

Lunário: criação de um modelo mecânico para o ensino de Astronomia

Vítor Rodrigues Dutra¹, Lisiane Trevisan¹, Marcella Scoczynski Ribeiro Martins²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) –
Campus Farroupilha
CEP 95174-274 – Farroupilha – RS – Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Ponta Grossa
CEP 84017-220 – Ponta Grossa – PR – Brasil

vitor.dutra@aluno.farroupilha.ifrs.edu.br,
lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br, marcella@utfpr.edu.br

Abstract. *Astronomy is a science composed of fields of study, among which Celestial Mechanics and Astrometry can be cited, both of which are dedicated to the calculation, measurement and prediction of the motions of celestial bodies. Aiming to make the teaching of contents covered in these disciplines more interactive, this work sought to develop a mechanical mechanism that, analogous to a clock, could simulate the astronomical motions of the Moon and the Earth from the perspective of an observer located at the Sun. The prototype, constructed using 3D printing and laser cutting, is currently in its experimental phase and can be used to teach concepts such as eclipses, lunar standstill, lunar phases, seasons and celestial coordinates.*

Resumo. *A Astronomia é uma ciência constituída de campos de estudo, dentre os quais se podem citar a Mecânica Celeste e a Astrometria, que se dedicam ao cálculo, medição e previsão dos movimentos dos corpos celestes. De modo a tornar mais interativo o ensino de conteúdos aprendidos em tais disciplinas, este trabalho visa a criação de um mecanismo mecânico que, de modo análogo a um relógio, possa simular os movimentos astronômicos da Lua e da Terra, sob a perspectiva de um observador no Sol. O protótipo físico, construído através de impressão 3D e corte a laser, encontra-se em sua fase de experimentação e pode ser utilizado para ensinar conceitos como os eclipses, lunísticios, fases lunares, estações do ano e coordenadas celestes.*

1. Introdução

Este projeto visa detalhar a criação de um modelo didático de Astronomia desenvolvido como um projeto de iniciação científica, abrangendo desde a concepção da ideia e elaboração de esboço em papel até o projeto em *software*, fabricação e montagem do protótipo físico. Esta abordagem se alinha a estratégias de ensino que valorizam recursos concretos para o ensino de Astronomia, conforme Pasachoff e Percy (2005).

Historicamente, o termo *Lunário* é associado a antigos calendários lunares, comumente utilizados como guias para se realizar previsões meteorológicas, astronômicas e agrícolas. Neste trabalho, optou-se por adotar essa palavra como o nome do mecanismo, graças à sua sonoridade e vínculo com o estudo dos movimentos da Lua.

Dentre os fenômenos que o Lunário busca demonstrar, destacam-se aqueles que, segundo Urban e Seidelmann (1992), apresentam uma natureza cíclica, o que facilita a realização de previsões, tais como os eclipses solares e lunares; os lunísticos; as estações do ano, em ambos os hemisférios; as fases lunares; a translação e rotação da Terra; as constelações do Zodíaco; e conceitos abordados em Astrometria, como os elementos orbitais e as coordenadas celestes. Entre os listados, o Lunário confere maior ênfase aos eclipses, permitindo ao usuário realizar previsões de tais fenômenos.

Além disso, de modo complementar, o modelo também pode ser empregado para o ensino de conceitos de Engenharia Mecânica, com foco no seu funcionamento. Nesse sentido, pode-se lecionar sobre transmissão de movimento por relações de engrenagens, fundamentos de projeto mecânico e conjuntos de engrenagens planetárias. Para a confecção das peças, utilizou-se ferramentas da cultura *maker* como a impressão 3D e o corte a laser, pois permitem uma excelente replicabilidade e versatilidade.

Em resumo, este projeto propõe a criação de mais uma alternativa para o ensino de conteúdos de Astronomia, os quais, devido à sua natureza visual, podem ser explorados através de um modelo físico interativo e lúdico, que possa proporcionar um contato direto entre o usuário – o aluno – e a disciplina estudada.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção busca descrever alguns dos movimentos astronômicos que existem entre a Terra, a Lua e o Sol, com foco àqueles que são de interesse ao modelo. Além de uma explicação dos movimentos considerados pelo Lunário, também são descritos os que não foram considerados, pois se tratam de fontes de incerteza para a precisão do modelo.

Em um primeiro momento, é importante diferenciar duas perspectivas com as quais se pode observar o sistema solar, sendo que a primeira é normalmente a mais comum e familiar (sideral), e a segunda, a que foi adotada pelo Lunário (solar):

1. Sideral – é a perspectiva de uma estrela distante, fixa em um referencial inercial, em que os fenômenos astronômicos no sistema solar são visualizados por um observador externo ao próprio sistema (URBAN; SEIDELMANN, 1992). Nesta perspectiva, é comum considerar o Sol como sendo o centro fixo do sistema solar.

2. Solar – é a perspectiva do Sol, ao observar os corpos celestes a partir da visão da nossa estrela. Podemos imaginar como se o observador, ao invés de se localizar fora do sistema solar – como no caso sideral –, se localizasse dentro do próprio Sol.

2.1. Translação (perspectiva sideral)

Na Astronomia, a translação da Terra representa o movimento de órbita de nosso planeta em torno ao Sol, em um ciclo chamado ano sideral, cujo período é de aproximadamente 365,256 dias. Ressalta-se a natureza elíptica da órbita, em que há pontos da trajetória em que o planeta se encontra mais próximo ao Sol (periélio) ou mais afastado (afélio). O Lunário simplifica a órbita terrestre a um movimento circular, e, portanto, esta é uma fonte de incerteza para a precisão do mecanismo.

O plano em que a Terra orbita o Sol é conhecido como o *plano da eclíptica* ou simplesmente *Eclíptica*, e é comumente utilizado como uma referência em sistemas de coordenadas celestes (URBAN; SEIDELMANN, 1992). A Figura 1 ilustra a translação da Terra ao longo do ano terrestre.

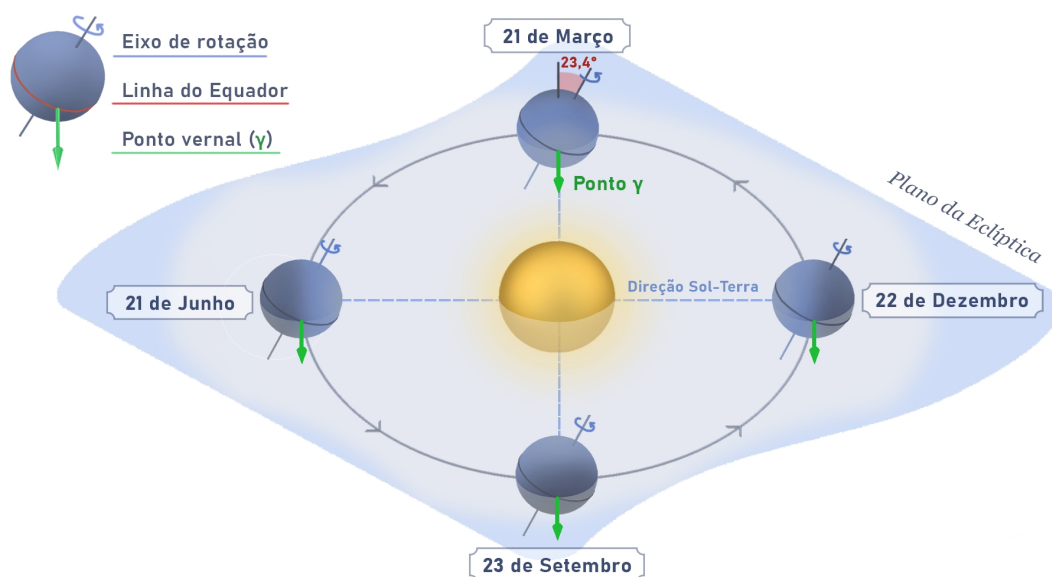


Figura 1. Translação da Terra sob a perspectiva sideral.

Fonte: Autor.

A partir da imagem, pode-se observar detalhes que merecem um destaque:

1. Eixo de rotação – a Terra rotaciona em torno a um eixo que é levemente inclinado (cerca de $23,4^\circ$) em relação ao plano da eclíptica. Durante a translação, a orientação do eixo aparenta se manter aproximadamente constante, em um efeito conhecido como *paralelismo axial*. Vale ressaltar que esse efeito é apenas aparente, e que a orientação do eixo terrestre está sujeita a fenômenos como a *nutação* e a *precessão dos equinócios*. Segundo Carroll e Ostlie (2007), a precessão dos equinócios é responsável por variar lentamente a orientação do eixo da Terra em um movimento análogo a um giroscópio, em que o eixo descreve uma rotação em forma de um cone imaginário. Este fenômeno finaliza um ciclo a cada 25.770 anos, aproximadamente.

O Lunário considera a inclinação do eixo da Terra e o efeito do paralelismo axial, porém, não considera os fenômenos da nutação e da precessão dos equinócios.

2. Ponto vernal (γ) – o ponto vernal, ou direção de equinócio vernal, pode ser imaginado como um vetor posicionado sobre o plano da eclíptica. Formalmente, segundo Urban e Seidelmann (1992), o ponto vernal é definido como sendo o nodo ascendente do plano da eclíptica em sua intersecção com o plano formado pelo equador celeste da Terra. Este detalhe implica em uma relação de ortogonalidade entre o ponto vernal e o eixo de rotação terrestre, em que ambos são, por definição, perpendiculares entre si. Este detalhe é utilizado durante a configuração do Lunário, pois, ao conhecer a direção do ponto vernal, pode-se descobrir a orientação do eixo de rotação da Terra.

Em sistemas de coordenadas celestes, o ponto vernal é frequentemente utilizado como uma direção de referência, simbolizando a origem de medição para ângulos como a longitude eclíptica (sistema eclíptico) e ascensão reta (sistema equatorial) (CARROLL; OSTLIE, 2007). Na Seção 4, será comentada acerca da interface de uso do Lunário, e considerando que o modelo é alimentado com dados de entrada que se baseiam em tais sistemas de coordenadas, é interessante conhecer sobre o ponto vernal.

2.2. Translação (perspectiva solar)

O movimento descrito anteriormente seria a visão de um observador em uma estrela distante, ao visualizar a translação da Terra em uma perspectiva sideral. O Lunário, porém, considera que o usuário – de frente ao modelo – simboliza o próprio Sol, ou seja, o observador é a nossa própria estrela, visualizando a Terra e a Lua ao longo do ano. Este ponto de vista não é tão comum quanto o sideral, porém, além de interessante, também facilita o entendimento de fenômenos como os eclipses, pois uma de suas direções (Sol-Terra) é fixa no modelo, e utilizada como um referencial de origem.

Na perspectiva do Sol, ao observar o nosso planeta durante um ano terrestre, o eixo de rotação da Terra aparenta descrever um movimento análogo a uma precessão, como se realizasse uma rotação em forma de um cone imaginário. Vale salientar que esta descrição se assemelha ao fenômeno da precessão dos equinócios, descrito na subseção anterior, porém, que não se deve confundir ambos, pois não representam o mesmo fenômeno. A precessão dos equinócios é um movimento astronômico atuante e que varia, de modo real e gradual, a orientação do eixo terrestre. A precessão observada durante a translação sob a perspectiva solar, entretanto, é unicamente aparente, um efeito geométrico devido à perspectiva de se observar a partir do Sol.

A Figura 2 ilustra a precessão aparente do eixo da Terra ao ser observada do Sol.

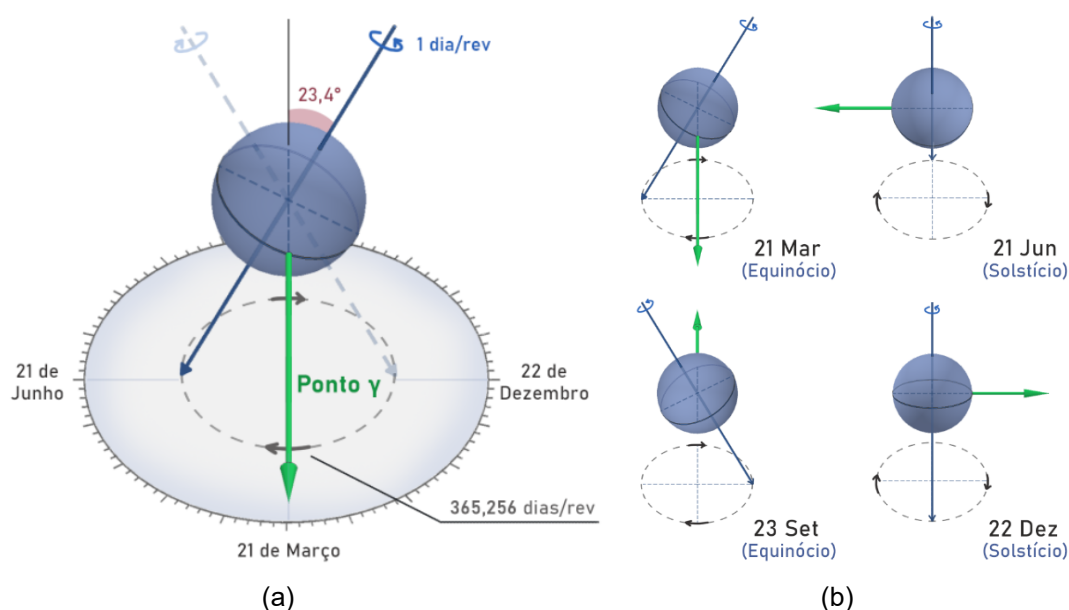


Figura 2. Precessão aparente do eixo da Terra sob a perspectiva solar (a) e as posições do eixo da Terra e do ponto vernal nos solstícios e equinócios (b).

Fonte: Autor.

Um modo de facilitar a visualização é realizar uma comparação das perspectivas na Figura 1. Para um observador sideral, o ponto vernal (em verde) aparenta manter a sua orientação constante, enquanto para um observador no Sol, o ponto vernal aparenta ter rotacionado a sua orientação, alcançando variações de 90° em solstícios e equinócios.

Visto que o Lunário considera a perspectiva solar, o modelo buscará simular os movimentos ilustrados na Figura 2, em que a translação (aproximadamente 365,256 dias) é descrita como uma precessão aparente, similar a um giroscópio, enquanto a Terra realiza uma volta completa em torno ao eixo a cada 1 dia, simbolizando a rotação.

2.3. Ciclo lunar (perspectiva sideral)

À semelhança da translação terrestre, a Lua também descreve uma órbita elíptica em torno à Terra, com pontos em que se encontra mais próxima (perigeu) ou mais distante (apogeu). Este detalhe explica o motivo da Lua aparentar um tamanho maior ou menor em determinados períodos do ciclo lunar, e segundo Chaisson e McMillan (2017), a distância entre a Terra e a Lua é um dos parâmetros que determina as características de um eclipse, como por exemplo, se o mesmo será total, parcial, anelar ou híbrido.

Projetou-se o Lunário considerando uma órbita lunar circular, e, portanto, deve-se levar em consideração essa fonte de incertezas. Além disso, a órbita lunar descreve outros movimentos astronômicos, dentre os quais se pode citar a *precessão apsidal*, que dura aproximadamente 8,85 anos e que consiste na rotação gradual da chamada linha dos ápsides, uma linha imaginária que conecta o perigeu e o apogeu. Uma vez que este fenômeno depende de uma órbita elíptica, o mesmo não foi considerado para o Lunário.

A Figura 3 ilustra a órbita lunar ao longo do ano, em uma perspectiva sideral.

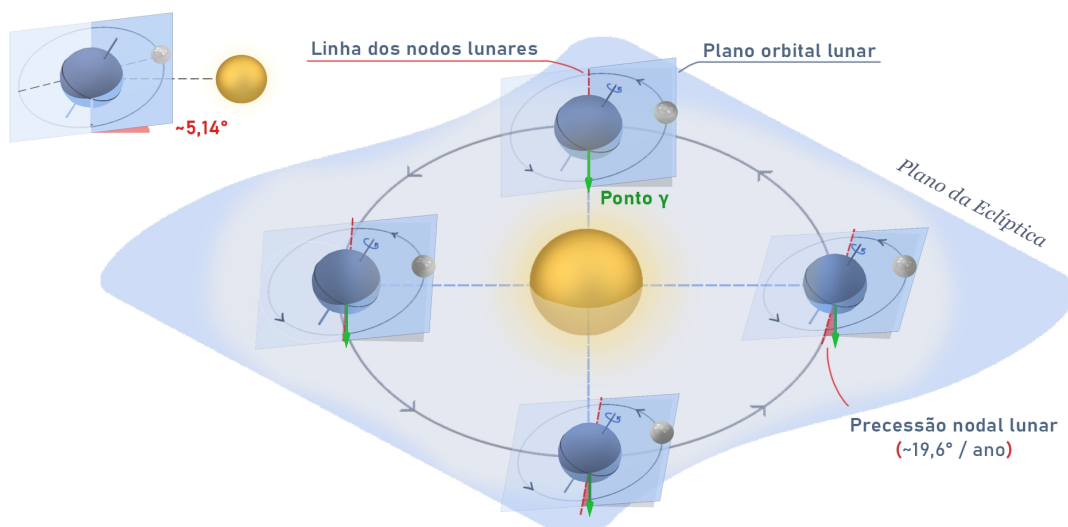


Figura 3. Ciclo lunar sob a perspectiva sideral, considerando a precessão nodal.

Fonte: Autor.

A partir da imagem acima, podemos observar detalhes a serem ressaltados:

1. Inclinação – a Lua orbita a Terra em um plano que é levemente inclinado, com um ângulo aproximado de $5,14^\circ$ com relação ao plano da eclíptica. Neste contexto, pode-se imaginar o plano lunar como se fosse dividido em duas metades, em que uma se encontra acima da Eclíptica, e a outra, abaixo. Durante um ciclo lunar, a Lua transitará entre ambas as metades. Quando a Lua se desloca da metade acima para a debaixo, chama-se esse ponto de *nodo descendente*, e quando a Lua sobe novamente, chama-se *nodo ascendente*. A linha que une os nodos é denominada *linha dos nodos lunares*.

2. Precessão nodal – segundo Chaisson e McMillan (2017), a linha dos nodos lunares descreve um movimento de rotação ao longo do tempo, em um ciclo de duração aproximada de 18,6 anos terrestres, o que implica em uma rotação de cerca de $19,6^\circ$ por ano, em sentido horário, quando observado de cima do plano da eclíptica. Este fenômeno é denominado *precessão nodal*, e foi considerado para o Lunário.

2.4. Ciclo lunar (perspectiva solar)

Assim como o eixo de rotação da Terra, que descreve um movimento de precessão aparente quando observado a partir do Sol, o plano de órbita lunar também descreverá um movimento de uma precessão aparente. Em um caso ideal, em que não há quaisquer perturbações externas, a precessão aparente do eixo de rotação apresentaria uma duração de 1 ano terrestre, pois, a mesma simboliza a translação da Terra, apenas que observada a partir do Sol. Para o Lunário, optou-se por adotar este cenário para a duração da precessão aparente do eixo terrestre, desconsiderando os efeitos de perturbações externas como a nutação e a precessão dos equinócios.

Para a precessão aparente do ciclo lunar, entretanto, deve-se levar em consideração os efeitos da precessão nodal, uma vez que esta possui um impacto mais significativo, concluindo um ciclo em 18,6 anos terrestres, em contraste aos 25.770 anos da precessão dos equinócios. Visto que a precessão nodal decorre em sentido horário, enquanto a translação da Terra decorre em sentido anti-horário (quando observados de um ponto de vista acima do plano da eclíptica), deve-se considerar os efeitos de uma velocidade angular relativa. Assim, quando observado do Sol, o plano de órbita lunar rotacionará de um modo levemente mais rápido do que a translação da Terra, finalizando uma revolução em aproximadamente 346,62 dias ($\sim 0,949$ anos). Na Astronomia, este período também é conhecido como *ano draconiano*.

A Figura 4 ilustra o sentido e o período (duração) dos movimentos descritos.

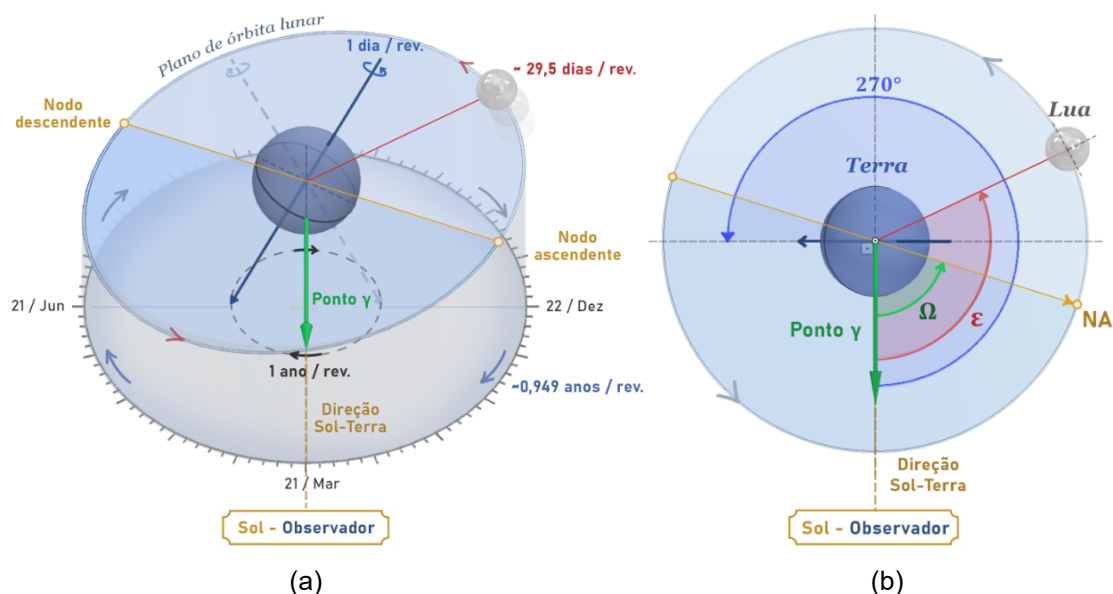


Figura 4. Movimentos realizados pelo Lunário (a) e visão de cima, com ângulos (b).

Fonte: Autor.

Para a órbita lunar, considerou-se o ciclo lunar sinódico, cujo período é de aproximadamente 29,5 dias e que simboliza o ciclo lunar quando observado do Sol.

Os ângulos indicados na Figura 4 (b) se referem à Ascensão Reta de Nodo Ascendente (ARNA ou Ω), elongação (ϵ) e o ângulo de 270° , que é constante entre o ponto vernal e o eixo de rotação da Terra. Tais variáveis serão abordadas novamente na Seção 4, e são importantes para a utilização do modelo, pois podem ser utilizadas para configurar as posições da Terra, Lua e plano lunar para uma determinada data.

3. Metodologia

Nesta seção, são descritas as etapas para a criação e experimentação do Lunário.

Antes de se iniciar um projeto de qualquer natureza, é recomendável dedicar o tempo que for necessário ao planejamento e à concepção da ideia. Essa etapa não somente proporciona um panorama mais amplo das possibilidades e limitações do projeto, como também fornece uma visão prévia das dificuldades que podem ser encontradas ao longo do desenvolvimento, o que tende a evitar retrabalhos no futuro.

Para a criação do Lunário, o planejamento se deu pelo estudo dos movimentos astronômicos envolvendo a Terra e a Lua – em grande parte, através de livros de Astronomia – e na forma da elaboração de esboços em papel, com representações de seu mecanismo, além de detalhes complementares, como a estética e dimensões finais.

A Figura 6 apresenta fotos de dois esboços em papel do modelo.

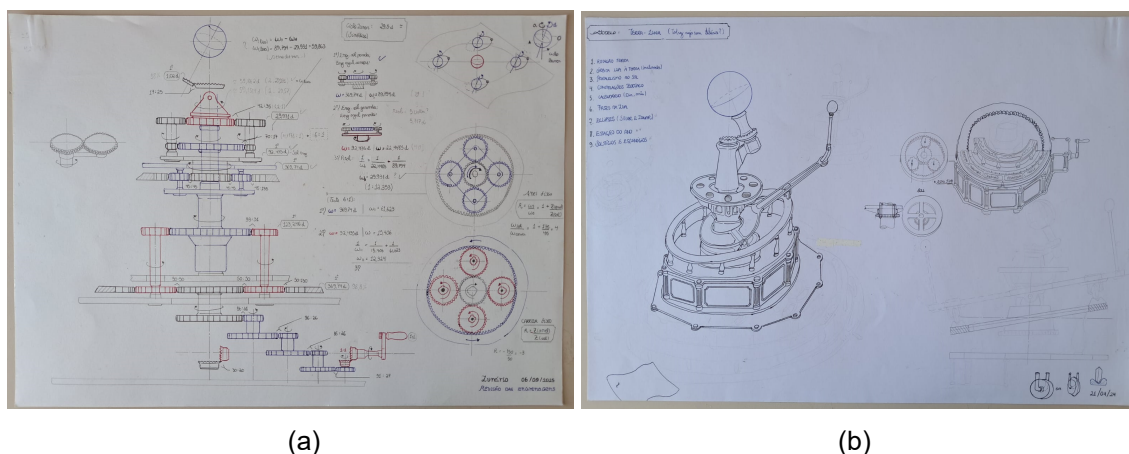


Figura 5. Esboço em 2025 (revisado) (a) e em estágio inicial em 2024 (b).

A principal inspiração para a criação do Lunário foram os dispositivos conhecidos como planetários mecânicos, ou no inglês, *orrery*. Tais mecanismos dispunham de um funcionamento que buscava representar os movimentos astronômicos dos planetas em torno ao Sol, incluindo a translação e a rotação. Em tais modelos, não se busca representar a escala real entre as distâncias e tamanhos dos corpos celestes, e sim, a duração e o sentido dos movimentos astronômicos. Os *orreries* também foram uma inspiração para a estética do modelo, construído em um estilo mais clássico.

3.2 Projeto e fabricação

Todo o projeto foi elaborado no *software* Autodesk Inventor, e consistiu na modelagem 3D de cada peça e na montagem das mesmas, dentro do programa. Nesta etapa, um cuidado a ser tomado é quanto à escala do modelo, de modo a garantir que peças que exigem robustez e um tamanho calculado – como eixos e engrenagens – sejam modeladas primeiro, para, em seguida, a estrutura ser modelada a partir da escala definida por tais componentes. Essa medida evita retrabalhos, pois, há o risco de se projetar por acidente uma estrutura pequena, sem espaço para serem inseridas tais peças.

Por isso, iniciou-se o projeto de cima para baixo, em que primeiro se modelou a transmissão responsável pelo ciclo lunar, a qual apresenta a maior complexidade no projeto. A Figura 7 apresenta *screenshots* de diferentes etapas no desenvolvimento.

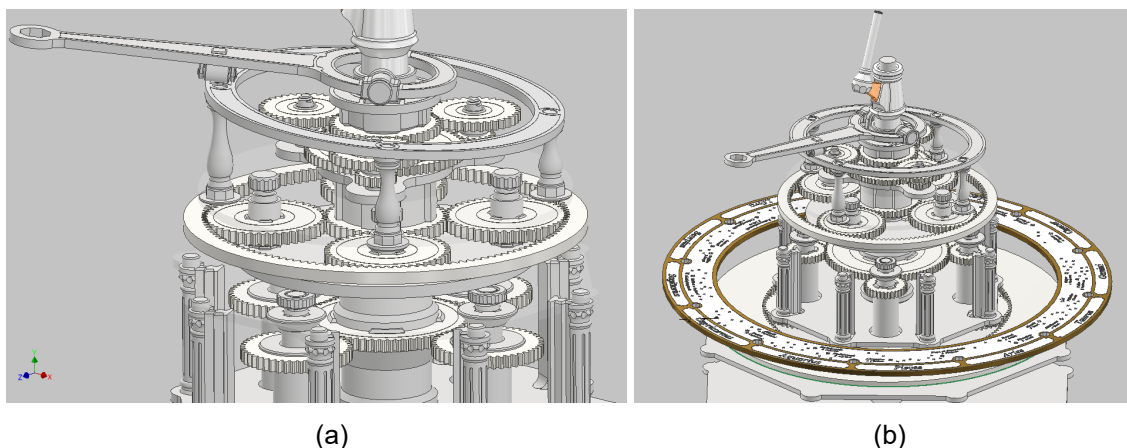


Figura 6. Ciclo lunar (a) e visão geral do modelo em desenvolvimento (b).

Uma dificuldade inicial foi o encaixe das peças. Observou-se, nos primeiros protótipos, que as peças fabricadas por manufatura aditiva tendiam a apresentar dimensões ligeiramente expandidas, enquanto aquelas cortadas a laser apresentavam dimensões reduzidas devido ao processo da queima. Essa variação, medida em décimos de milímetros, era suficiente para gerar interferência entre os componentes. Por este motivo, projetou-se as peças com o objetivo de facilitar a montagem, como por exemplo, diminuir em 0,3 mm o diâmetro dos eixos fabricados por impressão 3D, de modo a compensar a expansão sofrida pela peça durante a fabricação.

Além dessa observação, buscou-se modelar as peças tendo em mente as limitações dos dois processos de fabricação empregados: a impressão 3D e corte a laser. Para as peças impressas, buscou-se projetá-las de modo com que fosse dispensável o uso de suportes, tanto por uma questão de produtividade (menor consumo de filamento e tempo de impressão) como também por questões estéticas, de modo a evitar com que as peças apresentassem marcas de suporte removido. Um segundo ponto analisado foi quanto à resistência mecânica dos componentes, em que peças sensíveis, tais como eixos e buchas, foram projetadas e fabricadas para apresentarem uma maior robustez, sendo impressas com um maior preenchimento e quantidade de paredes.

Utilizou-se como filamento para as impressões o PLA (*Ácido Polilático*), graças à sua facilidade de impressão – quando comparado a outros filamentos 3D – e também graças à disponibilidade deste material nos laboratórios da instituição. A maioria dos componentes foi impressa nas cores branco, cinza e preto, e para fins de acabamento, pintou-se as peças brancas com latinhas de spray prateada e dourada, de modo a fazer com que o modelo se assemelhasse a um mecanismo metálico antigo. Esse procedimento foi unicamente estético, e além de tornar o Lunário visualmente interessante, percebeu-se que o modelo se tornou mais atrativo aos usuários, incentivando-os a olhar, tocar e interagir com ele com mais curiosidade.

Quanto às peças cortadas a laser, utilizou-se como matérias-primas chapas de MDF comum (6mm) e MDF com textura branca (3mm), além de chapas de acrílico de 3 e 4mm. As chapas de acrílico foram empregadas para a fabricação da maioria dos componentes, enquanto as de MDF com textura branca foram utilizadas para a produção das peças que continham escrita, tais como o calendário e as constelações do Zodíaco. A chapa de MDF 6mm foi empregada para a fabricação de uma base robusta ao Lunário.

3.3 Montagem

A montagem do modelo decorreu simultaneamente com a etapa de fabricação dos componentes, em que as peças eram atualizadas no *software* quando se identificava uma possível melhoria. Dentre as peças, aquelas que apresentaram o maior número de retrabalho foram as engrenagens, devido principalmente à fluidez de movimento. Em mecanismos mecânicos, idealmente, busca-se alcançar a mínima folga possível entre os componentes móveis – como por exemplo, entre os dentes de engrenagens –, uma vez que uma folga excessiva pode acarretar problemas de funcionamento, como impactos entre dentes e imprecisão do mecanismo (COLLINS; BUSBY; STAAB, 2010).

Visto que as engrenagens foram fabricadas com o corte a laser de chapas de acrílico, identificou-se dificuldades quanto à folga, uma vez que este processo de fabricação tende a alargá-la durante a queima. A solução empregada consistiu em experimentar diferentes diâmetros externos de engrenagens, variando parâmetros como o módulo, distância entre centros, velocidade e potência de corte da máquina a laser.

Considerando a relativa facilidade e velocidade de se fabricar protótipos por meio das ferramentas de cultura *maker* – em comparação a processos de fabricação tradicionais, tais como o fresamento e o torneamento –, foi possível experimentar rapidamente diferentes iterações e versões dos componentes que apresentavam o maior número de dificuldades, com ênfase às engrenagens, mas também os eixos, buchas, parafusos e porcas. Este fato contribuiu de modo extremamente positivo para a criação do modelo. Um segundo detalhe que contribuiu para a montagem foi o próprio projeto, em que se buscou projetar o modelo de modo com que fosse facilmente desmontável.

A Figura 8 apresenta o Lunário montado, no estado atual da escrita deste artigo.

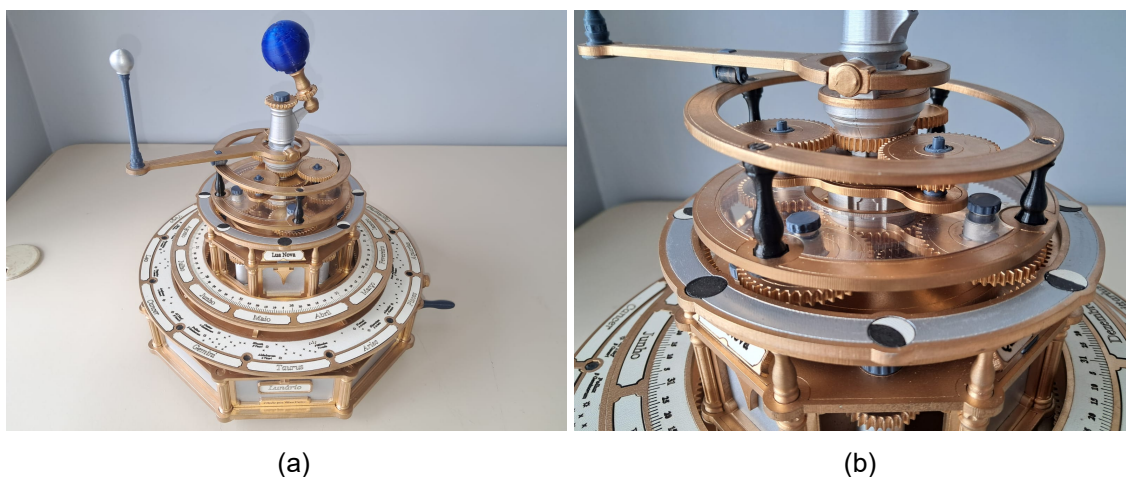


Figura 7. Montagem atual do Lunário (a) e visão do ciclo lunar (b).

4. Resultados

O protótipo físico se encontra funcional, e, em uma analogia a um relógio, ao rotacionar a manivela, o Lunário é capaz de simular os movimentos entre a Terra e a Lua descritos na fundamentação teórica, como os ponteiros de um relógio. Isto, entretanto, pode vir a levantar um questionamento: seria possível configurá-lo para uma data específica? Seja uma data no passado, ou ainda, uma no futuro?

Para realizar tal configuração, é necessário conhecer a geometria espacial que existia entre a Terra, a Lua e o plano lunar para aquela data. Esta geometria (considerando o Lunário) pode ser determinada através de parâmetros, como a Ascensão Reta de Nodo Ascendente (ARNA), Elongação (ϵ) e a longitude eclíptica do Sol. Atualmente, espera-se desenvolver uma interface digital ao usuário que seja alimentado com bancos de dados gerados pelo sistema JPL Horizons, um sistema de dados desenvolvido pelo Instituto Tecnológico da Califórnia (Caltech) capaz de gerar efemérides precisas envolvendo dados do sistema solar (NASA, 2025). Nesta interface, o usuário seria capaz de inserir uma data e o sistema, por sua vez, forneceria os dados necessários (em ângulos) para o usuário configurar manualmente o modelo físico.

5. Conclusão

Este projeto apresenta a confecção de um modelo desenvolvido para tornar o ensino de conteúdos de Astronomia uma experiência mais interativa e lúdica, dentre os quais, pode-se citar fenômenos como as fases lunares, eclipses, lunísticos, estações do ano e conteúdos associados aos ramos da Astrometria e da Mecânica Celeste.

Para facilitar o uso do modelo, busca-se desenvolver uma interface que permita com que o usuário insira uma data de interesse, e a interface, por sua vez, forneça os parâmetros para regular o mecanismo, sendo possível simular fenômenos astronômicos a partir da data selecionada de modo a verificar com previsões já catalogadas. Em uma perspectiva futura, prevê-se aplicar o Lunário dentro de salas de aula, de modo a avaliar o seu uso como material didático para o ensino de Astronomia. Caso se observe bons resultados, prevê-se também a disponibilização dos arquivos a repositórios abertos, de modo com que outras instituições de ensino possam replicar e utilizar o modelo.

Um ponto interessante é a ampla variedade de possíveis modelos que podem ser projetados e construídos, de modo a abranger e simular outros movimentos e fenômenos astronômicos que acontecem dentro e/ou fora do sistema solar. Acredita-se que essa abordagem pode ser interessante, unindo o ensino da Astronomia à cultura *maker*.

Referências

- MORBIDELLI, Alessandro. **Modern Celestial Mechanics: Aspects of Solar System Dynamics**. [s.l: s.n.], 2011. Disponível em: <https://www-n.oca.eu/morby/celmech.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2024.
- URBAN, Sean. E.; SEIDELMANN, P. K. **Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac**. 1ed. Mill Valley, CA: University Science Books, 1992.
- CARROLL, Bradley W.; OSTLIE, Dale A. **An Introduction to Modern Astrophysics**. 2 ed. Pearson Addison-Wesley, 2007. ISBN 978-1108422161.
- CHAISSON, Eric; MCMILLAN, Steve. **Astronomy: a Beginner's Guide to the Universe**. 8 ed. Pearson, 2017. ISBN-13: 978-0134087702.
- COLLINS, Jack A.; BUSBY, Henry R.; STAAB, George H. **Mechanical Design of Machine Elements and Machines: a Failure Prevention Perspective**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc, 2010. ISBN-13 978-0-470-41303-6.
- PASACHOFF, Jay; PERCY, John. **Teaching and Learning Astronomy: Effective Strategies for Educators Worldwide**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.