-0007-0461-8069. E-mail: gabriel.zacheo@aluno.ifsp.edu.br

<sup>2</sup> Doutor. USP. ORCID: 0000-0002-9918-2988. E-mail: cristhiano@ifsp.edu.br

## Considerações iniciais

O interesse pela astrofotografia tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionado pela ampla disseminação de conteúdos sobre o tema nas mídias sociais e pela crescente acessibilidade a equipamentos tecnológicos. Atualmente, é possível obter astrofotografias de qualidade semiprofissional utilizando telescópios de boa qualidade combinados com smartphones intermediários, o que democratiza o acesso a essa prática que antes era restrita a equipamentos mais caros e especializados.

Apesar desses avanços citados, ainda existem barreiras que desestimulam o uso dos telescópios para astrofotografia. Dois dos principais desafios são o alinhamento polar e o rastreamento estelar. O alinhamento polar consiste em ajustar o eixo de rotação do telescópio, ou eixo de ascensão reta (RA, do inglês *right ascension*), para que esteja alinhado ao Sul celeste, garantindo que ao ser acionado, este eixo siga o mesmo sentido da movimentação da rotação da Terra. Já o acompanhamento estelar nada mais é que aplicar uma frequência de rotação ao eixo para compensar o movimento aparente das estrelas causado pela rotação da terra.

Esses processos quando feitos manualmente podem exigir conhecimentos específicos e equipamentos adicionais, o que acaba despendendo tempo e investimentos que muitas vezes afastam o interesse de iniciantes na astrofotografia.

Neste cenário surge a necessidade de desenvolvimento de um sistema automatizado para simplificar os processos, tornando-os mais acessíveis e menos dependentes de conhecimentos e habilidades específicas. Este artigo propõe uma solução baseada em tecnologias de baixo-custo, visando tornar mais acessível a astrofotografia, ampliando seu alcance entre entusiastas e astrônomos amadores.

## Fundamentação Teórica

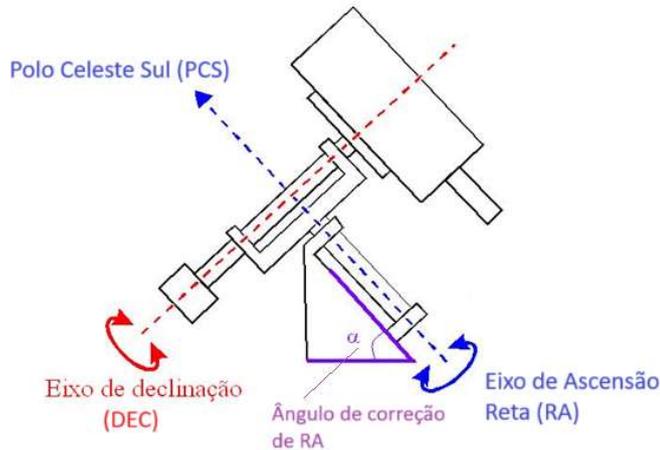
A complexidade do processo de astrofotografia requer uma compreensão de diversos conceitos técnicos, sendo o alinhamento polar e o rastreamento estelar dois dos mais críticos para a obtenção de imagens nítidas e precisas. Estes dois elementos, além de essenciais para a astrofotografia, são também fundamentais para qualquer tipo de observação astronômica que exija precisão em longas exposições.

Segundo Robinson (2024), a astrofotografia, especialmente com telescópios, envolve capturar imagens de objetos celestes distantes, objetos estes, que podem exigir longos tempos de exposição para captar a maior quantidade possível de luz. Qualquer erro no alinhamento ou no rastreamento pode resultar em imagens borradas ou distorcidas, o que comprometeria a qualidade dos dados obtidos.

Segundo Ortiz (2011), podemos definir o alinhamento polar como o ajuste do equipamento aos Polos Celestes Norte (PCN) no hemisfério Norte e Sul (PCS) no hemisfério Sul. No hemisfério Norte, o alinhamento polar geralmente é realizado usando a estrela Polar, que está muito próxima do PCN e possui magnitude suficiente para ser vista a olho nu. No hemisfério Sul, existem estrelas que coincidem com o PCS, porém sua magnitude não é alta o bastante para serem vistas a olho nu em locais com alta poluição visual. Portanto, são necessárias etapas adicionais para realizar o alinhamento do telescópio com o PCS.

Segundo Fornaziero (2014), num dos métodos para se realizar o alinhamento polar, inicialmente o telescópio deve ser apontado com uma das pernas voltadas para o Sul geográfico. Isso pode ser feito utilizando uma bússola para identificar o sul magnético e subtraindo o valor da declinação magnética, que pode ser obtida através de ferramentas especializadas como a "Magnetic Declination Estimated Value" do NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica) do governo dos Estados Unidos. Após alinhar uma das pernas do telescópio para o sul geográfico, a montagem deve ser nivelada (utilizando nível bolha, ou similar) e o ângulo de correção ( $\alpha$ ) ajustado para a latitude do local onde o telescópio está instalado, conforme detalhado na Figura 1. Com isso, o telescópio estará alinhado ao PCS. Também podem ser utilizados métodos mais precisos com a utilização de motores e softwares especializados.

Figura 1 – Eixos do telescópio equatorial



Fonte: Adaptado de Laurindo Sobrinho, 2011

O acompanhamento estelar pode ser definido como a correção da frequência de rotação da Terra, que permite com que o telescópio siga os corpos celestes com a mesma frequência angular da Terra, mantendo os objetos no campo de visão do observador durante a exposição. Esse processo é fundamental para astrofotografia, já que a rotação da Terra faz com que os objetos celestes pareçam se mover através do céu. Sem o acompanhamento estelar adequado, os objetos capturados em longas exposições ficariam borrados devido a esse movimento.

De acordo com o Observatório Phoenix (2003), para realizar a correção da velocidade de rotação da Terra, o Eixo RA deve rotacionar na mesma velocidade de rotação de um dia sideral terrestre, ou aproximadamente  $15,06^\circ$  por hora. Para atingir essa baixa rotação, são utilizadas reduções de engrenagens pelos fabricantes. Para utilização de motores, é interessante que tenham redução integrada, ou que possuam uma quantidade suficiente de passos e sejam compatíveis com microstepping (divisão de cada passo do motor em passos menores). O microstepping permite maior suavidade no movimento e maior precisão, o que é essencial para garantir que o telescópio se mova com exatidão para seguir o movimento dos corpos celestes, minimizando desvios que poderiam comprometer as imagens.

Com o alinhamento polar e o acompanhamento estelar devidamente configurados, é possível realizar observações e capturas de imagens com alta precisão, essenciais para estudos astronômicos e astrofotografia de longa exposição.

## Metodologia

Para a realização do projeto, foi utilizado um telescópio equatorial Uranum Andrômeda-1, com 130 mm de abertura, ao qual foram integrados os sistemas de automatização desenvolvidos.

O projeto é composto por quatro circuitos principais: o circuito de controle, o circuito de nível (MPU-6050), o circuito de bússola digital (QMC5883L) e o circuito de acionamento do motor. Esses circuitos formam dois sistemas integrados: o sistema auxiliar de alinhamento polar e o sistema de acompanhamento estelar, ambos controlados por um microcontrolador Arduino Uno.

O circuito de controle é composto por uma tela LCD com comunicação I2C (16 dígitos x 2 linhas) e quatro módulos de botões tipo switch. Esse circuito é responsável por exibir os valores dos sensores na tela e permitir a seleção de valores e o ajuste de parâmetros do sistema. A conexão com o Arduino é realizada por meio de um cabo manga de 8 vias, com bitola 26 AWG. As ligações do circuito estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ligações do circuito de controle

<b>Módulo – Saída</b>	<b>Módulo - Entrada</b>
Tela – GND	Arduino – GND
Tela – VCC	Arduino – 5V
Tela – SDA	Arduino – A4
Tela – SCL	Arduino – A5
Botões – GND	Arduino – GND
Botões – VCC	Arduino – 5V
Botão Cima – Digital	Arduino - 5
Botão Baixo – Digital	Arduino - 6
Botão Voltar – Digital	Arduino - 7
Botão OK – Digital	Arduino - 8

Fonte: Próprio autor, 2024

O circuito da bússola digital é composto pelo módulo QMC5883L, selecionado por sua precisão de desvio de, no máximo, 1° a 2°, conforme especificado pelo fabricante QST (2016), além de ser compatível com a interface I2C, que facilita a comunicação com o Arduino e reduz o número de portas necessárias. A bússola digital permite medir a intensidade do campo magnético nos três eixos (X, Y e Z); no entanto, neste projeto, serão utilizadas apenas as medições nos eixos X e Y para determinar o Sul magnético e, a partir disso, encontrar o Sul geográfico. O módulo é conectado a um conector USB-A, o que facilita a comunicação em distâncias maiores, como da base do telescópio até o Arduino Uno, e permite o giro do componente para a calibração. As conexões do circuito estão detalhadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Ligações do circuito de bussola digital

<b>Módulo – Saída</b>	<b>Módulo - Entrada</b>
QMC5883L – GND	USB Entrada – GND
QMC5883L – VCC	USB Entrada – VCC
QMC5883L – SDA	USB Entrada – D-
QMC5883L – SCL	USB Entrada – D+
USB Saída – GND	Arduino – GND
USB Saída – VCC	Arduino – 3.3V
USB Saída – D-	Arduino – A4
USB Saída – D+	Arduino – A5

Fonte: Próprio autor, 2024

O circuito de nível, que utiliza o módulo MPU6050, foi escolhido para medir o alinhamento do telescópio em relação ao solo. Esse módulo integra um acelerômetro e um giroscópio de 3 eixos, com comunicação via interface I2C, possibilitando uma análise precisa da inclinação nos eixos horizontal e vertical, o que permite o desenvolvimento de um 'nível' de alta precisão. Assim como a bússola, o módulo é conectado a um conector USB-A. As conexões do circuito estão detalhadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Ligações do circuito de nível

<b>Módulo – Saída</b>	<b>Módulo - Entrada</b>
MPU6050 – GND	USB Entrada – GND
MPU6050 – VCC	USB Entrada – VCC
MPU6050 – SDA	USB Entrada – D-
MPU6050 – SCL	USB Entrada – D+
USB Saída – GND	Arduino – GND
USB Saída – VCC	Arduino – 3.3V
USB Saída – D-	Arduino – A4
USB Saída – D+	Arduino – A5

Fonte: Próprio autor, 2024

O circuito de acionamento do motor de passo utiliza o driver DRV8825, configurado para operar no modo *microstepping* com uma relação de 1/32, com as saídas MS1, MS2 e MS3 conectadas ao mesmo ponto. Isso permite que, para cada passo completo do motor, o driver divida o movimento em 32 passos menores, resultando em maior suavidade e precisão no controle. Dessa forma, ao utilizar um motor de passo com 200 passos por volta (1,8° por passo), o número efetivo de passos por volta é multiplicado por 32, totalizando 6400 passos. As conexões do circuito estão detalhadas na Tabela 4:

Tabela 4 – Ligações do circuito de acionamento do motor de passo

<b>Módulo – Saída</b>	<b>Módulo - Entrada</b>
DRV8825 – MS1, MS2, MS3	Arduino – 2
DRV8825 – RES, SLP	Arduino – 5V
DRV8825 – STP	Arduino – 3
DRV8825 – DIR	Arduino – 4
DRV8825 – VMT	Fonte 12V – +
DRV8825 – GND (abaixo do VMT)	Fonte 12V – -

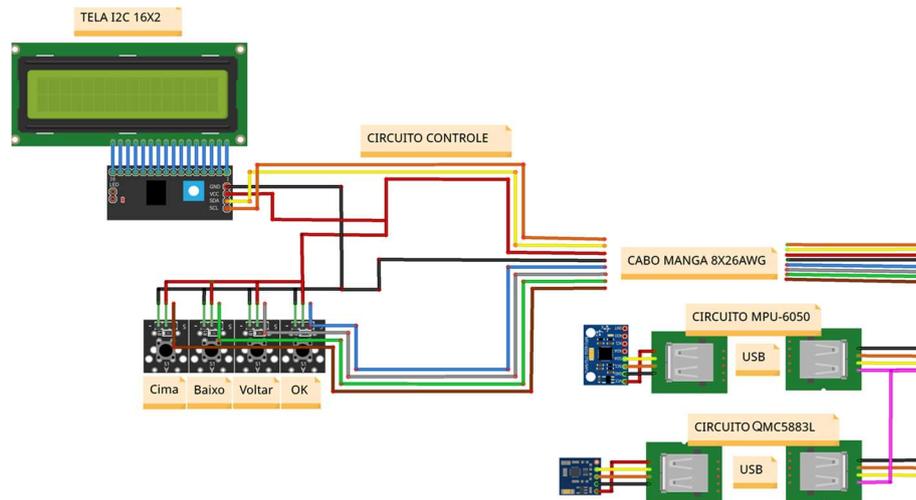
DRV8825 – 2B, 2A, 1A, 1B	Motor de Passo (NEMA 17)
DRV – GND (Abaixo do VDD)	Arduino – GND

Fonte: Próprio autor, 2024

A alimentação do Arduino será fornecida pela mesma fonte utilizada para o motor, com a adição de um controlador de tensão LM2596S DC-DC, configurado para 5V, a fim de proteger o Arduino contra sobrecargas.

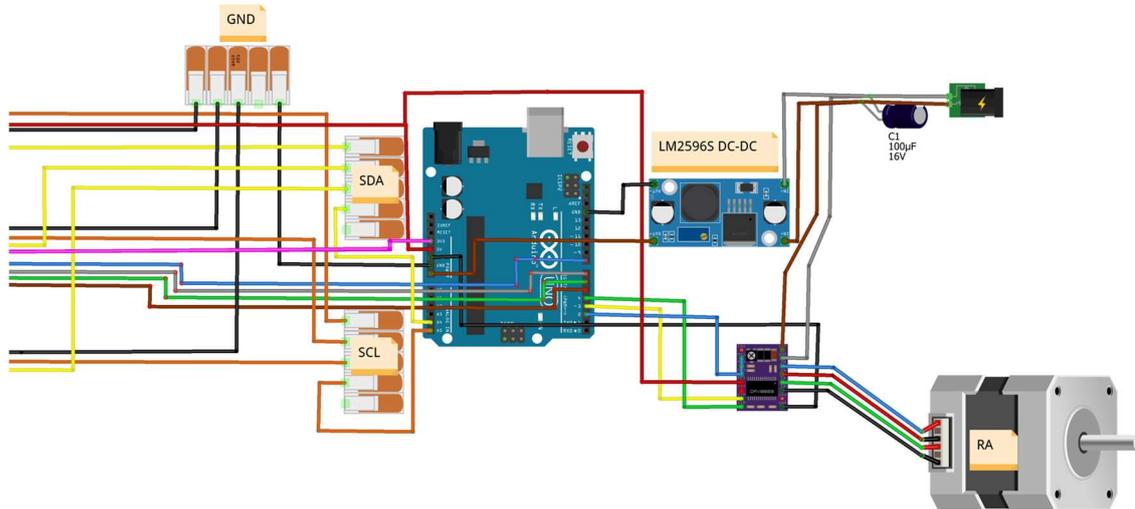
O diagrama de interligação dos sistemas, ficam disponíveis nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Diagrama de interligação dos circuitos de controle, bússola e nível



Fonte: Próprio autor, 2024

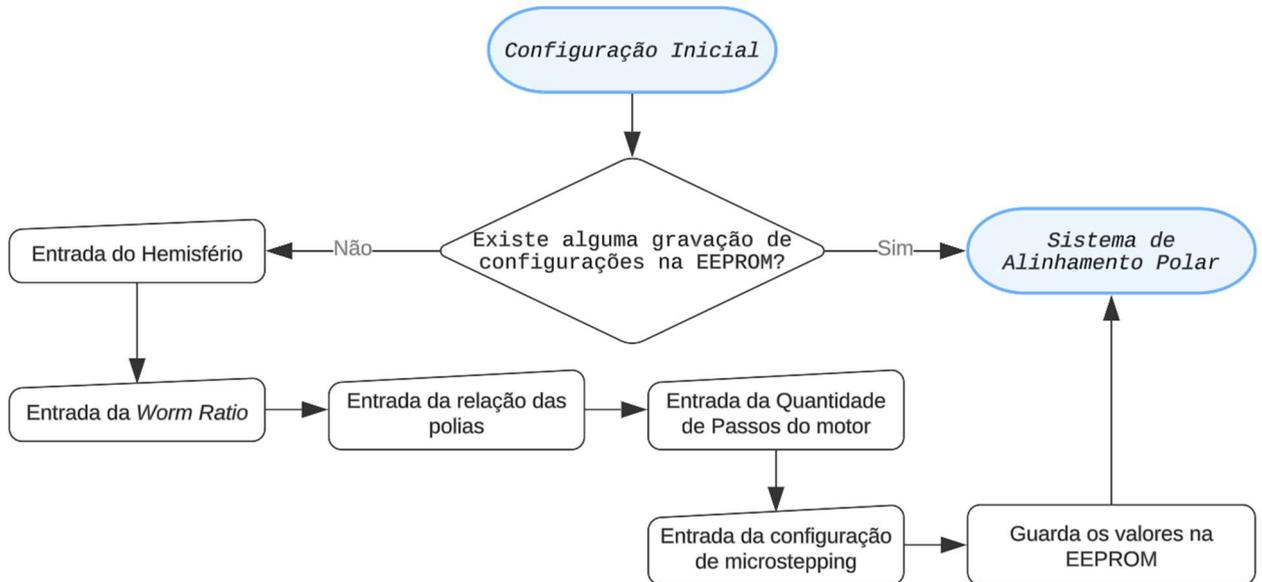
Figura 3 – Diagrama de interligação ao Arduino Uno, e circuito de acompanhamento estelar



Fonte: Próprio autor, 2024

Quando o algoritmo programado no Arduino é iniciado, uma configuração inicial é solicitada ao usuário. Ele deverá inserir o hemisfério (Norte ou Sul), a taxa de *Worm Ratio* (ou relação do parafuso sem fim) do eixo RA do telescópio, a relação das polias nos eixos do motor de passo, a quantidade de passos do motor e a configuração de *microstepping*. Todos esses dados serão armazenados na memória EEPROM, evitando a necessidade de reinscrição dessas informações sempre que o sistema for religado. O algoritmo resumido da programação utilizada para a configuração inicial está ilustrado na Figura 4:

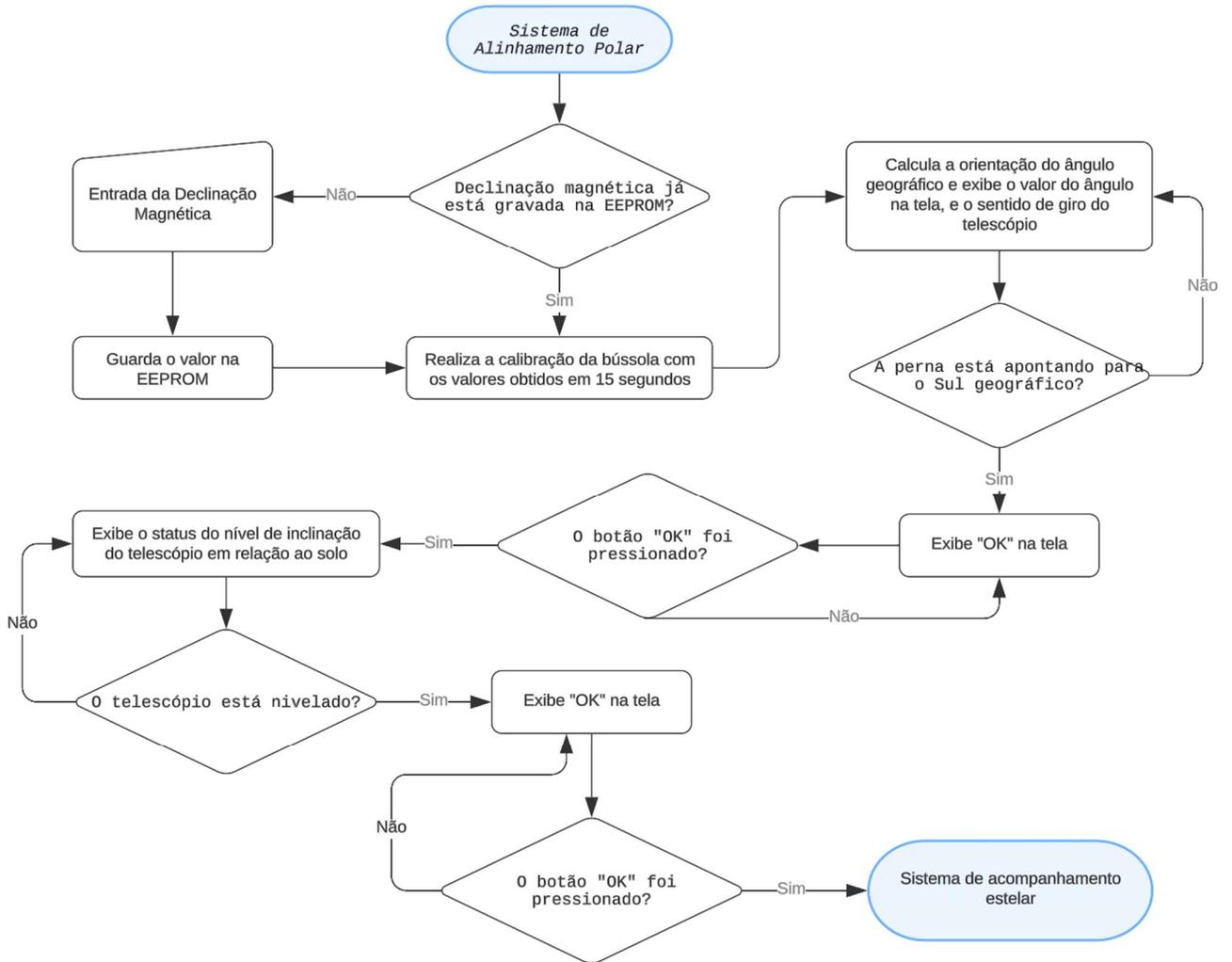
Figura 4 – Fluxograma do algoritmo de configuração inicial



Fonte: Próprio autor, 2024

O sistema de alinhamento polar é composto pelos circuitos de controle, bússola e nível. Inicialmente, o algoritmo solicita o valor da declinação magnética e o armazena na EEPROM. Em seguida, os valores dos ângulos geográficos são calculados e o valor corrigido é exibido na tela, juntamente com a direção em que o telescópio deve ser girado para apontar para o sul geográfico. O algoritmo resumido da programação desse sistema está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do algoritmo do sistema de alinhamento polar



Fonte: Próprio autor, 2024

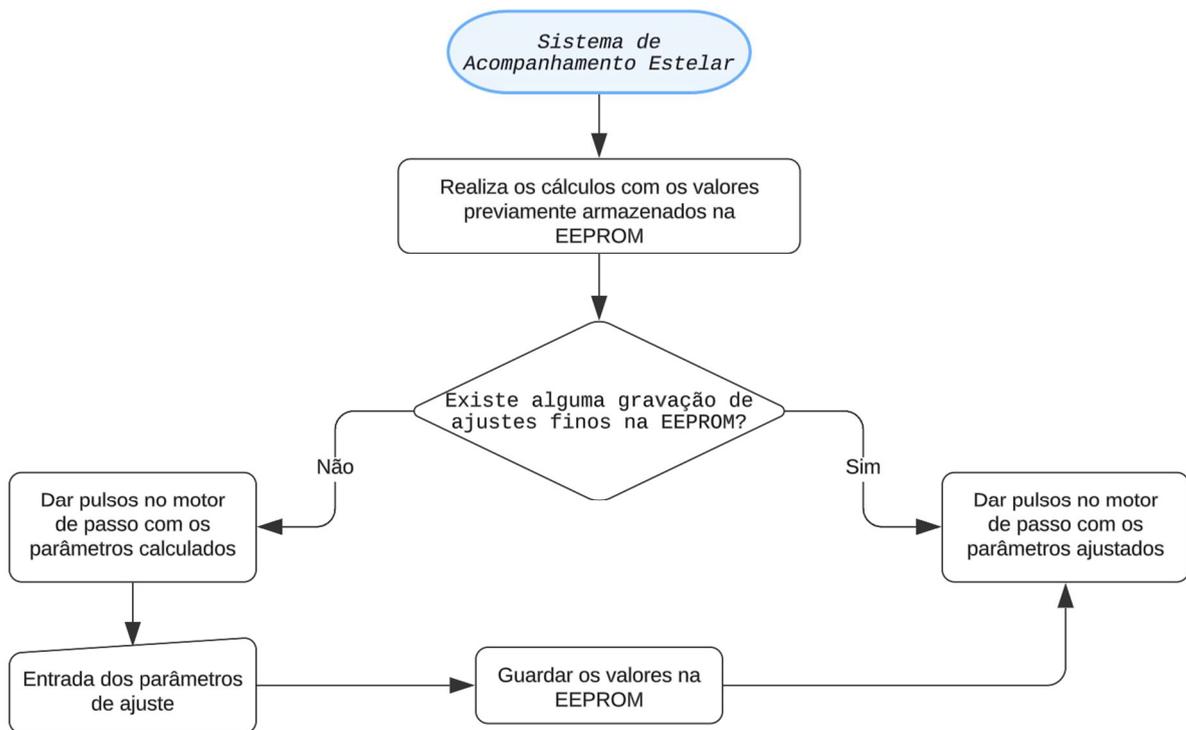
O sistema de acompanhamento estelar é composto pelos circuitos de controle e de acionamento do motor. O algoritmo inicia o movimento do telescópio com a frequência calculada e, a partir dessa frequência, permite ajustes finos para corrigir possíveis desvios. Esses desvios podem ocorrer devido a imprecisões no processo de montagem ou especificações inadequadas no processo de configuração inicial. Os cálculos realizados pelo programa para mover o telescópio a uma frequência compatível com a rotação da Terra estão apresentados nas equações abaixo, baseadas no programa de rastreamento estelar Agotino, desenvolvido pelo programador GSpeed (2020).

$$P_g = \frac{P_m * W_r * P_r}{M} \quad M_s = V_s * P_g * M \quad D_p = \frac{1.000.000}{M_s}$$

Onde:  $P_g$  = Número de passos do motor para rotacionar 1 grau;  $W_r$  = *Worm Ratio*;  $P_r$  = Razão da polia;  $M$  = *Microstepping* do motor (ex. utilizar 32 para 1/32);  $M_s$  = Micro passos por segundo;  $V_s$  = Velocidade sideral [(360/86164) °/s];  $D_p$  = Delay entre micropassos.

O algoritmo foi desenvolvido para realizar um passo a cada intervalo de tempo definido ( $D_p$ ). O fluxo de execução resumido do sistema de acompanhamento estelar é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do algoritmo do sistema de acompanhamento estelar



Fonte: Próprio autor, 2024

Para a montagem do projeto no telescópio, o motor de passo selecionado para o sistema de acompanhamento estelar foi o modelo 17HS4401S, com especificação NEMA 17 e um ângulo de 0,9° por passo (ou 400 passos por volta), visando garantir maior precisão nos movimentos. O primeiro passo na implementação do projeto foi determinar o local mais

adequado para a instalação do motor de passo. O ponto escolhido foi a área acima do mostrador de ângulos da latitude, que oferece espaço suficiente para a conexão da correia ao eixo do motor.

Para a fixação do motor, foi realizada a furação do telescópio para a instalação de um suporte em formato de 'L', projetado especificamente para motores NEMA 17 e facilmente encontrado em lojas de eletrônica. Dois rebites roscados M8 foram inseridos para fixar o suporte ao telescópio, utilizando parafusos e arruelas.

Em cada eixo, foi instalada uma polia GT2, compatível com correias de 10 mm, amplamente utilizadas em impressoras 3D, com o objetivo de aumentar a resolução do sistema. A fixação das polias aos eixos foi realizada através de parafusos allen já integrados na polia, que foram inseridos nos rebaixos dos eixos de entrada e saída, mantendo-as fixas. Na saída do eixo do motor, foi utilizada uma polia de 16 dentes, enquanto na entrada do eixo do telescópio foi instalada uma polia de 40 dentes, resultando em uma relação de transmissão de 1:2,5. Isso significa que são necessários 2,5 passos do motor para completar um passo da rotação do eixo do telescópio.

Para conectar as polias, foi escolhida uma correia GT2 de 300 mm dimensionada de acordo com a equação disposta abaixo, que garante que a correia tenha um tensionamento, capaz de repassar o torque necessário.

$$L = 2C + \pi \frac{(D_1 + D_2)}{2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4C}$$

Onde: L = Comprimento da correia [mm], C = distância de centro entre as polias [mm]; D<sub>1</sub> = diâmetro da polia menor [mm]; D<sub>2</sub> = diâmetro da polia maior [mm].

Na Figura 7, ficam expostos os passos e as montagens que foram realizadas, para inserção do motor de passo, correia e polias.

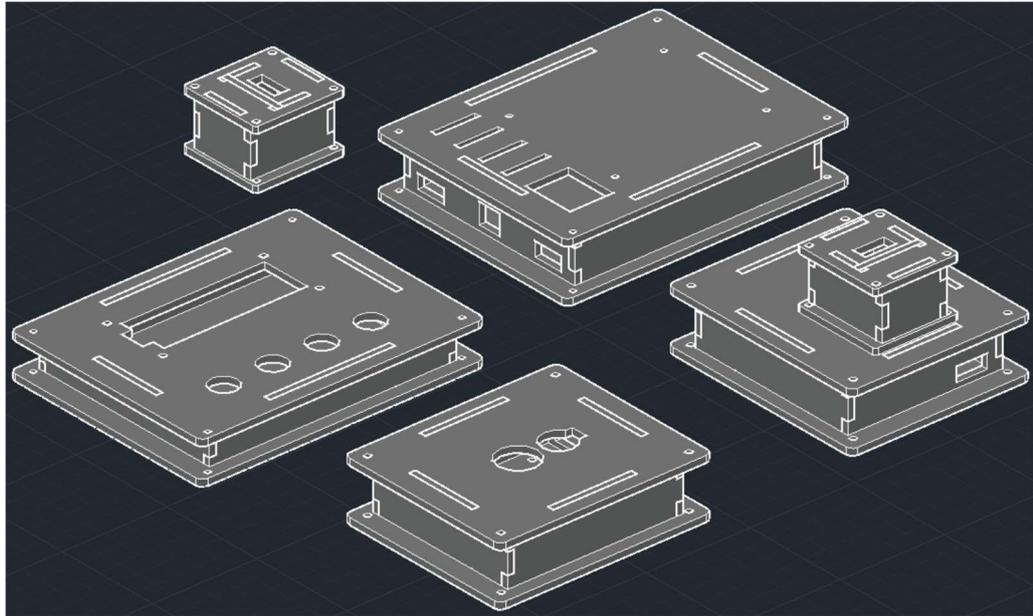
Figura 7 – Montagem com passos de montagem do motor de passo no telescópio



Fonte: Próprio autor, 2024

Para integrar os circuitos ao telescópio, foram projetadas caixas acrílicas utilizando software CAD, com o objetivo de acomodar os componentes eletrônicos com precisão e garantir o posicionamento adequado para um funcionamento eficiente. Algumas montagens realizadas no software AutoCAD para verificar o posicionamento e interferências antes do corte das peças foram incluídas na Figura 8.

Figura 8 – Montagens das caixas acrílicas realizadas no software AutoCAD



Fonte: Próprio autor, 2024

A caixa destinada ao circuito de controle foi projetada no formato de um controle remoto, proporcionando uma interface ergonômica para o usuário. Os botões e a tela foram fixados com parafusos, assegurando estabilidade. Um cabo manga de 1 metro foi utilizado para a comunicação com o Arduino, permitindo manuseio remoto e maior liberdade para ajustes no telescópio durante o alinhamento e operação.

Para os circuitos de nível e bússola, caixas específicas foram desenvolvidas, com compartimentos pré-definidos para os módulos, a fim de evitar danos mecânicos. A comunicação entre esses circuitos e o Arduino é realizada via conexão USB. Na caixa do circuito de nível, foi inserida uma cavidade superior para o encaixe do módulo da bússola, permitindo sua calibração e posicionamento. Esta caixa foi fixada diretamente no telescópio com parafusos, garantindo o alinhamento.

Quanto ao Arduino Uno e ao circuito de acionamento do motor, foi projetada uma caixa acrílica que integra duas portas USB e uma saída P4 para conexão com uma fonte de 12V. Este compartimento organiza e protege o Arduino Uno, o controlador do motor e seus respectivos cabos, oferecendo uma solução prática e eficiente para os componentes eletrônicos. A caixa foi fixada à estrutura do telescópio utilizando Velcro.

Os circuitos alocados nas caixas acrílicas estão ilustrados na Figura 9, enquanto a montagem completa dos sistemas no telescópio pode ser vista na Figura 10.

Figura 9 – Montagem exibindo as caixas de acrílico desenvolvidas para o projeto



Fonte: Próprio autor, 2024

Figura 10 – Montagem dos sistemas no telescópio



Fonte: Próprio autor, 2024

### **Análise dos dados e resultados**

Cada circuito foi testado individualmente e, posteriormente, em conjunto, a fim de validar sua funcionalidade e integração no sistema.

Para validar os valores obtidos pelo módulo QMC5883L, foi realizada uma comparação com os resultados fornecidos pela bússola disponibilizada pelo NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), a qual já considera a correção da declinação magnética. A medição foi feita utilizando um smartphone, com ambos os dispositivos apontados para a mesma direção, utilizando ângulos aleatórios. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação do resultado das medições de ângulo

Bussola QMC5883L	Bussola NOAA	Diferença
55,78° NE	58° NE	2,22°
200,22° S	199° S	1,22°
100,55° E	103° E	2,45°

Fonte: Próprio autor, 2024

Os resultados obtidos estão dentro das especificações fornecidas pelo fabricante do módulo QMC5883L, que indica um desvio esperado de até 1° a 2°. Pequenas discrepâncias nos valores também podem ser atribuídas a possíveis imprecisões no posicionamento manual do smartphone e do módulo durante a medição, uma vez que esse procedimento não possui precisão absoluta.

Para validar os valores fornecidos pelo módulo de nível MPU6050, foi realizada uma comparação visual com um nível de bolha convencional. Os valores exibidos no visor mostraram-se consistentes com os indicados pelo equipamento, o que sugere que os resultados obtidos estão dentro do esperado. Alguns resultados podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 – Comparação entre os valores obtidos no visor do nível e o nível bolha



Fonte: Próprio autor, 2024

Para validar o sistema de acionamento do motor de passo, as configurações iniciais foram preenchidas de acordo com as características geográficas (declinação magnética: 21,50; hemisfério: Sul) e do telescópio (*Worm Ratio*: 144; Relação das polias: 2,50; *microstepping*: 32, passos do motor: 400) e posteriormente foi realizado o alinhamento polar utilizando os módulos de bússola e nível. Em seguida, o telescópio foi apontado para a Nebulosa de Órion a fim de realizar os testes de astrofotografia. Inicialmente, utilizando apenas as frequências de giro calculadas pelo software para o motor de passo, a imagem apresentou rastros de estrelas, conforme mostrado na Figura 12.

Para corrigir o problema, foi necessário realizar um ajuste fino no programa, aumentando ligeiramente a frequência de giro do motor até atingir a configuração ideal. O resultado, com a frequência ajustada, está exibido na Figura 13. Ambas as imagens foram capturadas no smartphone, com 20 segundos de exposição, lente de 32mm acoplado a um filtro que reduz a ação dos raios UV e infravermelho nas fotografias. Exposições maiores que 20 segundos não foram testadas por limitação do smartphone.

Para fins de comparação, foi capturada uma imagem sem o uso do sistema de rastreamento e alinhamento polar. Essa fotografia foi realizada alguns dias após as imagens obtidas com o sistema, utilizando os mesmos parâmetros aplicados nas demais capturas, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 12 – Imagem da Nebulosa de Órion feita com os valores pré-definidos de frequência



Fonte: Próprio autor, 2024

Figura 13 – Imagem da Nebulosa de Órion feita após o ajuste fino na frequência do motor



Fonte: Próprio autor, 2024

Figura 14 – Imagem da Nebulosa de Órion feita sem uso de rastreamento e alinhamento



Fonte: Próprio autor, 2024

Os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que as imagens capturadas apresentaram estrelas pontuais, sem rastros visíveis, o que confirma a eficácia do sistema em exposições de até 20 segundos.

Também para fins de comparação, considerando que este projeto é voltado para acessibilidade e baixo custo ao usuário final, foi elaborada uma tabela detalhando os custos estimados dos materiais utilizados. A Tabela 6 apresenta essa análise, com valores coletados em lojas online na primeira metade de janeiro de 2025. O custo total do projeto foi estimado em aproximadamente R\$ 400,00, já incluindo taxas e impostos de importação aplicáveis no estado de São Paulo, mas desconsiderando o valor do frete.

Tabela 6 – Tabela de custos estimados do projeto (dados obtidos em dezembro de 2024)

Item	Loja	Valor do produto (R\$)	Impostos estimados (Importação) (R\$)
Parafusos M3	Shopee	22,66	N/A
Rebites roscados M8	Shopee	9,93	N/A

Tela I2C 16x2	Aliexpress	11,99	5,44
Kit de polias GT2 e correia 10mmx300mm	Aliexpress	23,79	10,67
Suporte em L para motor de passo	Mercado Livre	9,90	N/A
Arduino UNO (Genérico)	Aliexpress	22,42	10,10
Sensor MPU6050	Aliexpress	9,01	4,10
Sensor QMC5883L	Aliexpress	11,50	5,25
Placa de acrílico 30x40	Mercado Livre	39,90	N/A
Cabo 0,30mm <sup>2</sup> (5m)	Saravati	4,90	N/A
Cabo Manga 8 vias 26AWG (5m)	Shopee	27,95	N/A
Motor de passo 17HS4401, 0,9°	Aliexpress	65,79	30,09
Botões Switch (4 unidades)	Aliexpress	11,11	4,99
Driver DRV8825	Saravati	14,33	N/A
Fonte 12V – 5A	Mercado Livre	19,99	N/A
Placas USB-A (5 unidades)	Mercado Livre	11,30	N/A
Entrada P4	Mercado Livre	1,65	N/A
Regulador de Tensão LM2596 DC/DC	Saravati	14,33	N/A
	Total:	R\$ 332,45	R\$ 70,64

Fonte: Próprio autor, 2024

Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa dos custos de sistemas similares disponíveis no mercado. Nesse contexto, destaca-se o motor de passo com redução integrada de 228:1, desenvolvido pela Celestron especificamente para observação astronômica. Este dispositivo comercial se apresenta como a solução mais próxima da proposta deste projeto.

Este equipamento é alimentado por uma bateria de 9V, é acoplado diretamente ao eixo de ascensão reta do telescópio e oferece exclusivamente a funcionalidade de acompanhamento

estelar. Em sua loja oficial, o motor é comercializado por R\$ 789,00, mas pode ser encontrado em marketplaces, como o Aliexpress, por aproximadamente R\$ 250,00. Acrescentando R\$ 108,00 em impostos de importação (aplicáveis no estado de São Paulo), o custo total estimado é de R\$ 358,00.

Apesar de sua maior acessibilidade quando adquirido em marketplaces, o motor apresenta limitações consideráveis. Sua funcionalidade é restrita ao acompanhamento estelar, sem oferecer recursos avançados como o alinhamento polar assistido, essenciais para observações mais complexas. O controle de velocidade é feito por meio de um potenciômetro mecânico, o que reduz a precisão do movimento. Além disso, a operação com uma bateria de 9V compromete a autonomia durante sessões prolongadas. A sensibilidade do sistema à queda de tensão da bateria resulta em variações na velocidade do motor, gerando inconsistências no movimento e prejudicando a precisão do rastreamento.

### Considerações finais

Este projeto apresentou uma solução prática para o desenvolvimento de um rastreador estelar automatizado com alinhamento polar assistido, voltado para astrofotografia amadora. A integração dos sistemas de controle, alinhamento polar e acompanhamento estelar foi eficaz, permitindo movimentos precisos do telescópio com o uso de componentes acessíveis e tecnologias comprovadas. A escolha de um motor de passo NEMA 17, junto com o sistema de *microstepping* e as polias GT2, garantiu maior precisão no movimento, enquanto o uso de sensores de bússola e nível contribuiu para um alinhamento mais eficiente. A montagem dos circuitos em caixas acrílicas proporcionou boa organização e proteção adequadas aos componentes eletrônicos.

O algoritmo desenvolvido para o sistema de alinhamento e rastreamento estelar mostrou-se funcional, permitindo ajustes precisos no acompanhamento de corpos celestes. Esse sistema oferece uma alternativa viável para melhorar a precisão na observação astronômica em ambientes amadores, com um custo relativamente baixo quando comparamos a equipamentos similares de mercado levando em conta os itens e acessórios integrados, implementação relativamente simples em diversos modelos de telescópios equatoriais e a possibilidade de atualizações no futuro.

Para futuros projetos, recomenda-se a inclusão de um segundo motor de passo no eixo de declinação do telescópio, juntamente com a integração a uma biblioteca de corpos celestes. A adição de um segundo motor proporcionaria ao sistema capacidade de movimento bidirecional, possibilitando o desenvolvimento de um sistema Go-To de baixo custo. Essa melhoria exigiria apenas a adição de um motor de passo, um driver DRV8825 e, opcionalmente, um módulo Bluetooth para comunicação, tornando o sistema mais atraente aos entusiastas e astrofotógrafos amadores.

### Referências

CELESTRON. **Motor movimento telescópio Celestron montagem equatorial**. Disponível em: [https://www.celestron.com.br/MLB-1355171074-motor-movimiento-telescopio-celestron-montagem-equatorial-\\_JM?srsId=AfmBOoq-hr6xJXPbCet\\_0iGeZDH9-B9BFrtfknX1VBEvsR1z30dxVc6\\_](https://www.celestron.com.br/MLB-1355171074-motor-movimiento-telescopio-celestron-montagem-equatorial-_JM?srsId=AfmBOoq-hr6xJXPbCet_0iGeZDH9-B9BFrtfknX1VBEvsR1z30dxVc6_). Acesso em: 14 jan. 2025.

FORNAZIEIRO, Leandro. **Alinhamento pelo método DRIFT (derivação)**. [S. l.], 23 dez. 2014. Disponível em: <https://observatoriolupus.blogspot.com/2014/10/alinhamento-pelo-metodo-drift-derivacao.html>. Acesso em: 5 nov. 2024.

GSPEED. **AGotino: un goto con Arduino**. Padova, Itália, 21 out. 2020. Disponível em: <https://www.astronomia.com/forum/showthread.php?34605-aGotino-un-goto-con-Arduino>. Acesso em: 3 set. 2024.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATIONS (EUA). NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). **Magnetic Field Calculators**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true>. Acesso em: 20 set. 2024.

OBSERVATÓRIO PHOENIX (Belo Horizonte, MG, Brasil). **Os sistemas de acompanhamento**. Belo Horizonte, MG, 6 ago. 2003. Disponível em: [https://www.observatorio-phoenix.org/n\\_telesc/24\\_N10.htm](https://www.observatorio-phoenix.org/n_telesc/24_N10.htm). Acesso em: 20 nov. 2024.

ORTIZ, Roberto. **Conceitos básicos em astronomia de posição: Aprofundamento em Astronomia para a Docência** Leitura semana 3: Astronomia de Posição e o fenômeno Dia-Noite. São Paulo, SP: Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP, ago. 2011. Disponível em: [https://each.uspnet.usp.br/ortiz/classes/04-Leitura\\_Astronomia\\_de\\_posicao\\_Ortiz.pdf](https://each.uspnet.usp.br/ortiz/classes/04-Leitura_Astronomia_de_posicao_Ortiz.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

QST (Shanghai, China). **3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L**. Shanghai, China: [s. n.], 2016.

ROBINSON, Steven. **Deep Sky Astrophotography: Shooting**. Perthshire, Escócia, 2 ago. 2024. Disponível em: <https://www.stevenrobinsonpictures.com/deep-sky-astro-shooting-tutorial>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOBRINHO, Laurindo. **Como alinhar um telescópio equatorial?: Como devo interpretar os discos de AR e DEC? Ao apontar para o horizonte que hora deverá marcar o disco AR?.** Madeira, Portugal, 6 jul. 2011. Disponível em: <https://observatoriolupus.blogspot.com/2014/10/alinhamento-pelo-metodo-drift-derivacao.html>. Acesso em: 11 out. 2024.