

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Eugênio Piveta Pozzobon

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EQUATORIAL DE BAIXO
CUSTO PARA ASTROFOTOGRAFIA**

Santa Maria, RS
2022

Eugênio Piveta Pozzobon

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EQUATORIAL DE BAIXO CUSTO PARA
ASTROFOTOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Computação**.

ORIENTADOR: Prof. Rafael Concatto Beltrame

Santa Maria, RS
2022

Eugênio Piveta Pozzobon

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EQUATORIAL DE BAIXO CUSTO PARA
ASTROFOTOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Computação**.

Aprovado em 00 de de 2022:

Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Santa Maria, RS
2022

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EQUATORIAL DE BAIXO CUSTO PARA ASTROFOTOGRAFIA

AUTOR: Eugênio Piveta Pozzobon

ORIENTADOR: Rafael Concatto Beltrame

Atualmente, a astrofotografia é realizada por grandes telescópios e também por um crescente número de astrofotógrafos amadores, os quais contam com diversas limitações. A principal reside no fato de que objetos celestes, de forma geral, demandam elevados tempos de exposição. Infelizmente, caso a câmera esteja imóvel sobre um tripé, o movimento de rotação da Terra não permite que os astros sejam expostos ao sensor por muito tempo, pois as imagens acabam borradas. Por esse motivo, é necessário o uso de uma ferramenta que movimente a câmera no sentido de rotação aparente do céu, compensando esse movimento e permitindo um registro fotográfico de alta qualidade. Para isso, existem inúmeras ferramentas comerciais para o rastreamento do céu, porém, todas elas são comercializadas no hemisfério Norte e com um custo expressivo para o brasileiro médio. Então, a fim de simplificar e reduzir o custo associado à astrofotografia, tornando-a mais acessível, objetiva-se neste trabalho desenvolver uma plataforma equatorial para astrofotografia que seja portátil, robusta, precisa, de fácil configuração e utilização, de peso e volume compatíveis com tripés fotográficos, e com custo inferior às soluções comerciais existentes. A plataforma tem como diferencial um aplicativo *mobile* que auxilia a configuração da plataforma para a obtenção de registros fotográficos. O sistema final passou por testes de rastreamento (erro de velocidade) e de vibração para garantir que a montagem estaria adequada para o uso, e também com testes em campo, onde foram obtidas fotografias da Via-Láctea.

Palavras-chave: Astrofotografia. Plataforma Equatorial. Sistema Eletrônico. Aplicativo Android. Bluetooth.

ABSTRACT

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EQUATORIAL DE BAIXO CUSTO PARA ASTROFOTOGRAFIA

AUTHOR: Eugênio Piveta Pozzobon

ADVISOR: Rafael Concatto Beltrame

Currently, astrophotography remains practiced by large telescopes and also by astrophotographers that have countless challenges. The main one relies on the fact that celestial bodies, in general, demand long exposure times. Unfortunately, despite the camera being on a tripod, the rotational movement of the Earth doesn't allow the stars to be exposed to the sensor for a long time, resulting in blurry images. For this reason, it is necessary to use a tool that moves the camera in the apparent rotation direction of the sky, compensating for this movement and obtaining a high-quality photographic record. For this, there are numerous commercial tools for tracking the sky. However, all of them are commercialized in the Northern hemisphere and with an exorbitant cost for the average Brazilian. So, in order to simplify and reduce the cost associated with astrophotography, making it accessible, the objective of this work was to develop an equatorial platform for astrophotography that is portable; robust; precise; easy to set up and use; of weight and volume compatible with photographic tripods; and at a lower cost than commercial solutions. The platform's differential is a mobile application that makes it easy to use these tools for the configuration of the platform to obtain photographic records. The final system has been passed into vibration tests to ensure that the assembly would be suitable for use. Also, the system got tested with long exposure photography.

Keywords: Astrophotography. Equatorial Mount. Electronic System. Android Application. Bluetooth.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de solução comercial empregada em astrofotografias.	11
Figura 2.1 – Efeito de zoom gerado pela variação da distância focal	14
Figura 2.2 – Fotografia da Via Láctea com lente <i>zoom</i> em configuração de 4mm.	14
Figura 2.3 – Fotografia de Júpiter e as Luas de Galileu com lente <i>zoom</i> em configuração de 205mm.	15
Figura 2.4 – Impacto do tempo de exposição de captura para objetos em movimento	15
Figura 2.5 – Variações de abertura de uma lente	16
Figura 2.6 – Impacto da abertura na profundidade de campo	16
Figura 2.7 – Variações do ISO e o ruído agregado	16
Figura 2.8 – Fotografia com a captura de um <i>star trail</i>	17
Figura 2.9 – Efeito da combinação de imagens.	19
Figura 2.10 – Diagrama do processo de calibração do empilhamento sem o uso de <i>Dark Flat Frames</i>	20
Figura 2.11 – O enquadramento não rotaciona com o astro na montagem Alt-Azimutal	22
Figura 2.12 – O enquadramento se mantém constante na montagem equatorial	22
Figura 2.13 – A posição do polo norte/sul celestial, no céu, depende da posição geográfica (latitude) da pessoa/equipamento de observação e é alinhado com o eixo de rotação da terra.	23
Figura 2.14 – Exemplo de Montagem <i>Barn Door</i>	24
Figura 2.15 – <i>Barn Door</i> com braço simples	24
Figura 2.16 – Diagrama de montagem do mecanismo de Braço Duplo	25
Figura 2.17 – Modelo de Montagem Curva	25
Figura 2.18 – Alinhamento por <i>laser</i>	27
Figura 2.19 – Visor de uma luneta para astrofotografia, contendo marcadores para alinhar as estrelas	27
Figura 2.20 – Alinhamento impossível sem colaboração do tempo limpo	28
Figura 2.21 – Marcação da latitude para ajuste de elevação	29
Figura 2.22 – Estrela centralizada na grelha do visor da câmera	29
Figura 2.23 – Estrela apresentando fuga para a direita que, neste caso, aponta para o Sul	30
Figura 2.24 – Cabeça de Tripé com possibilidade para ajuste de precisão	31
Figura 2.25 – Cabeça de Tripé com possibilidade para ajuste de precisão	31
Figura 2.26 – Nyx Tracker	32
Figura 2.27 – Visualização conceitual de um sistema embarcado.	33
Figura 2.28 – Modelos de motores: à esquerda um motor unipolar, à direita um motor bipolar	34
Figura 2.29 – Diagrama de controle de um motor de passo	35
Figura 2.30 – Sistema de ângulos <i>Roll(p)</i> - <i>Pitch(q)</i> - <i>Yaw(r)</i> em um objeto qualquer	38
Figura 2.31 – Exemplos de comunicação UART	41
Figura 2.32 – Topologia de uma rede i2c com 1 mestre e 3 escravos conectados as linhas SDA e SCL, ambas com resistores de <i>pull-up</i>	42
Figura 2.33 – Transmissão de dados do mestre para o escravo	43
Figura 2.34 – Requisição de dados do mestre ao escravo	44
Figura 2.35 – condições de <i>START</i> e <i>STOP</i> no padrão I2C	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ajustes do método <i>Drift</i> para cada caso	30
Tabela 2.2 – Comparativo das Soluções de Mercado	32
Tabela 2.3 – Sequência de acionamentos das bobinas do motor pelo microcontrolador no modo <i>Full Step</i>	36
Tabela 2.4 – Sequência de acionamentos das bobinas do motor pelo microcontrolador no modo <i>Half Step</i>	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	12
2.1	ASTROFOTOGRAFIA	12
2.1.1	Equipamentos	12
2.1.1.1	<i>Câmeras</i>	12
2.1.1.2	<i>Lentes</i>	13
2.1.1.2.1	Distância Focal	13
2.1.2	Exposição	13
2.1.2.1	<i>Tempo de Exposição</i>	15
2.1.2.2	<i>Abertura</i>	15
2.1.2.3	<i>Sensibilidade (ISO)</i>	16
2.1.3	Formatos de Arquivos	17
2.1.4	Rastro de Estrelas	17
2.1.4.1	<i>Tempo de Exposição Máximo</i>	17
2.1.4.1.1	Regra dos 500	18
2.1.4.1.2	Regra NPF	18
2.1.5	Empilhamento de Fotos	19
2.1.5.1	<i>Imagens de Calibração</i>	20
2.1.5.1.1	<i>Dark Frames</i>	20
2.1.5.1.2	<i>Bias (Offset) Frames</i>	20
2.1.5.1.3	<i>Flat Frames</i>	21
2.1.6	Métodos de Rastreamento	21
2.1.6.1	<i>Alt-Azimutal</i>	21
2.1.6.2	<i>Equatorial</i>	22
2.2	PLATAFORMAS EQUATORIAIS	22
2.2.1	Modelos de Montagem	23
2.2.2	Métodos de Alinhamento Polar	26
2.2.2.1	<i>Localização da Estrela Polar</i>	26
2.2.2.2	<i>Instrumentação</i>	27
2.2.2.2.1	Ajuste de Azimute	28
2.2.2.2.2	Ajuste de Elevação	28
2.2.2.3	<i>Método Drift</i>	28
2.2.3	Soluções Comerciais Existentes	31
2.3	OBJETIVOS	31
2.4	SISTEMAS EMBARCADOS	32
2.5	PERIFÉRICOS	33
2.5.1	Motor de Passo	33
2.5.1.1	<i>Funcionamento</i>	34
2.5.1.1.1	Driver	34
2.5.1.2	<i>Torque</i>	35
2.5.1.3	<i>Tamanho do Passo</i>	35
2.5.1.4	<i>Formas de Controle</i>	36
2.5.1.4.1	Full Step	36
2.5.1.4.2	Half Step	36
2.5.1.4.3	Microstep	37

2.5.2	GPS	37
2.5.3	Sensores de Posição Inercial	37
2.5.3.1	<i>Acelerômetro</i>	38
2.5.3.2	<i>Giroscópio</i>	38
2.5.3.3	<i>Magnetômetro</i>	39
2.6	PROCESSAMENTO DE DADOS	39
2.6.1	Erros comuns em sensores IMU	39
2.6.2	Filtro Passa Baixa	40
2.6.3	Filtro Complementar	40
2.6.4	Magnetômetro como uma Bússola	40
2.7	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO SERIAL	40
2.7.1	UART	41
2.7.2	I2C	42
2.7.3	Bluetooth	44
2.7.3.1	<i>Bluetooth Low Energy</i>	45
2.8	INTERFACE GRÁFICA	46
2.8.1	Princípios e Diretrizes	46
2.8.1.1	<i>Visibilidade dos status do sistema</i>	46
2.8.1.2	<i>Comunicar-se com o mundo real</i>	46
2.8.1.3	<i>Liberdade de Controle do Usuário</i>	47
2.8.1.4	<i>Consistências e Padrões</i>	47
2.8.1.5	<i>Prevenção de erros</i>	47
2.8.1.6	<i>Relembrar o usuário é mais fácil do que o usuário relembrar</i>	48
2.8.1.7	<i>Torne o sistema flexível e eficiente</i>	48
2.8.1.8	<i>Tenha um projeto minimalista</i>	48
2.8.1.9	<i>Ajude o usuário a entender e se recuperar de erros</i>	48
2.8.1.10	<i>Tire dúvidas e documente o sistema</i>	49
2.8.2	Android	49
2.8.2.1	<i>Ambiente de Desenvolvimento</i>	49
2.8.2.2	<i>Linguagens de Programação</i>	49
2.8.2.3	<i>Material Design</i>	50
2.8.3	Usuários	50
3	DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA	52
3.1	HARDWARE	52
3.1.1	Módulos Comerciais	52
3.1.1.1	<i>Módulo Bluetooth HC05</i>	52
3.1.1.2	<i>Módulo de sensores GY87</i>	52
3.1.2	Motor 28BYJ-48	52
3.1.2.1	<i>Driver ULN2003</i>	52
3.1.3	Placa de Circuito Impresso	53
3.1.3.1	<i>Diagrama Elétrico</i>	53
3.1.3.2	<i>Layout</i>	53
3.1.3.3	<i>Manufatura</i>	53
3.2	PROJETO ESTRUTURAL	53
3.2.1	Requisitos de Projeto	53
3.2.2	Peças	53
3.2.2.1	<i>Frame Principal</i>	53
3.2.2.2	<i>Engrenagens</i>	53

3.2.2.3	<i>Barra de Elevação</i>	53
3.2.3	Manufatura	54
3.2.4	Montagem	54
4	DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO	55
4.1	NECESSIDADES DOS USUÁRIOS.....	55
4.2	PROTOTIPAÇÃO DAS TELAS.....	55
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO APLICATIVO ANDROID.....	55
4.3.1	Requisitos de Sistema	55
4.3.2	Arquitetura do Funcionamento	55
4.3.2.1	<i>Activity</i>	55
4.3.2.2	<i>Room Database</i>	55
4.3.2.3	<i>Fragments</i>	56
4.3.2.3.1	<i>View Model</i>	56
4.3.2.4	<i>Protocolo de Comunicação Bluetooth</i>	56
5	RESULTADOS OBTIDOS	57
5.1	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	57
5.1.1	Método	57
5.1.2	Discussão	57
5.2	CUSTO TOTAL DO SISTEMA.....	57
5.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO APLICATIVO.....	57
5.4	FOTOGRAFIAS.....	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1	PROJETO <i>OPEN-SOURCE</i>	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DAS PEÇAS	64
	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE MONTAGEM	66

1 INTRODUÇÃO

Desde os primeiros registros datados, civilizações já observavam o céu e, desse modo, podiam contabilizar a passagem do tempo, identificar as estações do ano, os ciclos sazonais de chuvas e/ou secas, etc. Assim, por exemplo, era possível realizar um planejamento mais assertivo acerca da melhor época de plantio e colheita de diferentes culturas. Cada civilização tinha seu meio e técnica de observação. Por exemplo, em 4000 a.C., os povos da Mesopotâmia utilizavam zigurates para observar o céu noturno; já em 2500 a.C., foi construída a estrutura de pedras Stonehenge, na Inglaterra, para registrar os solstícios. Foi somente em 1609 d.C. que Galileu conseguiu aperfeiçoar e utilizar um telescópio refrator para observar os planetas e as estrelas pela primeira vez (HELERBROCK, c2021).

A astrofotografia consiste no emprego de técnicas fotográficas para registrar objetos astronômicos, como planetas, estrelas, galáxias, nebulosas, etc. A primeira astrofotografia é datada de 1840 e é um registro da Lua (JÚNIOR, 2016). Desse período em diante, a fotografia teve um papel muito importante na observação celeste e no registro do céu para análise científica. Essa técnica foi evoluindo gradualmente de forma que, por volta de 1960, já havia equipamentos que permitiam realizar registros mais concretos e eficientes, possibilitando fotos com mais definição e nitidez (SANTOS, 2010).

No fim do século XX, telescópios maiores e mais complexos, instalados na Terra ou a orbitando no espaço (como o telescópio espacial Hubble), ampliaram a capacidade da ciência em estudar fenômenos astronômicos ou mesmo a origem do próprio universo (SANTOS, 2010). Paralelamente, as ferramentas amadoras para astronomia (como telescópios de baixo custo), ou mesmo para astrofotografia (câmeras de custo mais acessível e equipamentos para rastreamento do céu) continuaram a ser desenvolvidas, de forma que um grande número de astrônomos e, especificamente, astrofotógrafos amadores continuassem exercendo seu *hobby* ou mesmo contribuindo à ciência.

Nesse sentido, o desenvolvimento de equipamentos acessíveis voltados ao público amador tem um papel fundamental para despertar o interesse pela ciência em cada vez mais pessoas. Atualmente, o custo de muitas ferramentas classificadas como “amadoras” ainda é elevado, principalmente para a realidade brasileira. Como exemplo, hoje podem ser empregados pequenos telescópios comerciais ou artesanais acoplados a câmeras digitais (de celular ou DSLRs-(Digital Single Lens Reflex). No entanto, os principais desafios de se fotografar galáxias, nebulosas, etc., é que esses corpos, de forma geral, demandam elevados tempos de exposição (JÚNIOR, 2016). Infelizmente, o movimento de rotação da Terra não permite que os astros sejam expostos ao sensor por muito tempo, pois as imagens ficariam borradas. Por esse motivo, é necessário o uso de uma ferramenta que movimente a câmera (acoplada ou não a um telescópio) no sentido de rotação aparente do céu, compensando o movimento e permitindo que o sensor da câmera possa receber luz

por longos períodos de tempo (de minutos a horas) (JÚNIOR, 2016). Assim, consegue-se obter um registro fotográfico de alta qualidade e com um baixo custo computacional de pós-processamento.

Por isso, existem inúmeras ferramentas comerciais para o rastreamento do céu voltadas ao público amador, como Nyx Track, SkyGuider™ Pro, Polaris™, entre outras (conforme Figura 1.1). Porém, todas elas são comercializadas no hemisfério norte e com um custo excessivo para brasileiro médio (considerando taxa de câmbio, taxas de importação e frete). Assim, de modo a contribuir à popularização da astrofotografia no Brasil, incentivando cada vez mais jovens a seguirem na carreira científica, propõe-se o desenvolvimento de uma plataforma equatorial de baixo custo para astrofotografia.

Figura 1.1 – Exemplo de solução comercial empregada em astrofotografias.



Fonte: (CORPORATION, c2021)

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 ASTROFOTOGRAFIA

A astrofotografia é um ramo da astronomia e da fotografia que combina toda a ciência envolvida na documentação e registro de estrelas, constelações, planetas, meteoros, etc., com a arte da fotografia. Dentro da astrofotografia, existem variantes como planetária, solar e céu profundo (ANDOLFATO, 2017). Além disso, existem diferenças entre a astrofotografia praticada profissionalmente por cientistas, em grandes telescópios, da praticada por amadores. Porém, ambas as atividades são importantes e se complementam.

As fotografias capturadas por telescópios profissionais possuem vantagens no fato como uma grande ampliação, além de foco e definição, devido aos grandes espelhos que compõe suas montagens. Contudo, isso se torna um problema para a captura de imagens mais amplas. Essas fotografias são registradas, em sua maioria, por astrofotógrafos amadores (ANDOLFATO, 2017).

Além disso, a astrofotografia amadora também precisa de equipamentos que, no Brasil, custam um preço que acaba afastando uma boa parcela da população dessa prática.

2.1.1 Equipamentos

Além de uma câmera e uma lente, existem alguns equipamentos periféricos que são fundamentais para a prática da astrofotografia: tripé e disparador remoto (intervalômetro) para a câmera. O tripé é responsável por manter a câmera estável durante o registro das estrelas; o Disparador tem a função de operar a câmera remotamente para evitar que haja o operador faça a câmera tremer ao apertar algum botão e/ou também permitir a utilização do modo *Bulb* das DSLR. O modo *Bulb* consiste em permitir um controle total do tempo de exposição pelo operador (LOCHUN et al., 2015).

2.1.1.1 Câmeras

As câmeras digitais possuem sensores CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) de imagem que substituem o filme das máquinas fotográficas mais antigas. O sensor CMOS pode ter diversos tamanhos físicos diferentes e uma densidade de *pixels* por polegada (dpi) diversa entre os modelos. Por norma, quanto maior for o sensor físico,

mais qualidade terá a imagem final (ALVES, 2018).

Existem diversos modelos de câmeras para fotografia: compacta, super-zoom, *mirrorless*, DSLR e por fim as câmeras em celulares. As câmeras *mirrorless* atualmente são equiparáveis às DSLR e ambas são as mais usadas para astrofotografia, possibilitam trocar lentes e podem ser utilizadas para capturar de céu noturno. Além disso, possibilitam uma série de configurações em modo manual que não são possíveis em câmeras semi-profissionais, compactas ou de super-zoom (LOCHUN et al., 2015).

2.1.1.2 Lentes

A lente é um equipamento acoplado no corpo da câmera que é responsável por focalizar a luz que invade o sensor. As lentes podem ser rígidas no corpo da câmera, no caso de modelos semi-profissionais e compactos; ou podem ser removíveis para o caso de modelos profissionais. Nesse último caso, as lentes removíveis são itens que podem ser obtidos por escolha do fotógrafo e existe uma variedade de modelos.

Esses modelos podem ser lentes fixas ou *zoom*. O primeiro é um modelo de lente que possui uma distância focal fixa. Já as lentes *zoom* permitem uma variação na distância focal, o que acaba gerando o *zoom* óptico (REGINA, 2013).

2.1.1.2.1 Distância Focal

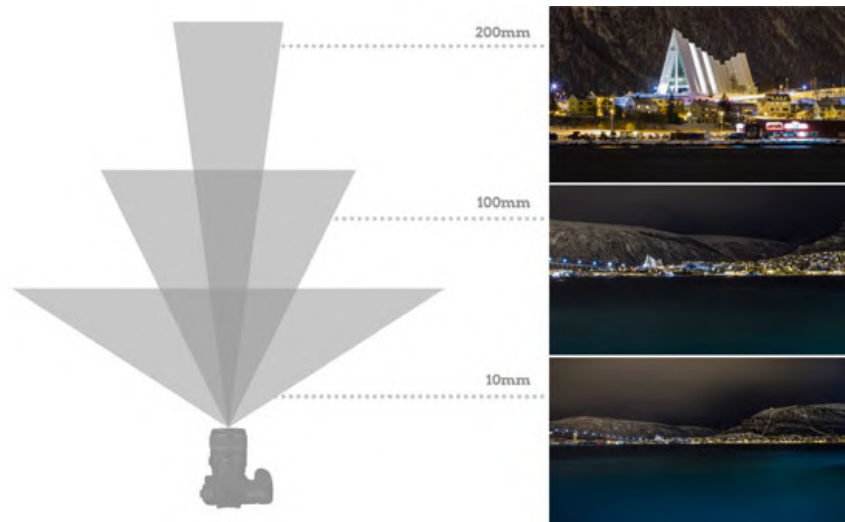
A distância focal de uma lente é um fator medido em milímetros e é o que determina seu ângulo de visão. Quanto maior ele for, mais fechado será o ângulo, gerando um zoom. Do contrário, quanto menor for a distância focal, maior será o ângulo de visão e consequentemente menor será o zoom da lente. A figura 2.1 ilustra essa relação da distância focal (REGINA, 2013).

Em um contexto de astrofotografia, lentes mais abertas são úteis para capturar a Via-Láctea (Figura 2.2). Para fotografias de constelações, nebulosas e planetas distantes da Terra, é necessário uma lente mais fechada, que possibilite o enquadramento com o zoom necessário, conforme o tamanho do astro a ser fotografado. (Figura 2.3)

2.1.2 Exposição

A exposição de uma imagem se refere à quantidade de luz captada pelo sensor da câmera. Uma imagem muito clara é considerada superexposta, um caso onde o sensor recebeu muita luz. Ao contrário, uma imagem subexposta é uma fotografia escura que

Figura 2.1 – Efeito de zoom gerado pela variação da distância focal



Fonte: (REGINA, 2013)

Figura 2.2 – Fotografia da Via Láctea com lente *zoom* em configuração de 4mm.



Fonte: Autor

recebeu pouca luz. Existem 3 parâmetros configuráveis em uma câmera profissional que são determinantes para a exposição e também para a qualidade da foto final (VIERO, 2018). De forma geral, conseguir a exposição ideal é o principal desafio da astrofotografia de céu profundo (ANDOLFATO, 2017).

Figura 2.3 – Fotografia de Júpiter e as Luas de Galileu com lente *zoom* em configuração de 205mm.



Fonte: Autor

2.1.2.1 Tempo de Exposição

Para captar uma imagem, a câmera possui um dispositivo que permite a passagem de luz em direção ao sensor interno que capta a imagem. Uma fotografia de longa exposição significa que a câmera permaneceu captando luz por um longo intervalo de tempo (LOCHUN et al., 2015). Porém, não é possível abusar de longas exposições em alguns casos, pois a imagem pode sair "borrada" (Figura 2.4). uma pessoa correndo precisa ser fotografada em uma fração de segundo e uma paisagem, ao contrário, pode ser capturada durante mais de um segundo se a câmera estiver imóvel em um tripé.

Figura 2.4 – Impacto do tempo de exposição de captura para objetos em movimento



Fonte: Adaptado de (VIERO, 2018)

2.1.2.2 Abertura

Esse é o diâmetro do diafragma da lente, que permite a passagem de luz para o sensor (Figura 2.5). Isso determina um valor "f/número". Um baixo "f/número" como f/1.8, indica um alto valor de abertura e significa dizer que a câmera irá receber mais luz (LOCHUN et al., 2015). A abertura também impacta na profundidade de campo (Figura 2.6), o que significa que um valor baixo também apresenta o ônus da dificuldade focalizar.

Figura 2.5 – Variações de abertura de uma lente



Fonte: Adaptado de (VIERO, 2018)

Figura 2.6 – Impacto da abertura na profundidade de campo



Fonte: Adaptado de (VIERO, 2018)

2.1.2.3 Sensibilidade (ISO)

O ISO é um padrão internacional para a sensibilidade do sensor das câmeras. Essa sensibilidade também é configurável no sistema da câmera no momento da fotografia. Um valor baixo de ISO significa que o sensor precisa de mais tempo de exposição para captar mais luz, ao mesmo tempo, que reduz o ruído na imagem. (Figura 2.7) Um valor de ISO alto implica que a imagem final terá muito ruído, mas possibilita que ela seja registrada com um baixo tempo de exposição (LOCHUN et al., 2015). O ruído agregado pelo ISO também acaba prejudicando a fotografia, reduzindo o contraste e a saturação das imagens, o que também pode levar a posterização, que é o comprometimento total da fotografia, pois a foto perde resolução e criam-se falhas nos *pixels* da imagem.

Figura 2.7 – Variações do ISO e o ruído agregado



Fonte: Adaptado de (VIERO, 2018)

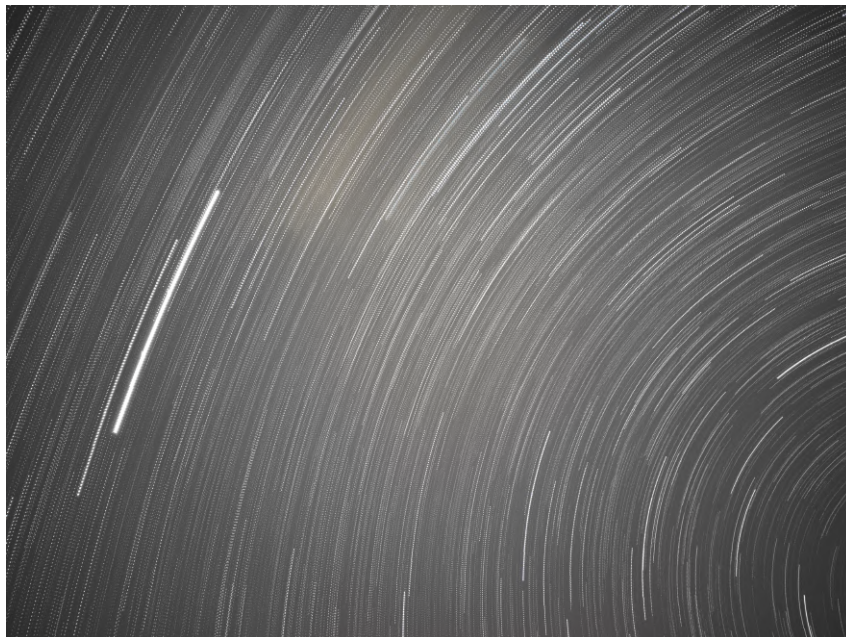
2.1.3 Formatos de Arquivos

As câmeras profissionais possibilitam salvar as imagens em diferentes formatos de arquivos, que inclui formato RAW, JPG ou ambos. Os arquivos JPG são uma versão reduzida dos formatos RAW, onde se aplica um algoritmo de compressão de imagens que acaba gerando perda de informações. Desse modo, arquivos RAW possuem a informação completa do sensor, sem nenhum tipo de compactação e acabam sendo muito grandes, mas permitem uma pós-produção mais precisa que acaba resultando em uma imagem com mais qualidade e detalhes (LOCHUN et al., 2015).

2.1.4 Rastro de Estrelas

O movimento de rotação da terra gera um movimento aparente no céu. Ao realizar uma fotografia de longa exposição, esse movimento será visível criando o efeito de rastro de estrelas ou *star trail*. (Figura 2.8)

Figura 2.8 – Fotografia com a captura de um *star trail*



Fonte: Autor

2.1.4.1 Tempo de Exposição Máximo

Existe um limite de tempo máximo para que uma câmera fixa permaneça capturando luz sem que ocorra o fenômeno de *star trail*. Esse tempo máximo depende de vários fatores, mas os dois principais são a distância focal da lente e a posição da estrela.

A distância focal é importante pois uma lente com um longo comprimento amplia a imagem, da mesma forma que amplia o rastro das estrelas. Do contrário, lentes com ângulo mais aberto, de menor comprimento focal, fazem tudo parecer pequeno, incluindo o movimento das estrelas, e isso permite um tempo de exposição maior (COVINGTON, 2006).

A distância de um astro até a linha do equador celestial é chamada de declinação estelar, sendo medida em graus. Quanto menor for essa distância, mais rápido a estrela aparenta se movimentar no céu. Seja a declinação simbolizada por σ , e a distância focal nomeado F , em milímetros, uma equação capaz de aproximar o limite do tempo de exposição é dada em (2.1) (COVINGTON, 2006). Existem ainda outras metodologias que buscam aproximar o tempo máximo de exposição.

$$t_{max} = \frac{343}{F \cos(\sigma)} [s] \quad (2.1)$$

2.1.4.1.1 Regra dos 500

A regra dos 500 é uma fórmula que se baseia apenas distância focal, e o cálculo do tempo máximo é dado pela equação 2.2. É uma regra muito simples, mas que permite uma aproximação razoável sobre o tempo máximo de exposição. Existem variantes dessa regra que alteram a constante no numerador, como a regra dos 300 ou a regra dos 400 (COX, 2021).

$$t_{max} = \frac{500}{F} [s] \quad (2.2)$$

2.1.4.1.2 Regra NPF

A regra NPF é uma evolução da equação (2.1), que considera múltiplos fatores para recalcular a constante do numerador (COX, 2021). O tempo de exposição máximo é calculado pela equação 2.3 com base na abertura da lente (N), na distância focal (F), no tamanho em micrômetros do sensor da câmera (p), na declinação da estrela para onde a câmera será apontada (σ), e um fator de multiplicação (k). O fator k é mantido em 1, porém pode ser aumentado até 3 para obter imagens mais nítidas e contrastantes (COX, 2021).

$$t_{max} = k \cdot \frac{16,9N + 0,1F + 13,7p}{F \cos(\sigma)} [s] \quad (2.3)$$

2.1.5 Empilhamento de Fotos

O fenômeno de *star trail* gera a necessidade do uso de ferramentas para compensar o movimento da Terra e permitir uma fotografia de longa exposição sem que se crie rastro. Essa compensação pode ser feita por *software*, realizando-se o empilhamento de fotos de curta exposição (ANDOLFATO, 2017).

O empilhamento consiste na junção de múltiplas imagens capturadas com a câmera montada em um tripé ou em uma montagem motorizada, que possibilita o somatório da luz capturada com essas fotos. Esse método de processamento é relevante para qualquer astrofotografia e possibilita a redução de ruído usando imagens de calibração (LOCHUN et al., 2015). Existem inúmeros programas capazes de realizar esse processo como *Deep Sky Stacker*, *Sequator*, entre outros.

A combinação das imagens no pós-processamento não gera uma imagem mais luminosa ou colorida, o objetivo da combinação é o aumento da Relação Sinal Ruído (SNR). A única forma de gerar uma imagem final com mais luz e cores é realizando uma sequência de fotografias com maior tempo de exposição (DEEP SKY STACKER, c2021a). As figuras 2.9a e 2.9b comparam o resultado de uma imagem que passou pelo processo de empilhamento.

Figura 2.9 – Efeito da combinação de imagens.

(a) Imagem original



(b) Empilhamento de 32 imagens

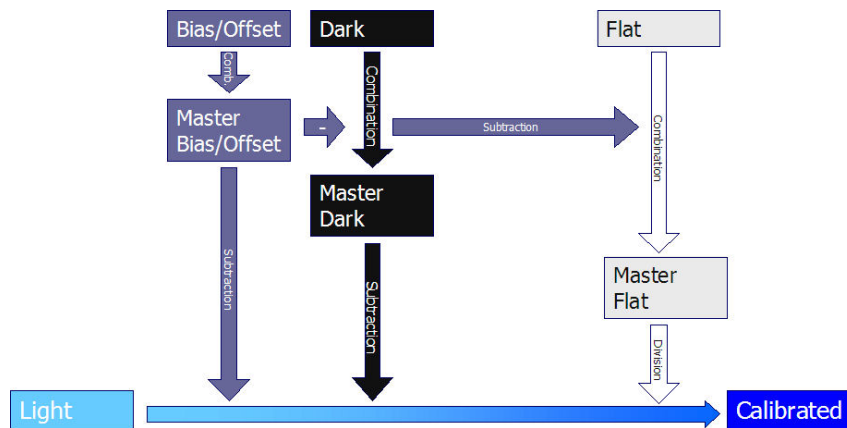


Fonte: (DEEP SKY STACKER, c2021a)

2.1.5.1 Imagens de Calibração

As fotografias registradas sobre um alvo celeste são chamadas de *Light Frames* e estas podem ser empilhadas como escrito anteriormente. No entanto, é possível realizar um processo de calibração do empilhamento, fornecendo imagens de calibração (DEEP SKY STACKER, c2021b). O processo é feito combinando fotos chamadas de *Dark Frames*, *Bias Frames*, *Flat Frames* e *Dark Flat Frames* (não muito utilizado). Essas imagens são extras e precisam ser fotografadas com a câmera em condições específicas e posteriormente adicionadas ao *software* durante o processo de empilhamento (DEEP SKY STACKER, c2021a). O resultado entregue pelo *software* será uma imagem final calibrada, como demonstra o diagrama da Figura 2.10.

Figura 2.10 – Diagrama do processo de calibração do empilhamento sem o uso de *Dark Flat Frames*



Fonte: (DEEP SKY STACKER, c2021a)

2.1.5.1.1 Dark Frames

Os *Dark Frames* são fotografias que indicam ao software a localização do sinal de ruído das fotografias. São necessárias de 10 a 20 fotos com a lente tampada para criar a calibração, as quais devem necessariamente ser fotografadas com ISO, tempo de exposição e condições ambientais iguais aos *light frames*. (DEEP SKY STACKER, c2021b)

2.1.5.1.2 Bias (Offset) Frames

Os *Bias/Offset Frames* são usados para remover sinais de ruído na leitura do sensor da câmera. Essas fotografias devem ser capturadas no menor tempo de exposição possível, com lente tampada, na mesma configuração de ISO dos *Light Frames*. São necessá-

rias cerca de 10 a 20 fotos para que a calibração funcione adequadamente. A temperatura da câmera não é um fator relevante nesse caso (DEEP SKY STACKER, c2021b).

2.1.5.1.3 *Flat Frames*

Flat Frames são imagens de calibração capturadas com mesmo ISO e abertura dos *light frames* colocando uma folha branca na frente da lente, incidindo luz na folha. Elas têm o objetivo de indicar a vinheta da lente (escurecimento nas bordas da imagem), além da distribuição não uniforme de luz provocada por pó ou riscos na lente. Novamente, são necessários de 10 a 20 imagens (DEEP SKY STACKER, c2021b).

2.1.6 Métodos de Rastreamento

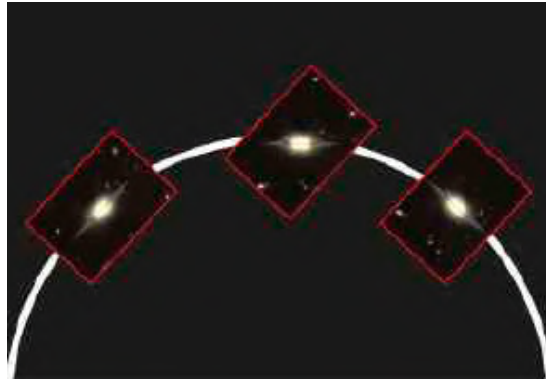
Tendo em vista o limite do tempo de exposição e o movimento de rotação da Terra, discutidos na seção 2.1.4.1, os *softwares* de empilhamento possuem algoritmos que compensam a rotação das estrelas, rotacionando as imagens fotografadas no sentido oposto, e realizando o empilhamento dessas imagens após esse ajuste das fotos. Esse método compensa o ruído, mas como os tempos de exposições são curtos, torna-se mais difícil obter cor e contrastes nos objetos celestes. Isso só é possível capturar aumentando o tempo de exposição.

Então, para realizar astrofotografias de longa exposição, é necessário o uso de um rastreador físico que movimenta a câmera no sentido de rotação aparente das estrelas, garantindo que não ocorrerá o efeito de *star trail*. Existem dois métodos de rastreamento: Alt-Azimutal e Equatorial (LOCHUN et al., 2015).

2.1.6.1 *Alt-Azimutal*

Uma montagem Alt-Azimutal funciona movendo uma câmera ou um telescópio por meio dos eixos vertical e horizontal, alterando o azimute e a altitude simultaneamente. Isso requer um sistema com dois motores para realizar o rastreamento, o que torna essa montagem mais cara e complexa. Além disso, para astrofotografias, essa montagem acaba não sendo indicada pois ela não consegue compensar a rotação aparente dos astros, que também é gerado pelo movimento de rotação da terra (Figura 2.11) (LOCHUN et al., 2015).

Figura 2.11 – O enquadramento não rotaciona com o astro na montagem Alt-Azimutal

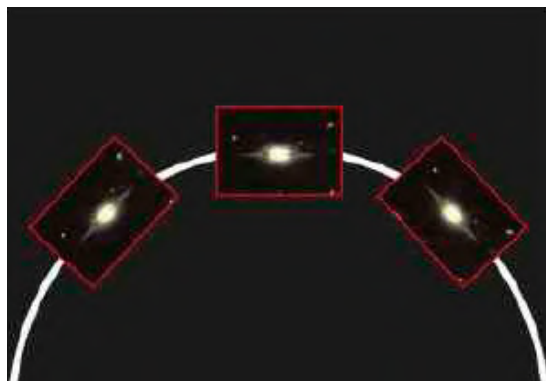


Fonte: Adaptado de (LOCHUN et al., 2015)

2.1.6.2 Equatorial

Ao contrário do modelo de montagem comentado na seção anterior, uma montagem equatorial consegue compensar a rotação aparente dos astros (Figura 2.12) e, por esse motivo, é a melhor opção de mecanismo para realizar astrofotografias. Isso ocorre pois essa construção realiza o movimento da câmera de forma circular, na mesma velocidade de rotação aparente da Terra, após alinhar o eixo de altitude junto com o meridiano polar (eixo norte-sul) (LOCHUN et al., 2015). Esse sistema requer somente um motor, porém, precisa também de um método acurado de alinhamento com o meridiano e isso será explorado na próxima seção.

Figura 2.12 – O enquadramento se mantém constante na montagem equatorial



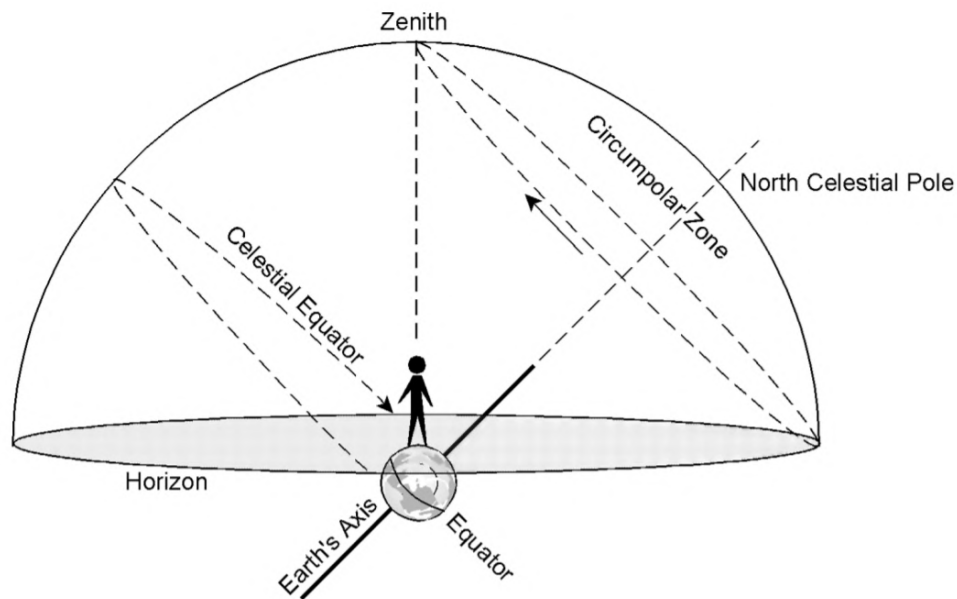
Fonte: Adaptado de (LOCHUN et al., 2015)

2.2 PLATAFORMAS EQUATORIAIS

Plataformas Equatoriais são mecanismos que se baseiam em uma montagem equatorial para realizar o rastreamento das estrelas no céu. Existem modelos para telescópios

e outros específicos para astrofotografia, sendo este último o foco deste trabalho. Essa montagem requer o alinhamento do eixo de rotação da plataforma com o eixo de rotação celeste que, para uma pessoa localizada no hemisfério norte, será o polo norte polar, e para alguém no hemisfério sul, será o polo sul polar (Figura 2.13).

Figura 2.13 – A posição do polo norte/sul celestial, no céu, depende da posição geográfica (latitude) da pessoa/equipamento de observação e é alinhado com o eixo de rotação da terra.



Fonte: (MACK, 2008)

Depois que o eixo da plataforma está alinhado com o polo celeste, ela começa a rotacionar no sentido e mesma taxa da rotação do planeta.

2.2.1 Modelos de Montagem *Barn Door*

Barn Door é um modelo de montagem que se caracterizam por funcionar com duas bases acopladas, onde uma é fixada no tripé do fotógrafo, e a outra é móvel, fixando a câmera que será rotacionada para acompanhar o movimento aparente do céu (Figura 2.14). O funcionamento é igual a abertura de uma porta com dobradiças (DAVID, K., 2015).

Esses modelos são tradicionalmente conhecidos pela comunidade de astrofotografia por serem de baixo custo, pois é possível automatizar o movimento da câmera sem a necessidade de um motor demasiadamente potente e caro. Além disso, comparando a modelos de montagem usado em sistemas comerciais, um sistema *Barn Door* pode ser facilmente modificado ou reparado. Perdem para modelos comerciais no quesito transportabilidade e precisão (DAVID, K., 2015). A transportabilidade é a facilidade com que o equipamento pode ser transportado de um ponto ao outro, isso leva em conta o formato da

Figura 2.14 – Exemplo de Montagem *Barn Door*

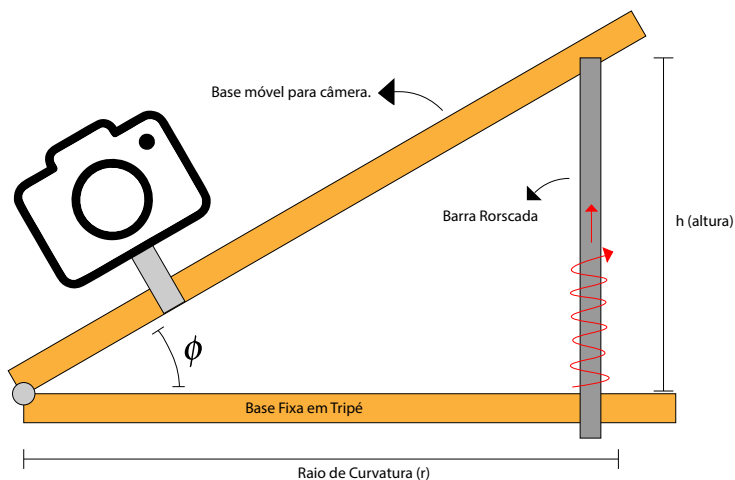


Fonte: (SERONIK, 2007)

estrutura, volume e peso.

Dentre os modelos de *Barn Door*, os mais comuns são: montagem com braço simples; montagem com braço Duplo e montagem curva. A primeira (Figura 2.15) é composta por uma base fixa conectada a base da câmera que é movida por um eixo perpendicular à parte fixa. Esse sistema acaba tendo algumas limitações para manter uma variação constante no ângulo de rotação da câmera, que, apesar da elevação do eixo ser constante, o ângulo de rotação não é, o que acumulará erro de rastreamento. Isso gera erros de rastreamento que limitam o uso desse modelo para exposições com, no máximo, 15 minutos (TROTT, 1989).

Figura 2.15 – *Barn Door* com braço simples

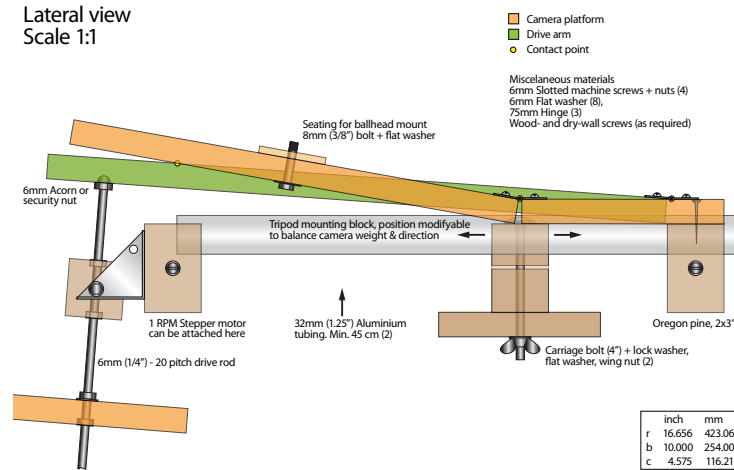


Fonte: Adaptado de (TROTT, 1989)

Trot (1989) desenvolveu um mecanismo de braço duplo (Figura 2.16) que consegue aumentar para até 1h o tempo máximo de exposição, em comparação com o modelo ante-

rior. Contudo, tem como desvantagem a complexidade do sistema, que exige várias peças o que pode se tornar demasiadamente complexo para montagem e configuração.

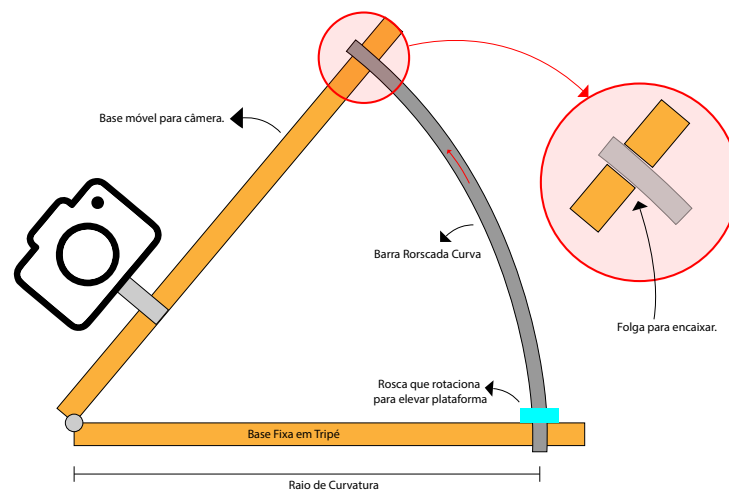
Figura 2.16 – Diagrama de montagem do mecanismo de Braço Duplo



Fonte: Adaptado de (TROTT, 1989)

Por fim, a montagem curva é composta por uma barra rosca curva, que não possui o problema de compensação de velocidade, pois ela acompanha a curvatura do movimento da plataforma. A dificuldade dessa montagem provém da curvatura do eixo de rotação, que pode trazer questões relacionadas à estabilidade devido à necessidade de folga nas bases (Figura 2.17). Outro detalhe é que a barra não pode ser rotacionada. A movimentação deve ser feita através de uma rosca que é rotacionada na base, e realiza o deslocamento da barra rosqueada para cima ou para baixo (DAVID, K., 2015).

Figura 2.17 – Modelo de Montagem Curva e o problema da folga no mecanismo



Fonte: Adaptado de (JONES, 1980)

Comparando os atributos dos modelos de *Barn Door*, a montagem curva é a mais apropriada para o projeto proposto, visto que não demanda a construção de um meca-

nismo demasiadamente complexo. Dessa forma, ela reduz a quantidade de materiais e processos, bem como a lógica de controle do motor, minimizando ainda mais os custos, ao passo que potencializa o resultado do projeto.

2.2.2 Métodos de Alinhamento Polar

O alinhamento com o polo norte/sul celeste é fundamental para a execução da astrofotografia através de uma plataforma equatorial, e erros podem comprometer o funcionamento do sistema. Quanto mais bem alinhada está a plataforma, maior será o tempo de exposição que ela conseguirá obter sem gerar rastros nas estrelas. Para realizar esse alinhamento, existem dois métodos: Localizar a estrela Polar que indica a posição do polo celeste e/ou utilizar de instrumentação para posicionar a plataforma nos valores de azimute e inclinação corretos, dada a posição da plataforma no planeta.

2.2.2.1 Localização da Estrela Polar

Existem duas formas de alinhamento por meio da localização no céu da estrela polar. A primeira delas é um *laser*, que é alinhado com a estrela polar para indicar o alinhamento (Figura 2.18). No entanto, o *laser* não é um método extremamente confiável, pois a estrela polar não é exatamente centrada no polo norte celeste, dessa forma o alinhamento não fica preciso. As principais vantagens desse método são a facilidade e o baixo custo que é, em média, na ordem de US\$ 100.¹

O segundo método envolve uma luneta que permita a identificação das constelações que indicam o polo Norte/Sul (Figura 2.19). No hemisfério Norte, procura-se a estrela Polaris; no hemisfério Sul, busca-se a constelação de Sigma Octantis e o Cruzeiro do Sul. Ele é um método bem confiável, porém, no hemisfério Sul, isso normalmente é mais difícil, pois essas constelações são de alta magnitude. Isso significa dizer que possuem um baixo brilho, tornando-as difíceis de serem localizadas no céu. As lunetas buscadoras têm um custo bem variado, mas são normalmente comercializadas fora do Brasil e tem um custo que começa na casa dos US\$ 80.²

Ambos os métodos possuem a desvantagem de requerer um céu limpo na região polar (Figura 2.20) e baixos níveis de poluição luminosa para identificar as estrelas, porém, apresentam a simplicidade como vantagem. O *laser* é o menos confiável, pois existe uma defasagem entre as constelações e o polo celeste, que só é possível de ser compensado com o uso da luneta.

¹Considerando modelos pesquisados em agosto de 2021

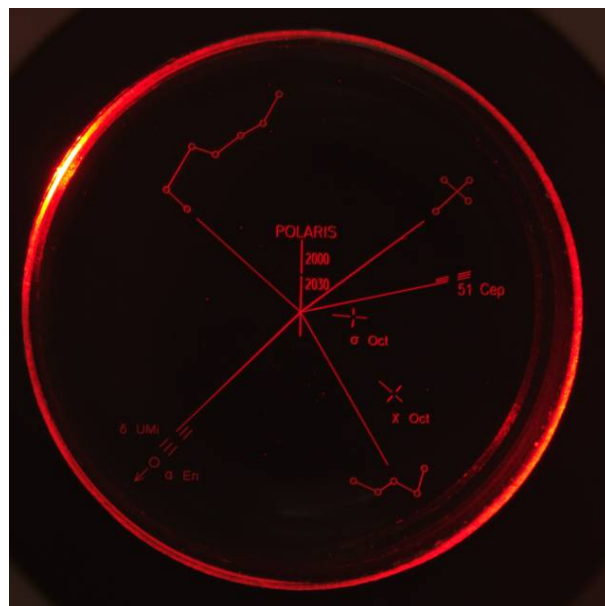
²Considerando modelos pesquisados em agosto de 2021

Figura 2.18 – Alinhamento por *laser*



Fonte: (DYER, 2019)

Figura 2.19 – Visor de uma luneta para astrofotografia, contendo marcadores para alinhar as estrelas



Fonte: (BRESSER, c2021)

2.2.2.2 Instrumentação

Através de instrumentos de medição, é possível realizar o alinhamento da plataforma equatorial separando o processo em duas etapas. Na primeira etapa é feito o ajuste do azimute para alinhar a plataforma com o polo norte geográfico. Posteriormente, ela deve ser inclinada até o ângulo referente ao polo norte celeste que é dado pelo ângulo da latitude do local onde a plataforma está localizada, realizando um ajuste de elevação.

Figura 2.20 – Alinhamento impossível sem colaboração do tempo limpo



Fonte: (EGAN, c2021b)

2.2.2.2.1 Ajuste de Azimute

O ajuste do azimute pode ser realizado com uma bússola ou um magnetômetro que possibilite indicar o polo norte magnético. No entanto, o polo norte geográfico possui uma diferença com o polo norte magnético devido à oscilação do campo magnético do planeta. Essa discrepância é chamada de declinação magnética.

Além disso, devido à inconsistência do campo magnético, o valor da declinação é diferente para cada localização do planeta, mas pode ser calculada usando modelos magnéticos globais que são o resultado de pesquisas com sensores em satélites e apresentam valores com acurácia de 0,5 graus (INFORMATION, c2021).

2.2.2.2.2 Ajuste de Elevação

O ajuste de elevação para uma determinada latitude pode ser feito através de marcações de ângulo em um eixo ou transformador (Figura 2.21), ou com sensores de posição inercial (acelerômetro e giroscópio) (OBSERVATÓRIO LUPUS, 2014). É evidente que o primeiro método não é preciso, pois depende obrigatoriamente de um bom processo de manufatura e calibração, além da falta de precisão para ângulos de latitude com valores decimais.

2.2.2.3 Método Drift

O alinhamento da plataforma com o polo celeste é fundamental para uma longa exposição usando uma lente com grande comprimento focal. Se a montagem não estiver corretamente alinhada, ela não irá conseguir impedir o surgimento de rastro na fotografia

Figura 2.21 – Marcação da latitude para ajuste de elevação



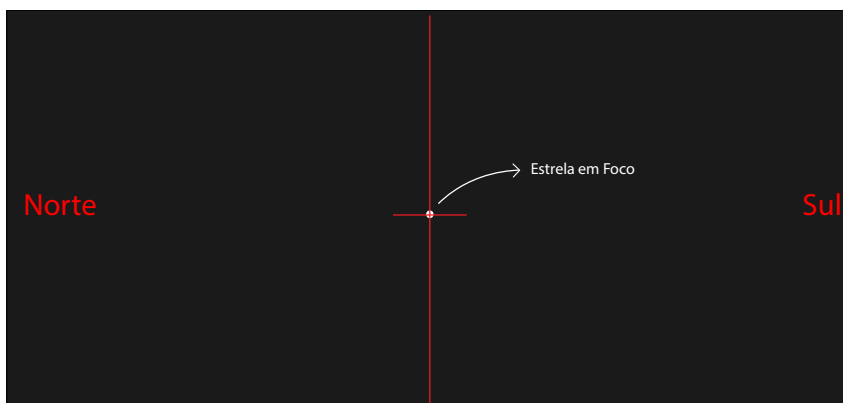
Fonte: (OBSERVATÓRIO LUPUS, 2014)

por um longo período de tempo (LOCHUN et al., 2015).

Plataformas que são alinhadas com uma luneta polar conseguem atingir normalmente 180s de exposição. Se mais tempo for necessário ou for usada uma lente com muita ampliação, então o método *Drift* de alinhamento é mandatório, ainda que, não é possível realizar esse ajuste de precisão sem que a plataforma já tenha sido previamente alinhada (LOCHUN et al., 2015).

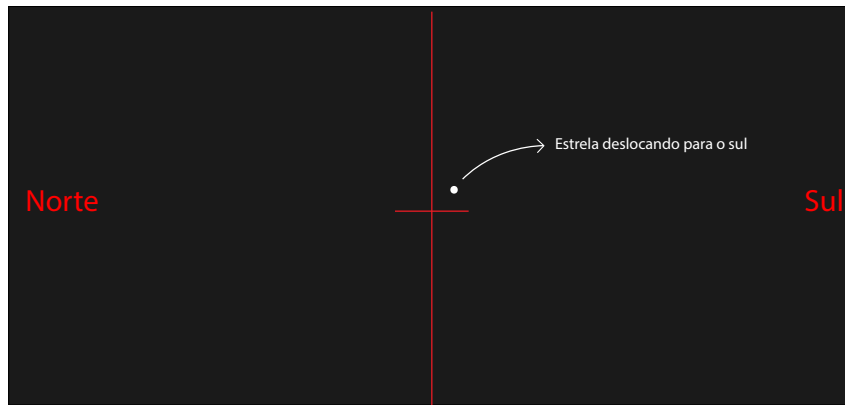
O método consiste em localizar, primeiramente, uma estrela brilhante o suficiente para visualizar no visor da câmera, e que esteja na linha do equador polar. Habilitando uma linha de grade no visor, o usuário deve alinhar a estrela escolhida de forma que fique centralizada no cruzamento da grelha (Figura 2.22) e, então, ligar o rastreador, observando se haverá movimentação da estrela para algum dos lados do visor. Na sequência, o usuário deve apontar para uma estrela ao leste ou oeste, no horizonte, e observar para qual lado (esquerda/direita ou Norte/Sul) do visor haverá fuga (Figura 2.23). O lado (esquerda ou direita) que indica Norte ou Sul depende para onde a câmera estiver sendo apontada e a orientação dela (LOCHUN et al., 2015).

Figura 2.22 – Estrela centralizada na grelha do visor da câmera



Fonte: Adaptado de (OBSERVATÓRIO LUPUS, 2014)

Figura 2.23 – Estrela apresentando fuga para a direita que, neste caso, aponta para o Sul



Fonte: Adaptado de (OBSERVATÓRIO LUPUS, 2014)

Dependendo para qual lado do visor (norte/sul) houver fuga, deverá ser feito um ajuste específico no alinhamento, que também é diferente para cada hemisfério do planeta. O fotógrafo deve saber para qual lado do visor é norte ou sul, pois será isso que determinará corretamente a correção para movimentar a plataforma (Tabela 2.1). A primeira estrela ajuda a ajustar o azimute da plataforma e a segunda colabora para uma elevação correta. Além disso, a precisão do ajuste dependerá do tempo que a estrela irá levar para sair da marcação do visor, e o processo de repete até que a estrela permaneça parada pelo tempo mínimo desejado pelo fotógrafo para a lente que estiver usando (LOCHUN et al., 2015).

Tabela 2.1 – Ajustes do método *Drift* para cada caso

Localização da estrela	Lado da Fuga	Correção (Hemisfério Sul)	Correção (Hemisfério Norte)
Meridiano	Norte	Azimute para Leste	Azimute para Leste
	Sul	Azimute para Oeste	Azimute para Oeste
Leste	Norte	Altura para cima	Altura para baixo
	Sul	Altura para baixo	Altura para cima
Oeste	Norte	Altura para baixo	Altura para cima
	Sul	Altura para cima	Altura para baixo

Fonte: Adaptado de (OBSERVATÓRIO LUPUS, 2014)

É importante ressaltar que para esse método ser possível, o tripé onde a plataforma é montada deve possuir *knobs* para ajuste mais acurado, como na cabeça de tripé da Figura 2.24, que possui um *knob* para movimentação somente de azimute, outro para movimento livre, e um terceiro para um ajuste mais preciso de ambas as posições. Além dessa, existem cabeças para filmagem que permitem um controle ainda mais suave e preciso, sendo extremamente recomendadas para esse método (Figura 2.25).

Figura 2.24 – Cabeça de Tripé com possibilidade para ajuste de precisão



Fonte: (Optison, c2021)

Figura 2.25 – Cabeça de Tripé com possibilidade para ajuste de precisão



Fonte: (Manfrotto, c2021)

2.2.3 Soluções Comerciais Existentes

Existem inúmeras soluções comerciais para o problema proposto, porém, todos usam uma luneta ou um *laser* como método de alinhamento polar. Existem produtos com diferentes especificações e orçamentos. A Tabela 2.2 ilustra alguns sistemas, dentre os disponíveis no mercado, comparando suas funcionalidades.

Contudo, na realidade brasileira, o preço mostrado passaria ainda por impostos, tornando a compra mais inviável. O Nyx Tracker (Figura 2.26) é o único da lista que possui uma estrutura de *Barn Door*, e é o sistema mais acessível, porém o método de alinhamento é de difícil execução no hemisfério sul.

2.3 OBJETIVOS

Pelo *benchmark* exposto, fixaram-se como objetivos o desenvolvimento de uma solução robusta, visualmente elegante, e que consiga se aproximar das propriedades do

Tabela 2.2 – Comparativo das Soluções de Mercado

	Nyx Tracker	iOptron	Vixen Optics	SkyWatcher
Preço (US\$)	115	299	399	299
Carga Máxima (kg)	2.25	3	2	3
Erro periódico (arcsec)	115	100	50	50
Volume (cm ²)	155	490	323	220
Peso (kg)	0,4	1,15	0,79	0,72
Alinhamento	<i>Laser</i>	<i>Polar Scope</i>	<i>Polar Scope</i>	<i>Polar Scope</i>

Fonte: Adaptado de (EGAN, c2021a)

Figura 2.26 – Nyx Tracker



Fonte: (EGAN, c2021a)

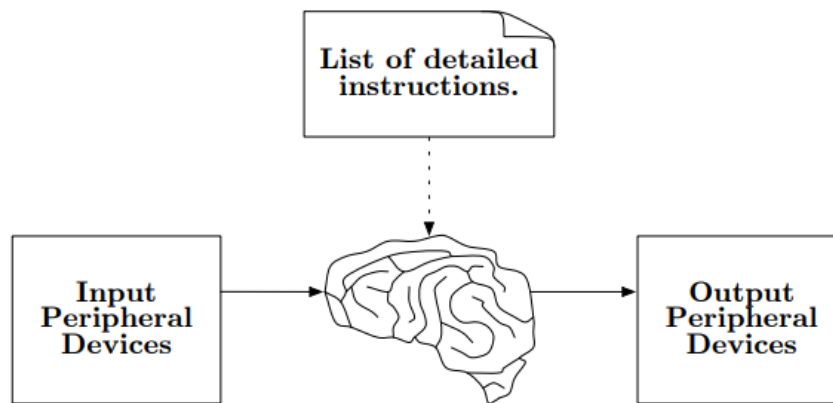
modelo comercial mais acessível, com o custo inferior a US\$115 . Além disso, deve ter como diferencial um aplicativo que permita uma fácil interação do usuário com o sistema, facilitando o processo de configuração e alinhamento polar.

2.4 SISTEMAS EMBARCADOS

Um sistema embarcado é uma eletrônica composta por um conjunto de periféricos controlados por um microcontrolador ou microprocessador (Figura 2.27) de uma forma oculta ao usuário final desse sistema. O cérebro funciona por meio de um *software*, que é um conjunto de instruções elaborado por um programador e executado em hardware (RUSSEL, 2010).

Os periféricos são o conjunto de dispositivos conectados ao controlador para executar uma leitura de dados ou ação externa. Sensores, botões e interfaces são exemplos de dispositivos periféricos para leitura de dados. Motores, LEDs e atuadores lineares são exemplos que executam uma ação ordenada. As conexões destes periféricos com os

Figura 2.27 – Visualização conceitual de um sistema embarcado.



Fonte: Adaptado de (RUSSEL, 2010)

controladores são construídas por meio de condutores e semicondutores como resistores, capacitores, transistores, diodos, etc (RUSSEL, 2010).

2.5 PERIFÉRICOS

No contexto do projeto proposto, propõe-se um sistema embarcado que utiliza sensores para realizar a leitura da posição geográfica e inercial da plataforma equatorial, e guiar o usuário para corrigi-la. Após essa correção, o usuário pode ativar um atuador que irá realizar o rastreamento do movimento aparente das estrelas no céu.

Dessa forma, é necessário a leitura de Sensores de Posição Inercia (IMU) e um sinal de GPS(Sistema de Posicionamento Global). É preciso também um motor de passo que servirá como o atuador da plataforma.

2.5.1 Motor de Passo

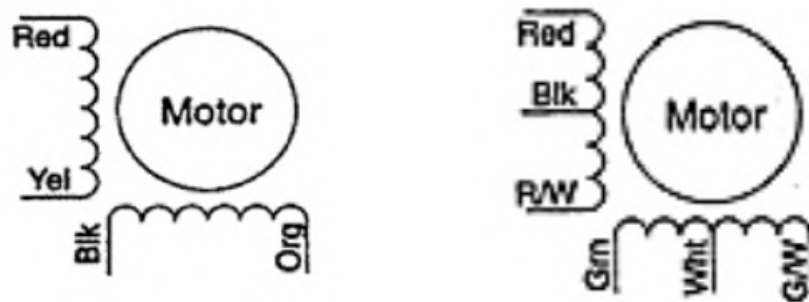
Motores de passo são um tipo de atuador comumente utilizados em aplicações de controle como impressoras 3D, máquinas CNC, entre outros sistemas que requerem uma boa precisão. Além disso, os motores de passo também possuem outros pontos fortes: não tem escovas internas que podem gerar curto circuito; não são dependentes da carga aplicada, mantendo a velocidade de rotação constante desde que o torque necessário não exceda os limites; giram em passos que são incrementados de forma constante durante a sua aplicação, possibilitando um controle preciso sem a necessidade de um sensor com *feedback*; e, por fim, conseguem manter um sistema imóvel quando estacionados (JONES, 2004).

Por esses motivos descritos, esse tipo de motor é a melhor opção para executar o controle de uma plataforma equatorial, que requer precisão com a menor oscilação possível de velocidade na abertura da plataforma. Porém, alguns fatores de construção e controle devem ser considerados na seleção de um motor e execução do controle.

2.5.1.1 Funcionamento

Existem 2 tipos mais comuns de motores (Figura 2.28): unipolar e bipolar, que se diferenciam pela forma que as bobinas são conectadas e energizadas para movimentar o rotor. No motor unipolar, cada bobina é controlada individualmente; no motor bipolar, as bobinas são agrupadas e controladas em conjunto para ganhar performance e eficiência. (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021).

Figura 2.28 – Modelos de motores: à esquerda um motor unipolar, à direita um motor bipolar

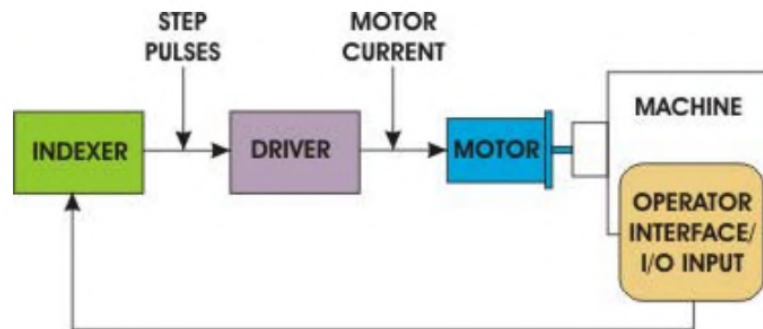


Fonte: Adaptado de (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021)

2.5.1.1.1 Driver

Para que a corrente flua pelas bobinas e seja controlada por um controlador, é preciso um *driver* que realize o chaveamento pois, normalmente, microcontroladores não conseguem fornecer corrente para energizar um motor de passo. Os *drivers* são circuitos integrados com transistores e obedecem cada um um princípio de funcionamento que é adequado para um dos tipos de motores (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021). O diagrama do controle de um motor pode ser simplificado como demonstra a figura 2.29.

Figura 2.29 – Diagrama de controle de um motor de passo



Fonte: Adaptado de (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021)

2.5.1.2 Torque

Torque é a força que um motor consegue aplicar no eixo de rotação. Normalmente, motores de passo tem diferentes valores de torque que os caracterizam para cada situação de aplicação e são descritos pelos fabricantes (JONES, c2004). Além disso, é preciso manter-se atento ao consumo necessário; quanto maior o torque exigido do motor, maior será a corrente que ele irá demandar para conseguir movimentar o rotor.

- *Holding torque* – Torque mínimo para girar o eixo do motor enquanto os enrolamentos são energizados.
- *Pull-in torque* – Máximo suportado para iniciar a rotação dos eixos, sem perder passos, e em uma aceleração constante.
- *Pull-out torque* – Máximo suportado quando já estiver rotacionando.
- *Detent torque* – Torque necessário para tirar o eixo da inércia.

2.5.1.3 Tamanho do Passo

Cada sinal que é enviado ao motor faz com que o rotor gire 1 passo. Esse tamanho de passo é uma característica de cada atuador e define a resolução mínima de movimento angular que o eixo consegue realizar. Essa característica é importante pois quanto maior a precisão da aplicação, maior deve ser o número de passos no motor. Por exemplo, um motor que contenha 200 passos consegue ter uma precisão de $360^\circ \div 200 = 1,8^\circ$

Apesar da precisão dos motores, é possível que ocorram erros ao rotacionar em cada passo. Esses problemas derivam de falhas mecânicas inerentes aos mecanismos

internos do motor e não são cumulativas, oscilam de 3 a 5% de erro no deslocamento (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021).

2.5.1.4 Formas de Controle

Existem 3 diferentes abordagens para realizar o chaveamento das bobinas de um motor de passo: *Full Step*, *Half Step* e *Microstep*. Essas técnicas são aplicáveis a qualquer tipo de motor.

2.5.1.4.1 Full Step

Essa é a forma mais simples de controlar o motor, para cada pulso do controlador, uma bobina é ativada completamente e isso é alternado ao longo do tempo (Tabela 2.3). Nesse modo, o motor consome mais corrente, oferece mais torque e gera mais ruído. Além disso, considerando o exemplo de motor da seção anterior, com 200 passos, o controlador irá precisar emitir 200 pulsos no *driver* para que o motor dê um giro de 360 graus (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021).

Passo	B.1	B.2	B.3	B.4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Tabela 2.3 – Sequência de acionamentos das bobinas do motor pelo microcontrolador no modo *Full Step*

2.5.1.4.2 Half Step

Um controle *Half Step* proporciona uma queda de ruído e ganhos de eficiência, porém reduzindo o torque máximo do motor. Essa abordagem funciona subdividindo as etapas de controle no modo *Full Step*, consumindo 400 pulsos do controlador que acionam 2 bobinas para cada pulso, com um sinal intermediário acionando somente uma bobina (Tabela 2.4) (ADVANCED MICRO SYSTEM, c2021).

Passo	B.1	B.2	B.3	B.4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Tabela 2.4 – Sequência de acionamentos das bobinas do motor pelo microcontrolador no modo *Half Step*

2.5.1.4.3 Microstep

Uma abordagem de *Microstep* busca suavizar ainda mais o controle do motor para reduzir o ruído e ganhar eficiência ao custo de perder torque. Esse método subdivide o controle em ainda mais etapas, requerindo *drivers* especializados que podem energizar as bobinas de forma suave ao longo do tempo.

2.5.2 GPS

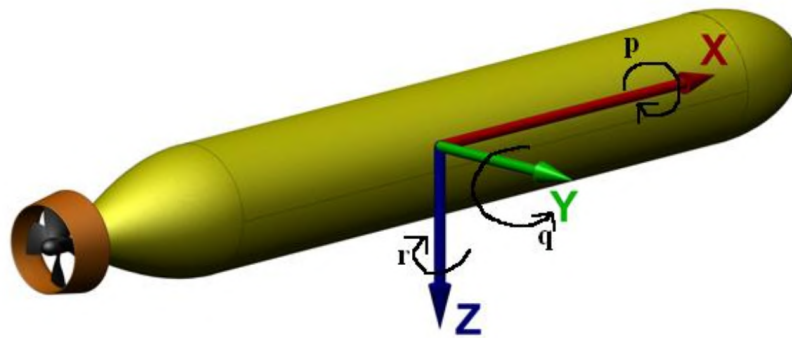
O GPS (*Global Positioning System*) é um sistema navegação por rádio que recebe informações via satélite para determinar a posição global de um objeto (JAUCH; SILVA; PAZ, 2014). Atualmente, todo *Smartphone* ou aparelho celular contém um circuito capaz de realizar a leitura do sinal GPS e determinar sua localização atual. No entanto, a precisão da localização depende de um bom sinal com os satélites, podendo ser poucos metros de erro.

O valor retornado pelo GPS pode ser dado em coordenadas geográficas ou em UTM (*Universal Transversa de Mercator*) que é um sistema de coordenadas planas. As coordenadas geográficas podem ser expressadas em: graus-minutos-segundos ($ggg^{\circ}mm''ss,s$); graus-minutos-decimais ($ggg^{\circ}mm,m''$); graus-decimais (ggg,g°) (JAUCH; SILVA; PAZ, 2014).

2.5.3 Sensores de Posição Inercial

A posição de uma plataforma qualquer pode ser descrita por um sistema de coordenadas. Um padrão muito comum é o sistema RPY (*Roll - Pitch-Yaw*) que expressa a posição por meio dos 3 ângulos posicionais do objeto (Figura 2.30) (ZANONI, 2012). Os 3 ângulos são relativos a um dos 3 eixos x, y ou z e podem ser traduzidos, respectivamente, para ângulo de rolagem, arremesso e guinada.

Figura 2.30 – Sistema de ângulos *Roll(p)*-*Pitch(q)*-*Yaw(r)* em um objeto qualquer



Fonte: (ZANONI, 2012)

Para aferir esses ângulos, em um sistema qualquer, é necessário o uso de sensores de posição inercial (IMU). Existem 3 modelos principais que são comumente usados de forma integrada para fornecer o máximo de precisão possível: Acelerômetro, Giroscópio e Magnetômetro. Todos esses serão obrigatórios para desenvolvimento do projeto proposto.

2.5.3.1 Acelerômetro

Acelerômetros são sensores que medem a aceleração de um sistema linearmente em relação a um eixo. Todas as forças envolvidas são mensuradas, como por exemplo a aceleração da gravidade (ZANONI, 2012), e o valor é dado em G ou (m/s^2) . Por meio da força da gravidade, é possível decompor os vetores de força medindo a aceleração nos 3 eixos principais, e por meio disso calcular os ângulos inerciais de um objeto.

2.5.3.2 Giroscópio

Giroscópios são sensores capazes de medir a velocidade a variação angular de um corpo que gira em torno de um eixo e é mensurado em $(^\circ/s)$ (ZANONI, 2012). Um giroscópio microeletrônico é um Sistema Micro Eletro Mecânico (MEMS) que consiste em um ressonador, que vibra dentro de um espaço entre bases de apoio, detectando uma alteração na ressonância de acordo com o efeito de aceleração angular. Para obter o ângulo inercial de um objeto, considerando um giroscópio para cada eixo de rotação, é preciso integrar(somar) os valores de velocidade angular medidos ao longo do tempo (LAGE, 2016).

2.5.3.3 Magnetômetro

Magnetômetros são sensores capazes de medir a intensidade do campo magnético em um eixo. Quando 3 magnetômetros são unidos para medir a intensidade, um eixo cada, é possível determinar a direção e o sentido do campo magnético (MOURA, 2013). Esses sensores são utilizados em pesquisas para verificar a intensidade do campo magnético terrestre, por exemplo. É por meio desse IMU que é possível construir uma bússola digital para realizar o alinhamento de um sistema para o polo norte/sul magnético do planeta.

2.6 PROCESSAMENTO DE DADOS

Infelizmente, os dados brutos fornecidos pelos sensores IMU, descritos nas seções anteriores, precisam passar por etapas de pós processamento, seja em hardware ou software, para que estejam livres de informações não desejadas, como ruídos. Além disso, é preciso transformar os dados de aceleração, velocidade e intensidade de campo magnético para determinar corretamente os ângulos de uma plataforma no sistema RPY.

A partir do entendimento dos erros comuns em sensores IMU, é possível descrever boas práticas de análise e filtragem desses sinais. Uma abordagem secundária é realizar um pós processamento para combinar os valores de aceleração, velocidade angular e intensidade de campo magnético para que um sensor consiga compensar os erros dos demais, e obter um resultado mais preciso (WOODMAN, 2007).

2.6.1 Erros comuns em sensores IMU

Sensores Inerciais não são totalmente exatos, independente do seu padrão de qualidade, e podem carregar erros que corrompem um sistema de orientação do objeto que deseja-se medir. É preciso investigar a fonte dos erros, e compensar eles em possíveis modelagens matemáticas (ZANONI, 2012).

Erros gerados por imperfeições nos sensores são determinísticos e podem ser identificados e corrigidos na sua calibração, e a qualidade disso depende de cada fabricante. Mas além desses erros existem outros distúrbios aleatórios que devem ser levados em conta no processo: *Bias*, Ruído Branco e Efeitos de Temperatura.

- **Bias:** Sensores IMU possuem um erro de *offset* que é chamado de bias. Esse erro acompanha o valor bruto do sensor e pode gerar incongruências nas medições de ângulos. Em um giroscópio, quando a velocidade angular é integrada para calcular o ângulo de posição resultante, todos os erros ao longo do tempo acabam sendo somados e agregados no valor final (WOODMAN, 2007).

- **Ruído Branco:** esse tipo de erro é um ruído que acompanha o sinal de saída e pode ter origem no ambiente ou circuito do IMU. É um ruído que interfere em todo espectro de frequência e pode ser minimizado utilizando filtros passa-baixa, passa-faixa ou passa-alta (ZANONI, 2012).
- **Efeitos de temperatura:** Todo acelerômetro e giroscópio é suscetível a uma não linearidade no efeito Bias devido a flutuações na temperatura. Contudo, é possível realizar calibrações para que o erro seja minimizado e isso requer um sensor de temperatura acoplado com o IMU (WOODMAN, 2007).

2.6.2 Filtro Passa Baixa

nyquist e utilidade do passa baixa dentro do escopo do projeto

2.6.3 Filtro Complementar

utilização dos valores de acelerometro e giroscópio para cálculo de pitch e roll (LAGE, 2016)

2.6.4 Magnetômetro como uma Bússola

calculado do yaw e calibração do magnetômetro

2.7 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO SERIAL

O sensores e atuadores explicados nas seções anteriores podem se comunicar com os controladores através de protocolos de comunicação específicos. Esses modelos funcionam como uma linguagem para aceder as informações, sendo fundamentais para a diagramação do sistema eletrônico em *hardware* e *software*. Por meio dessas redes, um controlador consegue realizar a leitura dos dados armazenados no registrador de um sensor, por exemplo, ou escrever uma nova calibração em outro local da memória (VALDEZ JONATHAN; BECKER, 2015).

2.7.1 UART

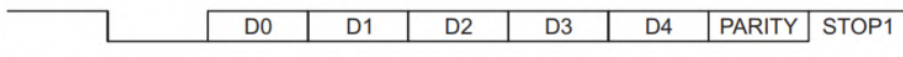
O protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) é uma forma de comunicação baseada em padrões industriais. Nesse protocolo há somente duas linhas: receptor(RX) e transmissor(TX) que utilizam de uma taxa de transmissão referência (*baud rate*) para que haja o correto processamento bit a bit do que é comunicado via protocolo (TEXAS INSTRUMENTS, 2010).

As mensagens enviadas possuem limite na velocidade que depende do *clock* do controlador que está sendo utilizado. Além disso, baseado nas configurações dos dispositivos, as mensagens são enviadas no seguinte pacote (Figura 2.31):

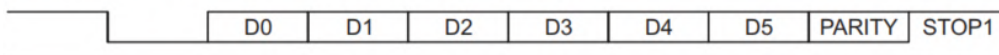
- 1 *START bit*
- 5, 6, 7, ou 8 *data bits*
- 1 *PARITY bit* (opcional)
- 1, 1.5, ou 2 *STOP bits*

Figura 2.31 – Exemplos de comunicação UART

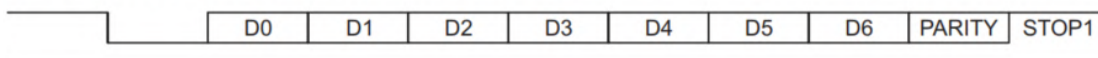
Transmit/Receive for 5-bit data, parity Enable, 1 STOP bit



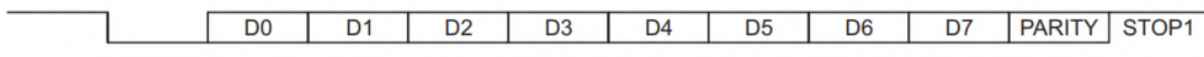
Transmit/Receive for 6-bit data, parity Enable, 1 STOP bit



Transmit/Receive for 7-bit data, parity Enable, 1 STOP bit



Transmit/Receive for 8-bit data, parity Enable, 1 STOP bit



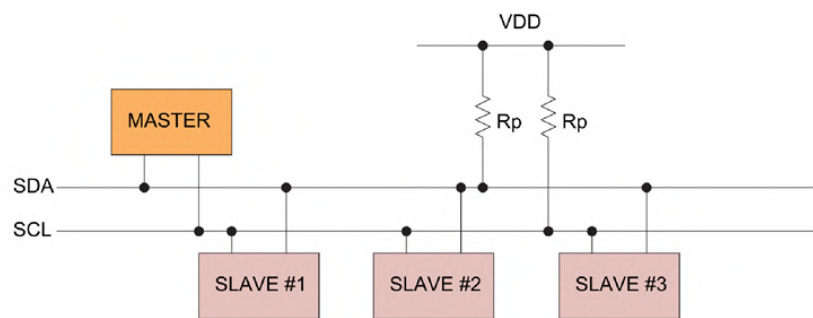
Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2010)

Os pinos de comunicação UART são conectados ligando-se o pino RX de um dispositivo no TX do outro. O design do hardware dessas linhas de comunicação é um pouco mais livre, mas recomenda-se manter a indutância tão baixa quanto possível, além de rotear as trilhas de comunicação afastadas das fontes de ruído (PETERSON, 2020).

2.7.2 I2C

A rede I2C (*Inter-Integrated Circuit*) é um protocolo padrão e popular, usado para comunicação entre mestre(s) e escravo(s) (Figura 2.32). Para a comunicação ocorrer, o mestre deve ordenar quando e o que será transmitido pelos escravos. Nesse procedimento, o mestre sempre especifica o endereço do escravo que ele deseja ler ou escrever alguma informação nos seus registradores, esses endereços são um valor de 0 a 127 e 2 escravos não devem partilhar o mesmo valor. (VALDEZ JONATHAN; BECKER, 2015). A rede permite diversos modos de comunicação, que se diferenciam pela velocidade da transmissão de dados. Os mais comuns são de 100 kbit/s (Standard Mode), 400 kbit/s (Fast Mode) ou 3.4 Mbit/s (Fast Mode Plus). Contudo, nem todos os dispositivos que aceitam o protocolo I2C irão suportar todos os modos obrigatoriamente.

Figura 2.32 – Topologia de uma rede i2c com 1 mestre e 3 escravos conectados as linhas SDA e SCL, ambas com resistores de *pull-up*



Fonte: Adaptado de (AFZAL, c2021)

Para funcionar, o protocolo I2C precisa de 2 linhas: *Serial Data* (SDA) e *Serial Clock* (SCK) (Figura 2.32). Essas linhas precisam estar conectadas com a alimentação do sistema, que deve ser de 5V, por meio de um resistor *pull-up*. O valor mínimo dele é calculável com a equação (2.4), considerando V_{OL} e I_{OL} a tensão e corrente máxima para que os circuitos consigam realizar a leitura de um nível lógico válido (ARORA, 2015).

$$R_P(min) = \frac{V_{CC} - V_{OL(max)}}{I_{OL}} \quad (2.4)$$

Contudo, existe um valor limite para o resistor, que é determinado pelo total da capacitância entre as linhas. Esse fator altera o tempo de alternância entre um nível lógico alto e baixo, que deve estar dentro padrões da rede. Esse tempo máximo depende da taxa de transmissão, ou modo da rede. Assim, $t_r = 1000$ (Standard Mode), $t_r = 300$ (Fast Mode) e $t_r = 120$ (Fast Mode Plus). Esse valor máximo é determinado pela equação (2.5) (ARORA, 2015).

$$R_P(max) = \frac{t_r}{0.8473 \times C_b} \quad (2.5)$$

A transmissão de dados se inicia quando a rede está em *idle*, ou seja, ambas as linhas devem estar em nível lógico alto após uma condição de STOP (nível lógico baixo). Dessa maneira, considerando 2 cenários possíveis, a comunicação pode ser prosseguida das seguintes formas: o mestre deseja escrever ou alterar dados no escravo; o mestre deseja ler dados de um escravo (VALDEZ JONATHAN; BECKER, 2015).

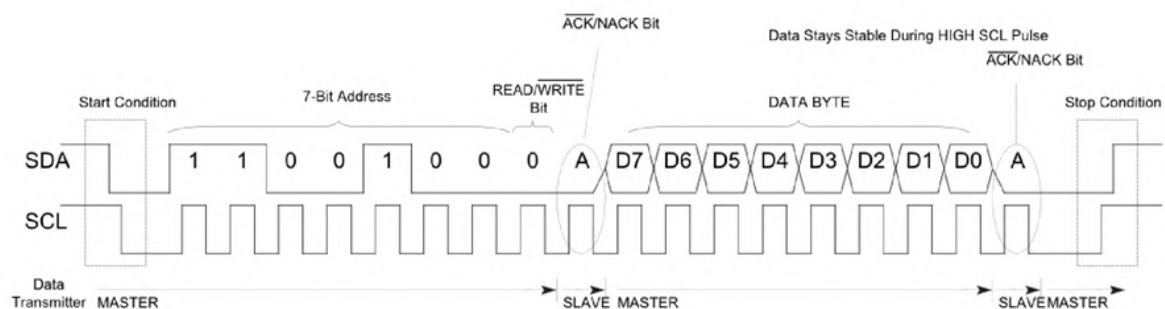
1. Para o primeiro caso (Figura 2.33):

- Mestre transmite uma condição de *START* e envia o endereço do escravo com quem quer se comunicar.
- Mestre envia os dados.
- A transferência se encerra com um sinal de *STOP* do mestre

2. Para o segundo caso (Figura 2.34):

- Mestre transmite uma condição de *START* e envia o endereço do escravo com quem quer se comunicar.
- Mestre solicita uma leitura de dados no registrador do escravo
- Escravo envia os dados para o Mestre
- Mestre encerra a transmissão com sinal de *STOP*

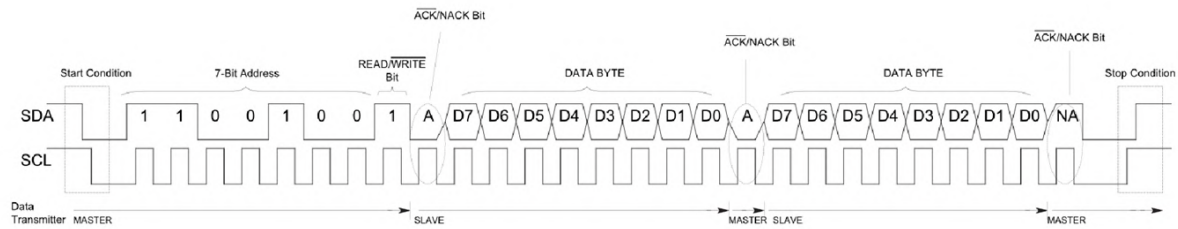
Figura 2.33 – Transmissão de dados do mestre para o escravo



Fonte: Adaptado de (AFZAL, c2021)

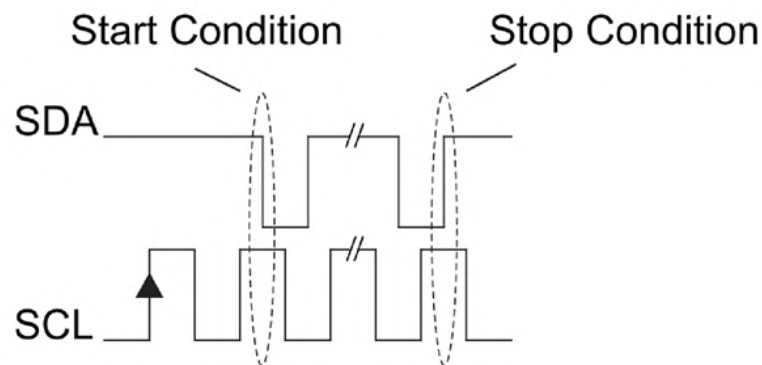
As condições de *START* e *STOP* são descritas sempre pelo mestre. Essas duas condições são situações específicas na rede, pois são o único momento da transmissão em que a linha SDA é alterada *enquanto* o *clock* na linha SCK está em nível lógico alto. No caso de uma situação de *START*, a linha SDA altera do nível lógico alto para o baixo, e o inverso ocorre na situação de *STOP* (Figura 2.35) (AFZAL, c2021).

Figura 2.34 – Requisição de dados do mestre ao escravo



Fonte: Adaptado de (AFZAL, c2021)

Figura 2.35 – condições de *START* e *STOP* no padrão I2C



Fonte: Adaptado de (AFZAL, c2021)

Para cada conjunto de dados enviados, um bit *ACK* (*acknowledgement*) é enviado na sequência - lido como um nível lógico baixo - enviado pelo receptor da mensagem, comunicando o correto recebimento e permitindo uma nova transmissão. Esse bit é enviado imediatamente após a comunicação, e o transmissor deve liberar a linha SDA para que o receptor possa enviar a mensagem (VALDEZ JONATHAN; BECKER, 2015).

Devido ao controle de impedância e capacitância, recomenda-se que o roteamento físico desses sinais, em uma placa de circuito, não seja longo. Quanto maior a velocidade de comunicação, menor deve ser a distância entre os dispositivos I2C, afastando-os também de sistemas que possam causar interferência eletromagnética (PETERSON, 2020).

2.7.3 Bluetooth

Bluetooth é um protocolo de comunicação sem-fio e de curto alcance. Esse sistema é uma tecnologia adequada para sistemas embarcados por apresentar um baixo custo e consumo, provendo fácil conectividade sobretudo nas versões mais recentes do protocolo (TAKAHASI, 2003).

O fator baixo consumo aumenta a economia de energia e limita o alcance da conexão a depender da classe do dispositivo. Para um dispositivo Classe 3, com 1mW de potência, o alcance será de até 1m; classe 2, com até 10mw, alcance de 10m; classe 3, com até 100mW, total de 100m (TIER, 2019).

A tecnologia *wireless bluetooth* especifica um modelo de comunicação síncrono entre somente um par de dispositivos com a banda de 2.4GHz a 2.5 GHz dividida igualmente entre eles. Esse padrão já é geralmente usado para sistemas de localização, transferência de áudio, e dados de forma geral (MULLER, 2000).

Nesse protocolo, cada dispositivo possui um endereço MAC (*Media Access Control* ou Controle de Acesso de Mídia) que distingue-os, sendo gravado fisicamente no hardware. Aquele que solicita a comunicação passa a ser o mestre de uma relação mestre/escravo, que também é *full-duplex* (TAKAHASI, 2003).

Quando 2 ou mais dispositivos se conectam via *Bluetooth*, 1 deles será o mestre e será formada uma *Bluetooth Wireless Personal Area Network* (BT-WPAN). Será classificada como *piconet* para até 8 dispositivos conectados e *scatternet* caso duas redes *piconet* se comuniquem por meio de um dispositivo escravo de cada uma (TIER, 2019).

2.7.3.1 *Bluetooth Low Energy*

Bluetooth Low Energy (BLE) é uma versão da tecnologia otimizada para baixo consumo e é atualmente muito utilizado em *smartphones*. Para que a tecnologia funcione, otimizando a comunicação, é definido um protocolo para diferentes perfis com atributos genéricos de dispositivos (GATT do inglês *Generic Attribute Profile*). Os perfis GATT correspondem a serviços e características (BLUETOOTH, 2019).

Os serviços servem para caracterizar os conjuntos de dados, por exemplo um sensor de batimento cardíaco. A característica do perfil define uma propriedade ou configuração da informação. Em uma analogia, o GATT é como entrar em uma sala de armazenamento com vários armários e cada armário com várias gavetas. Nesse caso, os serviços são os armários e as gavetas são as características com as informações dos dispositivos (DEVZONE, 2018).

Na comunicação, todas essas informações são identificadas por um código único, ou *Universally Unique ID* (UUID). Esse é um valor que identifica o tipo de dispositivo com o qual um *smartphone*, por exemplo, está se comunicando, e descreve todas as informações mencionadas anteriormente. Existem padrões UUID de 16 bits como para o caso do sensor de batimento cardíaco. Mas para dispositivos que não seguem um padrão, existem UUIDs de 128 bits que servem para caracterizar serviços específicos em aplicações únicas (DEVZONE, 2018). Por meio desses UUIDs que um dispositivo consegue reconhecer qual o tipo de dado que está sendo comunicado, e assim o protocolo pode se otimizar para

melhor atender a demanda da comunicação.

2.8 INTERFACE GRÁFICA

Para que um sistema embarcado se torne amigável para um usuário comum, é preciso uma interface gráfica que sintetize as informações e forneça formas de controle do usuário para a plataforma. Exemplos de interfaces podem ser simples botões, LEDs ou também um aplicativo para *smartphone*. Contudo, independente do nível de complexidade, toda interface deve se ater a princípios em sua elaboração, para que se tornem entendíveis pelo maior número possível de usuários.

2.8.1 Princípios e Diretrizes

Os princípios e as diretrizes comumente utilizados em interfaces humano-computador giram em torno dos seguintes tópicos: correspondência com as expectativas dos usuários; simplicidade nas estruturas das tarefas; equilíbrio entre controle e liberdade do usuário; consistência e padronização; promoção da eficiência do usuário; antecipação das necessidades do usuário; visibilidade e reconhecimento; conteúdo relevante e expressão adequada; e projeto para erros (BARBOSA et al., 2021). Esse conjunto de princípios são conhecidos como heurística de Nielsen, pois são aplicáveis em qualquer sistema, independente de casos específicos.

2.8.1.1 *Visibilidade dos status do sistema*

O sistema deve sempre manter o usuário atualizado sobre as condições de operação com uma taxa de atualização condizente para a informação. Ao informar o status da bateria, por exemplo, o usuário do *smartphone* consegue prever quanto tempo de uso ainda terá e irá conseguir manejar sua interação com base nessa previsibilidade (NIELSEN, 2020).

2.8.1.2 *Comunicar-se com o mundo real*

O Projeto tem que se comunicar com o usuário na língua do usuário. Se um brasileiro não sabe inglês, ele "ficará perdido" nos Estados Unidos. Da mesma forma, o desenvolvedor não pode assumir que o usuário entenderá o aplicativo somente pelo fato de

desenvolvedor ter feito algo que ele próprio entenda. É sempre recomendado conferir a linguagem do sistema com um conjunto grande de pessoas para evitar mal entendidos.

Quando o usuário não entende a língua do sistema, ele se sente afastado e irá deixar de usar a plataforma. É interessante que a plataforma tenha *designs* semelhantes com objetos do mundo real, dessa forma, o usuário se sente "contemplado" e consegue facilmente fazer a conexão entre o mundo real e a plataforma (KALEY, 2018).

2.8.1.3 *Liberdade de Controle do Usuário*

Por vezes, a pessoa que está realizando um processo em um sistema pode cometer um engano. Esse evento pode levar a situações de erro que não devem comprometer a experiência. Por isso, os usuários precisam de uma “saída de emergência” claramente marcada para sair do estado indesejado. Isso reduz a sua ansiedade e o medo de errar, pois ele sabe que os erros podem ser contornados (BARBOSA et al., 2021).

2.8.1.4 *Consistências e Padrões*

É importante que o sistema mantenha uma consistência entre suas telas, ou mesmo em grandes plataformas, ou seja, que os múltiplos programas tenham o mesmo padrão, com funções localizadas no mesmo lugar, com nomes similares e com um *disign* similar. Exemplo disso são as telas dos aplicativos do Google Docs: todos possuem o mesmo estilo de menu. Idem para o Microsoft Office.

A consistência também se estende aos ícones. O ícone que representa um botão, por exemplo, é importante que seja consistente em estilo com os demais. Eles podem ser mais preenchidos, *clean*, neutros ou suaves. O que importa nesse caso, é que sejam todos padronizados (HARLEY, 2014).

2.8.1.5 *Prevenção de erros*

Uma forma de prevenção é oferecer sugestões numa caixa de pesquisa, por exemplo. Em situações de rotina, como disparar um lembrete, a tela de criação pode oferecer uma sugestão padrão de um modelo que faça sentido para o usuário. Para evitar corrupção de dados pelo usuário durante o cadastro, é possível sugerir ao usuário o preenchimento de números de forma truncada, fazendo o pós-processamento para ler o número corretamente.

2.8.1.6 Relembrar o usuário é mais fácil do que o usuário relembrar

Quando o usuário precisa repensar sobre algo incomum na memória, ele despende muito tempo. Então, quando a plataforma exige uma lembrança do usuário para entender algo, isso limita a experiência e incorre em perda de tempo ou confusão.

Por isso, é mais interessante realizar a exigência com uma possível sugestão de resposta correta. A reconhecimento de algo é muito mais prática para a mente humana, pois ao mostrar para o cérebro algo relacionado com o que precisa lembrar-se, dispara-se a memória de forma mais efetiva. Dar uma pista para o cérebro é mais eficiente do que simplesmente perguntar sem oferecer nada (BUDI, 2020).

2.8.1.7 Torne o sistema flexível e eficiente

Atalhos, personalização e customização. Com esses fatores é possível melhorar a usabilidade para aqueles que não são mais novatos no *software* e isso ajuda a manter esses usuários ativos. Um fotógrafo experiente, que está acostumado com os atalhos de teclado nos aplicativos da Adobe, teria muita dificuldade se o teclado viesse a falhar, pois a mente já assimilou os atalhos mais usados e eles fazem diferença na velocidade com que o profissional interage com o software (LAUBHEIMER, 2020).

2.8.1.8 Tenha um projeto minimalista

Um projeto é minimalista significa usar elementos simples num arranjo onde desenho e a interface combinem de forma agradável sem chamar a atenção de forma desnecessária, colaborando com que o usuário foque somente naquilo que é necessário (NIELSEN, 2020).

2.8.1.9 Ajude o usuário a entender e se recuperar de erros

O usuário precisa entender quando o sistema não está funcionando bem e como fazê-lo voltar à normalidade. As mensagens de erro devem ser expressas de uma forma simples, indicando o possível problema e a solução. Cores vermelhas e pretas ajudam a demonstrar o sinal de erro para o usuário (LAUBHEIMER, 2015).

2.8.1.10 Tire dúvidas e documente o sistema

Existem duas formas de ajudar o usuário e tirar suas dúvidas. A primeira é de forma proativa, onde a aplicação guia o usuário para se familiarizar com a interface. Outra forma é por uma seção com perguntas e respostas, a qual ajuda os usuários a se tornarem mais independentes com a aplicação, resolvendo seus próprios problemas e filtrando os casos que precisam de suporte para a equipe técnica da plataforma (JOYCE, 2020).

2.8.2 Android

Para desenvolver o aplicativo de controle que o usuário final irá utilizar no processo de alinhamento da plataforma, será usado o *framework Android*, da Google.

2.8.2.1 Ambiente de Desenvolvimento

O *Android Studio* é o ambiente de desenvolvimento integrado oficial para a criação de aplicativos *Android* e é baseado no *IntelliJ IDEA*. Ele oferece uma série de Recursos que possibilitam a confecção de um aplicativo: Sistema de compilação flexível baseado em *Gradle*; Um emulador rápido com suporte a vários recursos; ambiente unificado que possibilita o desenvolvimento para qualquer dispositivo *Android*, incluindo relógios e televisões; integração com *GitHub* para *backup* e documentação do código; entre outras funções que possibilitam analisar o desempenho de um aplicativo em tempo real, bem como fazer *updates*. (GOOGLE DEVELOPERS, 2021)

2.8.2.2 Linguagens de Programação

Existem soluções de desenvolvimento *Android* mais *user-friendly* como *APP Inventor* ou *Kodular*, porém, essas interfaces não garantem ao desenvolvedor um pleno controle do aplicativo, e muitas vezes acabam limitando o projeto da interface. Por isso, usar linguagens de programação nativas é uma abordagem mais interessante para aplicativos mais completos. É possível criar aplicativos com diversas linguagens, mas somente duas são nativas e permitem realizar aplicações que podem usar de todo o poder de processamento de um *smartphone*: Java e Kotlin.

Em 2017, *Kotlin* foi definido pela Google como sendo a principal linguagem de desenvolvimento *Android*. Ela é muito mais nova que Java, sendo desenvolvida em pela JetBrains. A grande motivação de se usar *Kotlin* para o desenvolvimento reside no fato de

ser uma linguagem segura para prevenção de objetos nulos, operando em paralelo com qualquer código em Java e dando opções de co-rotinas. Além disso, ao comparar dois códigos com a mesma função, um escrito em Java, outro em *Kotlin*, o segundo pode ser até 40% mais compacto, o que implica em uma linguagem mais concisa e compreensível entre desenvolvedores. A desvantagem de se usar *Kotlin*, para este trabalho, é somente a falta de uma comunidade grande, comparando com Java, o que limita o suporte para eventuais problemáticas de desenvolvimento (REDKA, 2021).

Dentro do ambiente de desenvolvimento usa-se também linguagem de arquivos XML para a criação de interfaces gráficas (*layouts*), bem como a escrita dos vetores, animações, e arquivos de configuração do aplicativo e temas de *layout*. Para armazenamento de dados dentro do aplicativo, normalmente usa-se um banco de dados que é operado com códigos de consulta *SQL*.

2.8.2.3 *Material Design*

Existem uma série de diretrizes de projeto fornecidas pela Google para guiar o desenvolvimento de aplicativos *Android*. Essas informações são fornecidas principalmente pela biblioteca *Material Design*, que fornece pacotes facilmente implementáveis de *layouts* para aplicações responsivas e padronizadas.

A biblioteca colabora com o desenvolvedor fornecendo ícones, tipografia, cores e componentes gráficos que trazem uma imersão para o usuário de forma simples e minimalista. Os *designs* se inspiram no mundo real, facilitando a comunicação com o usuário (MATERIAL FOUNDATION, 2021).

2.8.3 **Usuários**

O objetivo deste trabalho possui um nicho muito específico de usuários: astrofotógrafos. Dentro desse grupo de pessoas, é possível abstrair uma série de expectativas e necessidades a respeito desse sistema e, mais especificadamente, de uma interface. Para entender o ponto de vista dos possíveis usuários é preciso criar pesquisas buscando uma coleta de dados relevantes para o projeto.

No entanto, é importante destacar que o termo 'usuário' não diz respeito somente a um astrofotógrafo que realmente irá usar a plataforma, seja ele, não só um usuário ativo(primário), ou um ocasional(secundário), mas também pessoas entusiastas que acompanham a astrofotografia e são chamados de *stakeholders* (BARBOSA et al., 2021).

A partir da análise feita com a coleta de dados inicial, é possível determinar as exigências de software (e também hardware) que implicam na melhor usabilidade da pla-

taforma equatorial. E ressalta-se a importante dos testes, não somente em código, mas também com múltiplos usuários, fazendo uma análise de possíveis problemas de interface.

3 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA

3.1 HARDWARE

3.1.1 Módulos Comerciais

3.1.1.1 Módulo Bluetooth HC05

Justificativa, limitações, pinagem

3.1.1.2 Módulo de sensores GY87

Pinagem

Sensores MPU6050 e HMC

Enderaçamento na rede, velocidades suportadas, filtragem de dados, cálculo dos ângulos.

3.1.2 Motor 28BYJ-48

Justificativa: preço, uso em soluções comerciais.

3.1.2.1 Driver ULN2003

Acionamento escolhido, velocidade e torque

3.1.3 Placa de Circuito Impresso

3.1.3.1 Diagrama Elétrico

3.1.3.2 Layout

3.1.3.3 Manufatura

Foto da placa

3.2 PROJETO ESTRUTURAL

3.2.1 Requisitos de Projeto

Vibração, constância na velocidade, resistência para proteção dos equipamentos.

3.2.2 Peças

3.2.2.1 Frame Principal

3.2.2.2 Engrenagens

Cálculo das dimensões das engrenagens, passo, etc.

3.2.2.3 Barra de Elevação

Dimensionamento

3.2.3 Manufatura

CNC Foto das peças.

3.2.4 Montagem

Observações da montagem, elásticos, etc.

4 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO

4.1 NECESSIDADES DOS USUÁRIOS

Descrever as necessidades e requisitos mínimos da aplicação. Casos de uso.

4.2 PROTOTIPAÇÃO DAS TELAS

Escrever sobre a prototipação no Adobe XD

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO APLICATIVO ANDROID

4.3.1 Requisitos de Sistema

Requisitos de Sistema, versão mínima do Android, permissões exigidas pelo usuário, etc.

4.3.2 Arquitetura do Funcionamento

4.3.2.1 Activity

4.3.2.2 Room Database

Base de dados criadas e valores armazenados

4.3.2.3 Fragments

4.3.2.3.1 View Model

Databinding

4.3.2.4 Protocolo de Comunicação Bluetooth

Diagrama de comunicação, comandos, timeout, checagem de dados, buffer e delay, taxa de atualização e limitações.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

5.1.1 Método

5.1.2 Discussão

5.2 CUSTO TOTAL DO SISTEMA

5.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO APLICATIVO

5.4 FOTOGRAFIAS

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 PROJETO *OPEN-SOURCE*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCED MICRO SYSTEM. **Stepper Motor System Basics**. [S.l.], c2021. 9 p.

AFZAL, S. **I2C Primer**. Analog Devices, c2021. Acessado em 13 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>>.

ALVES, V. **Tipos de máquinas fotográficas**. 4. ed. [S.l.], 2018. 54 p. Acesso em 12 jul. 2021. Disponível em: <<https://fotografiadicas.com.br/wp-content/uploads/2018/07/Tipos-de-M%C3%A1quinas-Fotogr%C3%A1ficas-Fotografia-Dicas-4a-Ed.pdf>>.

ANDOLFATO, R. **Astrofotografia Prática: O guia da Fotografia do Universo**. Brasil: Clube de Autores, 2017. 454 p.

ARORA, R. **I2C Bus Pullup Resistor Calculation**. 1. ed. [S.l.], 2015. 8 p. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/soares/files/2017/03/Pull-up-silva689.pdf>>.

BARBOSA, S. D. J. et al. **Interação Humano-Computador e Experiência do Usuário**. [S.l.]: Autopublicação, 2021.

BLUETOOTH. **Bluetooth Core Specification**. [S.l.], 2019. Acesso em 12 jul. 2021. Disponível em: <https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=478726>.

BRESSER. **BRESSER Polar Finder Scope for StarTracker**. Bressr group of companies, c2021. Acesso em 11 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.bresser.de/en/Astronomy/BRESSER-Polar-Finder-Scope-for-StarTracker-PM-100.html>>.

BUDI, R. **Memory Recognition and Recall in User Interfaces**. Nielsen Norman Group, 2020. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/recognition-and-recall/>>.

CORPORATION iOptron. **SkyGuider™ Pro camera mount full package**. IOPTRON, c2021. Acesso em 20 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.ioptron.com/product-p/3550.htm>>.

COVINGTON, M. A. **Astrophotography for the Amateur**. [S.l.]: Cambridge University, 2006.

COX, S. **500 Rule vs NPF Rule**: Shutter speed for astrophotography. photography-life, 2021. Acesso em 13 jul. 2021. Disponível em: <<https://photographylife.com/500-rule-vs-npf-rule>>.

DAVID, K. **Astrophotography Part 3 of 6: Making a Barn Door Tracker**. Pentax Forums, 2015. Acesso em 10 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.pentaxforums.com/articles/photo-articles/astrophotography-part-3-barn-door-tracker.html>>.

DEEP SKY STACKER. **How to create better images**. [S.l.], c2021. Acesso em 12 jul. 2021. Disponível em: <<http://deepskystacker.free.fr/english/theory.htm>>.

_____. **Light, Dark, Flat, Bias... What are they and how to create them?** [S.l.], c2021. Acesso em 12 jul. 2021. Disponível em: <<http://deepskystacker.free.fr/english/faq.htm#lightdarkflatoffset>>.

DEVZONE. **Bluetooth low energy Services, a beginner's tutorial**. Nordic Semiconductor, 2018. Acessado em 13 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://devzone.nordicsemi.com/guides/short-range-guides/b/bluetooth-low-energy/posts/ble-services-a-beginners-tutorial>>.

DYER, A. **Testing the MSM Tracker**. The Amazing Sky, 2019. Acesso em 10 ago. 2021. Disponível em: <<https://amazingsky.net/2019/08/22/testing-the-msm-tracker/>>.

EGAN, M. **Nyx Tech**. Nyx Tech, c2021. Acesso em 29 mar. 2021. Disponível em: <<https://nyxtech.us/>>.

_____. **Tips and Tutorials**. Nyx Tech, c2021. Acesso em 9 ago. 2021. Disponível em: <<https://nyxtech.us/pages/tips-tutorials>>.

GOOGLE DEVELOPERS. **Android Studio**: Guia do usuário. [S.l.], 2021. Acesso em 16 mar. 2021. Disponível em: <<https://developer.android.com/studio/intro>>.

HARLEY, A. **Icon Usability**. Nielsen Norman Group, 2014. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/icon-usability/>>.

HELERBROCK, R. **História da Astronomia**. Brasil Escola, c2021. Acesso em 20 fev. 2021. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/historia-astronomia.htm>>.

INFORMATION, N. C. F. E. **Magnetic Field Calculators**. National Oceanic and Atmospheric Administration, c2021. Acesso em 27 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination>>.

JAUCH, F. E.; SILVA, L. d. S.; PAZ, O. L. da. **SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL - GPS**. [S.l.], 2014. Acesso em 15 jul. 2021. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/37756/APOSTILA%20GPS%202014.pdf>>.

JÚNIOR, S. D. C. **Introdução à astrofotografia**. Network for Astronomy School Education, 2016. Acesso em 20 fev. 2021. Disponível em: <<http://sac.csic.es/astrosecundaria/complementario/pt/actividades/instrumentos/astrofotografia.pdf>>.

JONES, D. W. **Stepping Motors Fundamentals**. [S.l.], c2004. 22 p. Acesso em 15 jul. 2021. Disponível em: <<http://www.t-es-t.hu/download/microchip/an907a.pdf>>.

JONES, E. Some experiments with curved bolt drives. **Sky and Telescope Magazine**, 1980.

JOYCE, A. **Help and Documentation**. Nielsen Norman Group, 2020. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/help-and-documentation/>>.

KALEY, A. **Match Between the System and the Real World**. Nielsen Norman Group, 2018. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/match-system-real-world/>>.

LAGE, V. N. **DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID PARA ESTABILIZAÇÃO DE UMA PLATAFORMA COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE**. 2016. 96 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto., Ouro Preto, 2016.

LAUBHEIMER, P. **Preventing User Errors**. Nielsen Norman Group, 2015. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/slips/>>.

_____. **Flexibility and Efficiency of Use**. Nielsen Norman Group, 2020. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/flexibility-efficiency-heuristic/>>.

LOCHUN, K. et al. **The Complete Guide to Astrophotography**. [S.l.]: BBC Sky at Night Magazine, 2015.

MACK, J. E. **Star Watch**: The amateur astronomers guide to finding observing and learning about over 125 celestial objects. London: White Crow Books, 2008. v. 1, 304 p.

MATERIAL FOUNDATION. **Material Design**: Introduction. [S.l.], 2021. Acesso em 16 mar. 2021. Disponível em: <<https://material.io/design/introduction>>.

MOURA, R. S. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSIÇÃO ESPACIAL INERCIAL**. 2013. 150 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.

MULLER, N. J. **Bluetooth Demystified**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000. v. 1, 396 p.

NIELSEN, J. **Usability Heuristics for User Interface Design**. Nielsen Norman Group, 2020. Acessado em 25 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>>.

OBSERVATÓRIO LUPUS. **Alinhamento pelo Método Drift**. Observatório Astronômico Lupus, 2014. Acesso em 26 jul. 2021. Disponível em: <<http://observatoriolupus.blogspot.com/2014/10/alinhamento-pelo-metodo-drift-derivacao.html?m=1>>.

PETERSON, Z. **I2C vs. SPI vs. UART: How to Layout These Common Buses**. Altium, 2020. Acessado em 13 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://resources.altium.com/p/i2c-vs-spi-vs-uart-how-layout-these-common-buses>>.

REDKA, M. **Kotlin vs. Java**: Which programming language to choose for your android app. MLSDev, 2021. Acesso em 16 mar. 2021. Disponível em: <<https://mlsdev.com/blog/kotlin-vs-java>>.

REGINA, C. **Aprenda a Fotografar em 7 Lições**. [S.l.], 2013. 18 p.

RUSSEL, D. **Introduction to Embedded Systems: Using ANSI C and the Arduino Development Environment**. [S.l.]: Morgan e Claypool, 2010. 276 p.

SANTOS, N. S. **A astrofotografia e sua importância para a astronomia**. Educação Espacial, 2010. Acesso em 19 fev. 2021. Disponível em: <<https://educacaoespacial.files.wordpress.com/2010/10/a-astrofotografia-e-sua-importancia-para-a-astronomia.pdf>>.

SERONIK, G. A tracking platform for astrophotography. **Sky and Telescope Magazine**, 2007.

TAKAHASI, C. K. **Arquitetura de Mobilidade Bluetooth**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

TEXAS INSTRUMENTS. **KeyStone Architecture**: Universal asynchronous receiver/transmitter (uart). 1. ed. Dallas, 2010. 51 p. Acesso em 8 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf?ts=1636387120360>>.

TIER, E. G. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO EMPREGANDO TECNOLOGIA LORA EM UM PROTÓTIPO TIPO FORMULA SAE**. 2019. 120 f.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

TROTT, D. Double arm barn-door drive. **Sky and Telescope Magazine**, p. 436–441, 1989.

VALDEZ JONATHAN; BECKER, J. **Understanding the I2C Bus**. 1. ed. [S.l.], 2015. 8 p.

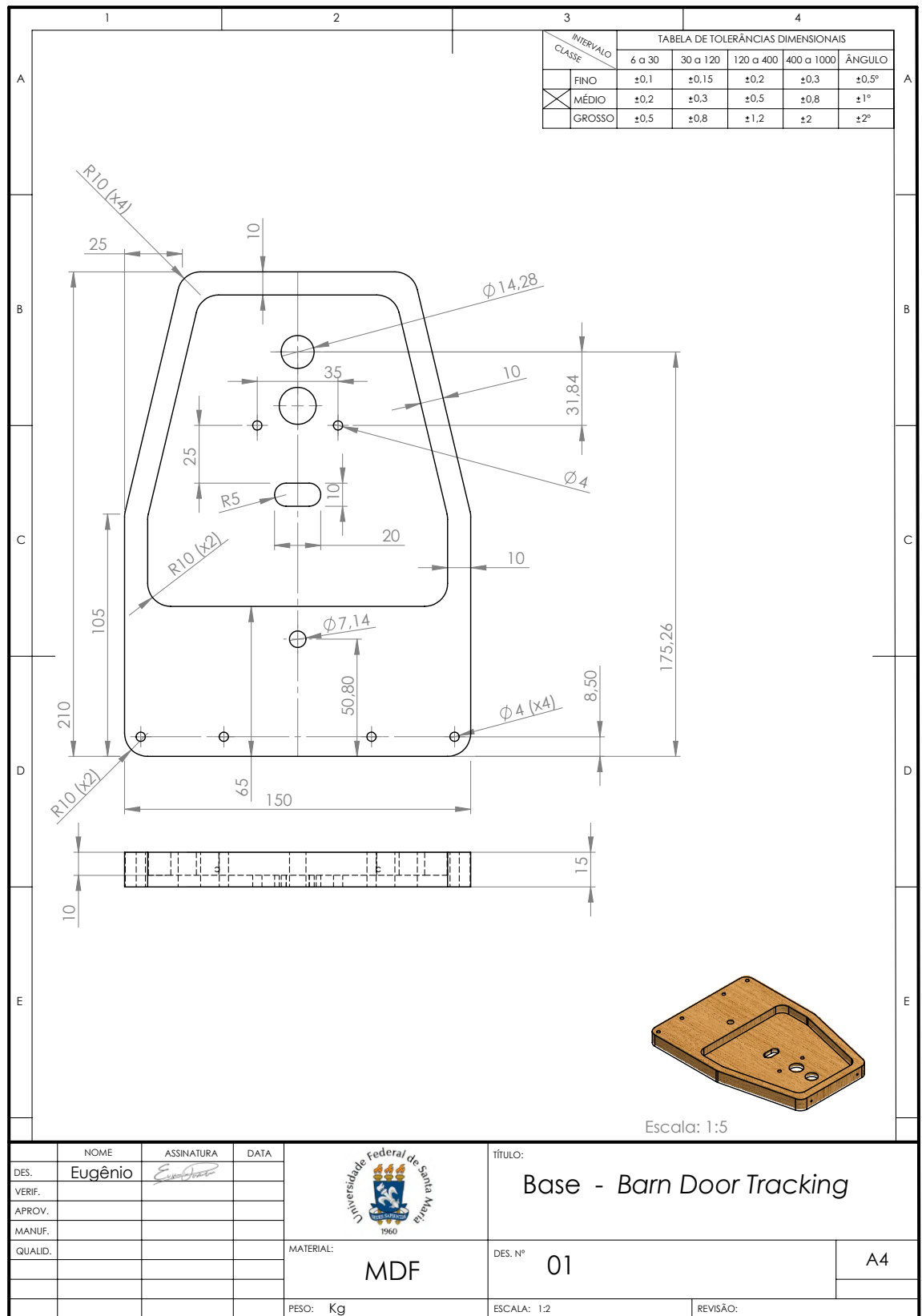
VIERO, E. **Os 3 pilares da fotografia**. Eduardo e Mônica, 2018. Acessado em 5 de julho de 2021. Disponível em: <<https://www.eduardo-monica.com/new-blog/iso-velocidade-abertura-exposicao-fotografia>>.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation**. [S.l.], 2007. 37 p. Acesso em 16 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>>.

ZANONI, F. D. **Modelagem e Implementação do Sistema de navegação para um AUV**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DAS PEÇAS

A.1 – BASE



A.2 – PARTE MÓVEL

A.3 – BARRA CURVADA



APÊNDICE B – DIAGRAMA DE MONTAGEM