

**O MECANISMO DE ANTIKYTHERA: POSSIBILIDADES PARA O ENSINO E A  
DIVULGAÇÃO DA ASTRONOMIA – PARTE II**

**EL MECANISMO DE ANTICITERA: POSIBILIDADES PARA LA ENSEÑANZA Y  
DIFUSIÓN DE LA ASTRONOMÍA – PARTE II**

**THE ANTIKYTHERA MECHANISM: POSSIBILITIES FOR ASTRONOMY TEACHING  
AND ITS DISSEMINATION – PART II**

Wilson Guerra \*  
wilsonguerra@gmail.com

Marcos Cesar Danhoni Neves \*  
macedane@yahoo.com

\* Universidade Estadual de Maringá, Maringá - Brasil

---

**Resumo**

O objetivo do presente artigo é, a partir do artigo anterior (Parte I), investigar o princípio de funcionamento do Mecanismo de Antikythera evidenciando as possibilidades interdisciplinares para sua utilização no Ensino e na Divulgação da Astronomia e desenvolver uma réplica didática simplificada do dispositivo para ser utilizado como instrumento educacional.

**PALAVRAS CHAVE:** Mecanismo de Antikythera, Astronomia, Ensino de Astronomia.

**Resumen**

El objetivo de este artículo es, desde el artículo anterior (Parte I), investigar el principio de funcionamiento del Mecanismo de Anticitera, destacando las posibilidades interdisciplinarias para su uso en la Enseñanza y Difusión de la Astronomía y desarrollar una réplica didáctica simplificada del dispositivo utilizado como herramienta educativa.

**PALABRAS CLAVE:** Mecanismo de Anticitera, Astronomía, Enseñanza de la Astronomía.

**Abstract**

The aim of this article is, from the previous article (Part I), to investigate the working principle of the Antikythera Mechanism, highlighting the interdisciplinary possibilities for its use in the Teaching and Dissemination of Astronomy and to develop a simplified didactic replica of the device to be used as an educational tool.

**KEYWORDS:** Antikythera Mechanism, Astronomy, Astronomy Education.

---

**I. Introdução: Possibilidades para o Ensino e a Divulgação da Astronomia**

A cativante sofisticação do Mecanismo de Antikythera o torna um recurso de grande potencial educacional, com abrangência multi e interdisciplinar, e pode ser usado como um meio de engajar estudantes e o público geral para as Ciências e a Tecnologia.

O Mecanismo de Antikythera é uma ferramenta incrivelmente engenhosa e educativa para mudar a forma como o público em geral vê a Ciência e ajuda as pessoas a abordarem a Astronomia, a Matemática, a Ciência e a Filosofia"<sup>1</sup> (MOUSSAS *et al*, 2009).

Abordar o funcionamento do Mecanismo, as funções das engrenagens, ou o *layout* do painel planetário podem levar a conceitos, princípios e teorias da Física e da Astronomia como: rotações, torques, órbitas, epiciclos, referencial geocêntrico, etc. O quadro 1 reúne alguns aspectos da máquina e os conceitos subjacentes a eles que podem orientar o planejamento de uma aula ou de uma exposição de divulgação científica.

Quadro I. Conceitos abordados pelo Mecanismo de Antikythera.

Mecanismo	Conceito abordado	Área do conhecimento
Engrenagens	Relações de rotação/torque	Física/Engenharia
Círculos do painel frontal	Constelações	Astronomia
Indicador da Lua	Fase da Lua	Astronomia
Indicadores dos Planetas	Epiciclos	Astronomia
Painel posterior	Eclipses	Astronomia
Movimento dos Planetas	Corpos celestes errantes	Astronomia
Ausência da Terra no painel	Geocentrismo/Heliocentrismo	Astronomia/História/Geografia
Sol / Lua	Ciclos de tempo	Astronomia/Geografia
Descoberta do Mecanismo	Métodos de datação	História/Arqueologia
Pesquisa do Mecanismo	Multi e Interdisciplinaridade	Ciências
Constelações zodiacais	Astronomia <i>versus</i> astrologia	Filosofia da Ciência

A gama de conceitos que o quadro 1 indica como o Mecanismo de Antikythera pode usado como um instrumento didático gerador de temas em uma aula, com potencial multi e interdisciplinar.

## 2. Instrumentos didáticos: os relógios astronômicos simples

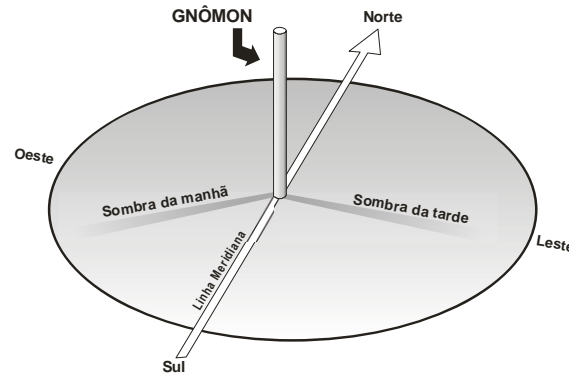
Há milênios o homem sente a necessidade de medir o tempo. A regularidade dos fenômenos celestes foi a primeira e bem-sucedida forma de controle cronométrico (MOURÃO, 2001). Os primeiros instrumentos astronômicos tinham esta finalidade, mas rapidamente suas aplicações se estenderam, sobretudo no âmbito do mapeamento e da navegação (MOURÃO, 2000). Destes dispositivos, os relógios astronômicos simples são os mais conhecidos e usados como instrumentos didáticos pois sintetizam vários conceitos elementares de Astronomia.

### 2.1. Relógio Solar ou Quadrante Solar

<sup>1</sup>"The Antikythera Mechanism is an incredibly resourceful and educational tool for changing the way the general public views Science and assists people to approach astronomy, mathematics, science and philosophy" - *The gears of the Antikythera Mechanism: an educational pathfinder to the solar system* (MOUSSAS *et al*, 2009).

O início da medição do tempo existe a milênios, por meio de um instrumento chamado *gnômon*: uma haste vertical cuja posição da sombra projetada pelo Sol no solo fornece um horário (NEVES, 2011), ilustrado na Figura 1.

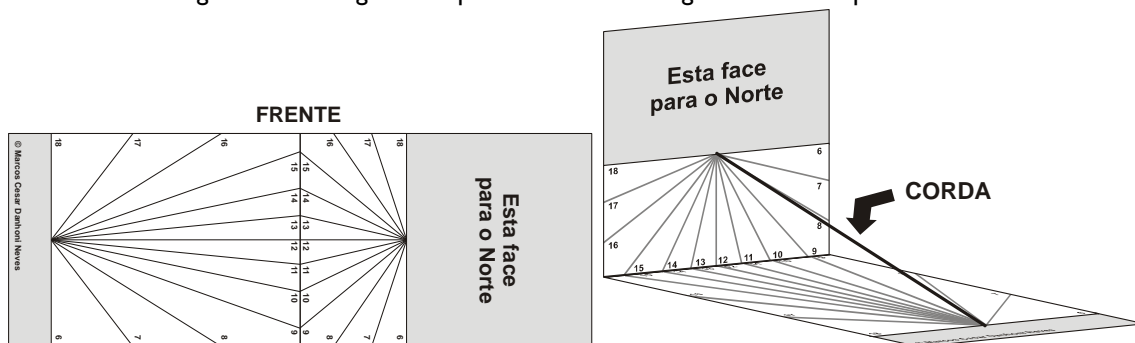
Figura 1. O gnômon. Imagem vetorizada pelo autor.



Fonte: [http://site.mast.br/exposicoes\\_hotsites/exposicao\\_temporaria\\_faz\\_tempo/movimento\\_sol.html](http://site.mast.br/exposicoes_hotsites/exposicao_temporaria_faz_tempo/movimento_sol.html)

Ainda na velha Mesopotâmia, a haste foi inclinada em direção ao polo celeste<sup>2</sup>, ficando paralela ao eixo de rotação da Terra. Isso permitiu a projeção regular da sombra para uma mesma hora em qualquer época do ano. Surgiu assim o Relógio Solar ou Quadrante Solar há cerca de 2000 AEC (MOURÃO, 2001). Há muitas variantes para o Relógio Solar, como por exemplo, a que substitui a haste rígida inclinada por uma corda (linha ou barbante), adaptada para construções e demonstrações didáticas deste instrumento (Figura 2).

Figura 2. O Relógio Solar portátil didático. Imagem vetorizada pelo autor.



Fonte: Neves (1999).

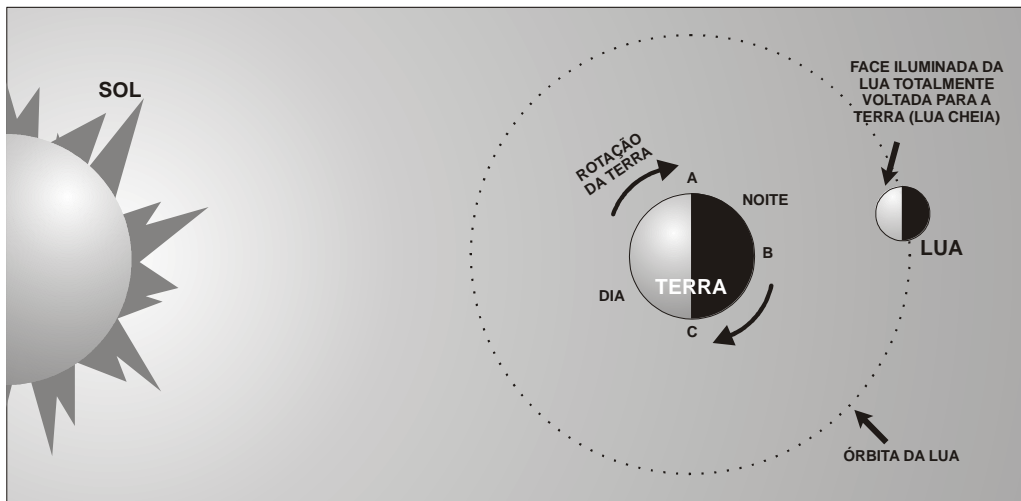
Como o polo celeste muda sua posição angular dependendo do local da Terra de onde e visto, cada Relógio Solar só funciona adequadamente para as latitudes que coincidem com o ângulo de inclinação do eixo que projeta a sombra. Todavia, há versões do instrumento que permitem a variação do ângulo, tornando-o adequado a qualquer ponto do globo desde que o operador conheça a latitude de onde efetua a leitura do horário.

<sup>2</sup> Ponto na esfera celeste em torno do qual as estrelas giram em seu movimento diário.

## 2.2 Relógio Lunar

A fase da Lua e sua posição na esfera celeste também podem fornecer, com certa precisão, a hora local, tornando viável um Relógio Lunar. Tomemos como exemplo a Lua Cheia. Nesta fase, a face da Lua iluminada pelo Sol está toda voltada para a Terra. Por isto vemos todo o disco lunar. Daí o termo "cheia". Esta configuração está ilustrada na Figura 3.

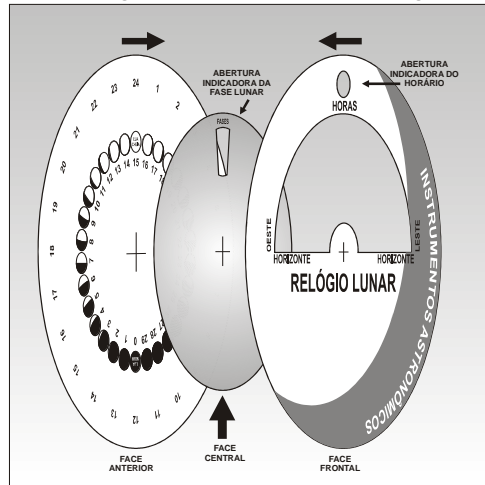
Figura 3. Como um observador da Terra vê a Lua cheia em diferentes horários (Sem escala).



Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

Quando um observador da Terra está no ponto A, ou seja, no começo da noite, vê a Lua Cheia surgindo no horizonte Leste, enquanto o Sol se põe na direção Oeste. Este horário é, assim, aproximadamente 18 horas. Portanto, a Lua Cheia nascendo no horizonte corresponde a este horário. Quando o observador está no ponto B, devido à rotação da Terra, ele vê a Lua Cheia no ponto mais alto do céu. Nota-se que o ponto B é o ponto mais afastado do Sol na face noturna da Terra: trata-se da meia-noite. Então, quando a Lua Cheia está no ponto mais alto do céu, o horário é 24h. Finalmente, quando o observador chega ao ponto C, ele vê o Sol nascendo no leste e a Lua Cheia se pondo no oeste. O Sol nasce aproximadamente às 6 horas. Assim a Lua Cheia se pondo corresponde às 6 da manhã. Consequentemente as posições intermediárias da Lua Cheia neste período correspondem aos respectivos horários intermediários. A lógica vale para todas as fases da Lua. Há uma posição no céu que nosso satélite natural ocupa em cada horário, para cada uma das suas fases, que se repetem para cada novo ciclo lunar. Estes ciclos podem ser representados em discos convenientemente dispostos, e constituem um Relógio Lunar (Figura 4).

Figura 4. As faces de um Relógio Lunar desmontado. Imagem vetorizada pelo autor.



Fonte: Nardi, Neves, Silva (2018).

Para operar o Relógio Lunar escolhe-se, no instrumento, a fase da Lua que está sendo observada, girando a face central até a imagem correspondente aparecer na abertura indicadora da fase lunar. Depois gira-se a face frontal para posicionar as outras duas faces na altura (ângulo em relação ao horizonte) que a Lua se encontra no momento. A hora correspondente poderá ser lida na abertura indicadora do horário, também na face frontal do instrumento.

### 2.3 Relógio Estelar

O movimento das estrelas na esfera celeste também fornece informações a partir das quais podemos inferir a hora local. O princípio é relativamente simples: se observarmos por algumas horas o céu noturno notaremos que, por exemplo, a constelação do Cruzeiro do Sul parece girar no sentido horário em torno de um ponto de rotação - o Polo Celeste Sul; conforme o tempo passa, o Cruzeiro de Sul (e todas as estrelas circundantes) giram circularmente em torno deste pólo (LANGHI, 2016). Cada hora deste dia, portanto, corresponde a uma posição do Cruzeiro do Sul no céu. Como tratado na parte I, este movimento é consequência da rotação da Terra, vista daqui da perspectiva da superfície do nosso planeta (Figura 5).4

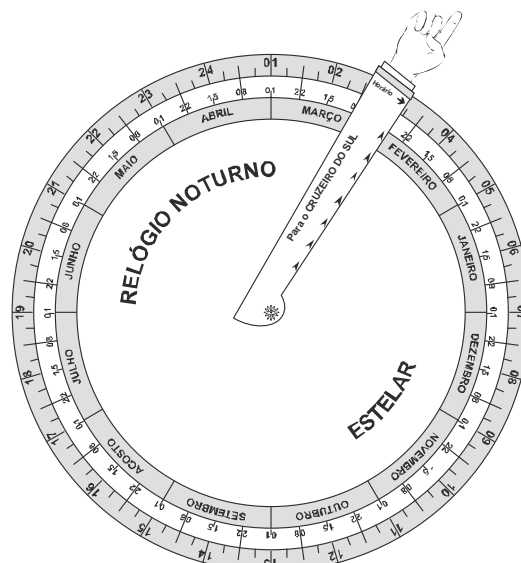
Figura 5. Cruzeiro do Sul, nas coordenadas de São Paulo: acima, visto as 22h em 13 de março; abaixo, às 05h em 14 de março.



Fonte: Simulação feita com o software *Stellarium*, com intervenção do autor.

Porém, o movimento de revolução da Terra em torno do Sol deve ser considerado. Se fixarmos uma posição do Cruzeiro do Sul em determinado horário, notaremos que no mesmo horário da noite seguinte o Cruzeiro do Sul estará cerca de  $1^\circ$  adiantado. É a consequência do movimento aparente anual da esfera celeste. Desta forma, uma estrela ou constelação (nesse exemplo a constelação do Cruzeiro do Sul) ocupa uma posição específica do céu a cada horário de cada dia do ano. O ciclo se repete no ano seguinte. Isto então pode ser mapeado num instrumento circular que tome como ponteiro uma estrela ou constelação de referência. Um instrumento assim concebido para fornecer a hora local é um Relógio Estelar (Figura 6).

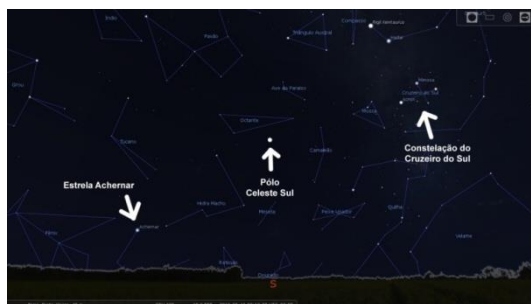
Figura 6 - Relógio Estelar. O ponteiro deve ser fixado na data indicada no disco. Em seguida o conjunto, com sua face posterior para o Sul, deve ser girado de tal forma que o ponteiro se alinhe no sentido do Cruzeiro do Sul. A leitura do horário é realizada no círculo mais externo do disco.



Fonte: Neves (1999, p.50).

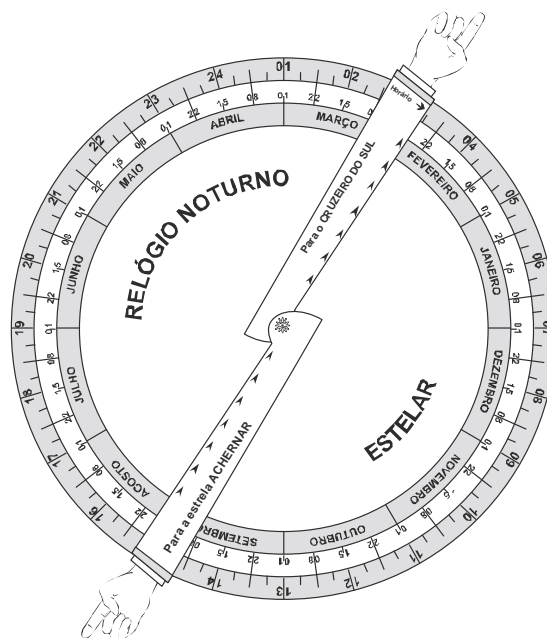
É importante ressaltar que nem sempre nossa constelação ou estrela de referência (neste caso o Cruzeiro do Sul) estará disponível no céu noturno devido ao movimento aparente anual da esfera celeste. Neste caso outra constelação ou estrela de referência deve ser escolhida. A estrela Achernar é uma boa opção, pois tem magnitude que lhe dá destaque no céu, ou seja, brilha mais que as estrelas de sua vizinhança. Isso possibilita sua fácil localização no firmamento. Além disso Achernar se encontra em posição quase que diametralmente oposta ao Cruzeiro em relação ao Polo Celeste Sul, constituindo assim presença garantida no caso daquela constelação estar abaixo do horizonte (Figura 7). Entretanto, a leitura da hora local continua sendo feita a partir do ponteiro que aponta para o Cruzeiro do Sul, como indica a Figura 8.

Figura 7. Cruzeiro do Sul, a estrela Achernar e o Pólo Celeste Sul, em simulação do software *Stellarium* (com intervenção do autor), configurado às 3h do dia 16 de maio nas coordenadas de Porto Alegre.



Fonte: Simulador *Stellarium*, com intervenção do autor.

Figura 8 - Na ausência do Cruzeiro do Sul, o contra ponteiro deve ser usado para localizar a estrela Achernar. A leitura do horário, todavia, continua sendo feita pelo ponteiro do Cruzeiro do Sul. Ambos os ponteiros devem ser dispostos de diametralmente opostos entre si.



Fonte: Neves (1999, p. 50).

### 3. Uma réplica simplificada do Mecanismo de Antikythera como um instrumento didático

A partir do exposto na tabela 1.1 acerca dos conceitos subjacentes ao funcionamento do Mecanismo de Antikythera associada à ideia de uso dos relógios astronômicos simples como recursos educacionais descritos na sessão 1.1, sugere-se a construção de réplicas do Mecanismo a serem utilizadas como instrumentos didáticos para o Ensino e a Divulgação da Astronomia com possibilidades interdisciplinares no espaço escolar formal ou fora dele. Devido ao alto grau de sofisticação técnica do Mecanismo original, propõe-se a construção de réplicas simplificadas, onde:

- a) apenas o painel frontal, do planetário, será reproduzido.

b) o ponteiro indicador do Sol corresponderá ao Sol Médio. O mesmo ponteiro também servirá como indicador de data. Esta era a concepção inicial de Price (1974).

c) o ponteiro indicador da Lua também não incluirá o sistema de engrenagens *pin and slot*, portanto não reproduzindo o movimento da anomalia lunar. A precisão do ponteiro lunar será mensurada.

d) um ponteiro de Mercúrio no painel será incluído em um dos modelos propostos. A opção por Mercúrio e não por outro planeta foi feita porque ele realiza vários epiciclos no ano, o que tornar o fenômeno bastante evidente na réplica. A engrenagem será feita próxima à proposta de Carman e Evans (Figura 27 da parte I deste artigo). Todavia, este recurso provavelmente é o mais impreciso do modelo, devendo nosso foco, portanto ser voltado à reprodução do movimento epicíclico, não estendendo a predição a posição do ponteiro de Mercúrio por períodos de tempo muito longos afim de minimizar erros.

As engrenagens e painéis foram feitos com sistema de corte a laser em madeira (MDF) e no acrílico por empresas que fornecem este serviço. Os dois materiais (MDF e acrílico) têm espessuras de aproximadamente 3mm. As 3 réplicas simplificadas propostas ( $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ) e o protótipo que as antecederam são descritos a seguir.

### 3.1. Desenvolvendo um protótipo

Antes de se construir as réplicas definitivas, um protótipo foi montado e testado com o objetivo de identificar problemas de ordem técnica e prática, inserir aperfeiçoamentos e aprimorá-lo, que foram então incorporados nos modelos finais.

O protótipo foi feito em MDF de espessura 2,7mm, das engrenagens ao painel frontal e suportes auxiliares. A base é um quadrado de 10cm de lado. O suporte posterior é uma lâmina de aproximadamente 32cm x 5cm. Uma lâmina quadrada de 5cm de lado é encaixada na parte superior para fixar o conjunto. Todo o processo de corte foi feito a *laser*. Rolamentos de 1cm de diâmetro com orifício central de 3mm foram encaixadas na parte frontal do painel, por onde se fixou eixos (espetos de madeira) que se conectam às engrenagens. A lâmina da parte traseira possui furos de 3mm onde a outra extremidade dos eixos é encaixada.

Neste protótipo, a réplica do Mecanismo de Antikythera apresenta o painel da posição do Sol e da Lua separadamente. Isto foi feito com o objetivo de simplificar sua montagem. A parte superior contempla o mostrador solar, com dois círculos concêntricos, semelhante ao Mecanismo original: o círculo externo traz um calendário anual de 365 dias e 12 meses do ano ocidental moderno; o círculo interno traz as constelações zodiacais<sup>3</sup> que, diferente do Mecanismo original, contempla 13 e não apenas 12 constelações: inclui a de *Ofiúco*. A diferença é consequência do fenômeno da precessão dos equinócios<sup>4</sup>, que faz com que hoje a eclíptica<sup>5</sup> passe também por aquela constelação. O mostrador inferior é o lunar e contém apenas o círculo das 13 constelações.

<sup>3</sup> Constelações sobre as quais o Sol se desloca durante seu movimento aparente anual.

<sup>4</sup> Variação da direção do eixo de rotação da Terra devido a influências gravitacionais do Sol e da Lua, que leva 26.000 anos para completar uma volta (OLIVEIRA, SARAIVA, 2014).

<sup>5</sup> Linha que representa a trajetória do Sol em seu movimento aparente anual em relação às constelações.

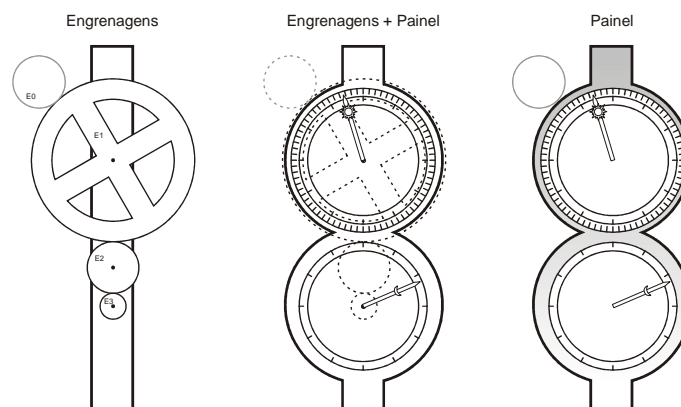


Inicialmente o protótipo foi concebido para apenas duas engrenagens. A maior reproduziria a posição média do Sol (com 226 dentes, número sugerido no Mecanismo original) e a menor, a da Lua. Para manter a relação de 254 ciclos lunares siderais por 19 ciclos solares, a quantidade de dentes da engrenagem da Lua deve ser:

$$\frac{254}{19} = \frac{226}{E_L} \Rightarrow E_L = \frac{226 \cdot 19}{254} \Rightarrow E_L = 16,905 \cong 17 \text{ dentes} \text{ (Equação 1)}$$

Onde  $E_L$  é o número de dentes da engrenagem do ponteiro da Lua. Mas desta forma o ponteiro da Lua giraria no sentido contrário do ponteiro do Sol, já que na transmissão de movimento de uma engrenagem para outra, o sentido de rotação é invertido. Isto poderia deixar a leitura confusa, além de induzir uma ideia (incorreta) de que o movimento aparente da Lua se daria no sentido oposto ao do Sol. Há ainda outro problema: apenas duas engrenagens deixam um espaço muito pequeno entre seus eixos. Isto limitaria o tamanho do painel que contém as inscrições de datas e das constelações, dificultando a visualização e a leitura. Para resolver estes dois problemas foi inserida uma engrenagem intermediária, de 113 dentes, deixando o conjunto como mostra a Figura 9.

Figura 9. Engrenagens e painel do protótipo de testes.



Fonte: Projeto e imagens do autor.

Assim foram denominadas: E1, com 226 dentes (do Sol), engrenada com E2 (113 dentes - intermediária), engrenada com E3 (17 dentes - da Lua). A engrenagem E0 aqui é hipotética e tem apenas a função de inserir movimento ao mecanismo. Seu número de dentes é irrelevante na reprodução dos ciclos astronômicos. Como o conjunto é um trem de engrenagens simples, a relação de transmissão final depende apenas do número de dentes da primeira engrenagem (E1) e da última (E3):

$$i = \frac{226}{17} \cong \frac{254}{19} \text{ (Equação 2)}$$

Nesta configuração a distância entre os eixos das engrenagens solar e lunar é de 13,6cm, o que permite a montagem de painéis de tamanho mais apropriado para a leitura. O mostrador do Sol pôde assim contemplar os dois círculos concêntricos, como no Mecanismo original,

descrito anteriormente. O círculo interno marca as 13 constelações zodiacais com tamanhos proporcionais ao tempo com que o Sol os ocupa no decorrer do ano enquanto se move pela eclíptica (quadro 2) A divisão de uma constelação e outra respeita a borda entre elas estabelecida oficialmente pela União Astronômica Internacional em 1930. Os dias que marcam a transição do Sol de uma constelação para outra foram obtidas a partir do simulador *Stellarium*<sup>6</sup>.

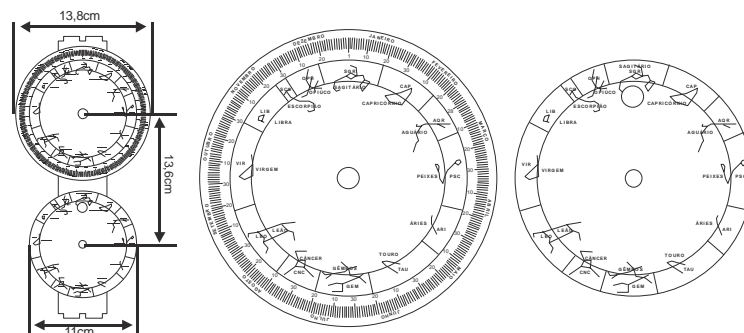
Quadro 2. Constelações zodiacais

Constelação	Nome em Latim	Abreviação	Tamanho (duração)
Capricórnio	<i>Capricornus</i>	CAP	19/01 a 16/02
Aquário	<i>Aquarius</i>	AQR	17/02 a 10/03
Peixes	<i>Pisces</i>	PSC	11/03 a 18/04
Áries	<i>Aries</i>	ARI	19/04 a 13/05
Touro	<i>Taurus</i>	TAU	14/05 a 20/06
Gêmeos	<i>Gemini</i>	GEM	21/06 a 19/07
Caranguejo (Câncer)	<i>Cancer</i>	CNC	20/07 a 09/08
Leão	<i>Leo</i>	LEO	10/08 a 16/09
Virgem	<i>Virgo</i>	VIR	17/09 a 29/10
Balança (Libra)	<i>Libra</i>	LIB	30/10 a 22/11
Escorpião	<i>Scorpius</i>	SCO	23/11 a 29/11
Ofiúco	<i>Ophiuchus</i>	OPH	30/11 a 17/12
Sagitário	<i>Sagittarius</i>	SGR	18/12 a 18/01

Fonte: Simulador *Stellarium*.

As dimensões e inscrições do painel frontal são ilustrados na Figura 10.

Figura 10. Dimensões do painel frontal (esquerda) e layout do mostrador do Sol (centro) e Lua (direita).

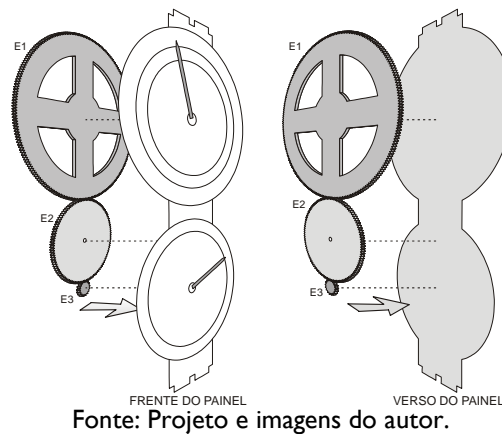


Fonte: Projeto e imagens do autor.

O engrenamento do sistema E1, E2 e E3 e sua disposição no protótipo são representados na Figura 11.

<sup>6</sup> Download disponível em: <http://www.stellarium.org>

Figura 11. Sistema de engrenagens do Modelo M1.



Fonte: Projeto e imagens do autor.

A engrenagem intermediária (E2) apresentou algumas instabilidades durante a rotação, inclinando-se aleatoriamente enquanto girava, produzindo pequenos "travamentos" no mecanismo. O problema foi solucionado colando 4 arruelas como apoio, de cerca de 1mm de espessura, na lâmina traseira a 1cm de distância do orifício onde se conectava o eixo da engrenagem E2. Desta forma a engrenagem girava sempre no mesmo plano, cessando as inclinações e eliminando quase todos os travamentos. Entretanto, alguns travamentos ainda persistiram. Mesmo que pouco frequentes, causavam o incômodo de, devido ao movimento brusco das engrenagens após destravar, forçar o ponteiro lunar (inferior) a deslizar sobre seu eixo, alterando totalmente sua posição. Este problema ocorreu porque, como demonstra a equação 05, a engrenagem lunar (E3) teria um valor calculado de 16,9 dentes. Por razões evidentes, fisicamente não existem engrenagens com número de dentes decimais, apenas inteiros. Por isso no protótipo o seu valor foi "arredondado" para 17 dentes. Esta pequena diferença vai se acumulando a cada volta até que, em algum ponto, os dentes das engrenagens E2 e E3 já não estão sincronizadas entre si, causando um pequeno travamento que só se desfaz forçando um pouco o movimento das engrenagens. Este problema exigiu mudar o número de dentes no modelo definitivo R1. A Figura 12 exhibe fotos do protótipo, montado e funcional. Nesta fotografia, os ponteiros indicadores eram feitos com arame de 1mm de espessura.

Figura 12. O protótipo montado: face frontal (esquerda) e traseira (direita).



Fonte: Projeto e imagens do autor.

Para mensurar a precisão deste protótipo foi escolhido o ponteiro lunar como referência, já que o ponteiro solar indica a data (dia e mês) e é o parâmetro temporal que se toma como ponto de partida. Portanto, avaliar a precisão do ponteiro lunar irá mensurar a eficiência da transmissão do movimento das outras engrenagens até este ponteiro. Para esta avaliação, foi tomada como referência a posição real da Lua em relação às constelações<sup>7</sup> exibida no simulador *Stellarium*. A posição do simulador foi então comparada com a indicada pelo ponteiro lunar desta réplica do Mecanismo. Foram 12 medidas, feitas no dia 20 de cada mês, as 16h (horário arbitrariamente escolhido). O ponto de início foi em 20 de março/2019, pois está a posição 0° na eclíptica, na constelação de Peixes. Nesta data a Lua se encontra a 186° da eclíptica (sentido horário do painel) na constelação de Virgem. Então o ponteiro da Lua, que é fixado no seu eixo de modo não rígido, foi manualmente deslocado para esta posição. A décima segunda e última medida foi em 20 de fevereiro de 2020, completando assim o ciclo. Os 24 ângulos medidos (12 para a posição da Lua indicada no simulador *Stellarium* e 12 para a posição da Lua indicada pela réplica simplificada do Mecanismo) e a constelação correspondente a cada uma das datas estão no quadro 3.

Quadro 3. Lua de 20/03/2019 a 20/02/2020 - Posições: real (*Stellarium*) e do protótipo.

Data	Posição da Lua ( <i>Stellarium</i> )	Constelação ( <i>Stellarium</i> )	Posição da Lua (protótipo)	Constelação (protótipo)
20/março	184°	Virgem	184°	Virgem
20/abril	228°	Libra	233°	Libra
20/maio	264°	Ofiúco	266°	Ofiúco
20/junho	309°	Capricórnio	315°	Capricórnio
20/julho	341°	Aquário	360°	Peixes
20/agosto	26 °	Peixes	48 °	Áries
20/setembro	72 °	Touro	110 °	Gêmeos
20/outubro	108 °	Gêmeos	140 °	Câncer
20/novembro	160 °	Leão	191 °	Virgem
20/dezembro	199 °	Virgem	219 °	Virgem
20/janeiro	251 °	Ofiúco	265 °	Ofiúco
20/fevereiro	299°	Sagitário	298°	Sagitário

Fonte: Simulador *Stellarium* e indicação direta no protótipo.

Os dados do quadro 3 são expressos no gráfico I. O gráfico I indica que a réplica perde precisão na indicação da posição da Lua enquanto o tempo avança, atingindo o maior erro em setembro (diferença de 38°). Deste ponto em diante a diferença da leitura da réplica em relação a posição real da Lua cai gradativamente até coincidir de novo, em fevereiro (diferença de apenas 1°). A imprecisão se deve ao fato da Lua representada pelo ponteiro da réplica ser da "Lua média", não contemplando a anomalia lunar. Desta forma em algum momento a Lua verdadeira desacelera, ficando atrasada em relação a indicação desta réplica do Mecanismo. Em outro momento a Lua verdadeira acelera, recuperando a posição e praticamente coincidindo com a indicação do ponteiro da réplica no final do ciclo.

<sup>7</sup> Mais exatamente, trata-se da projeção da posição da Lua sobre a eclíptica.

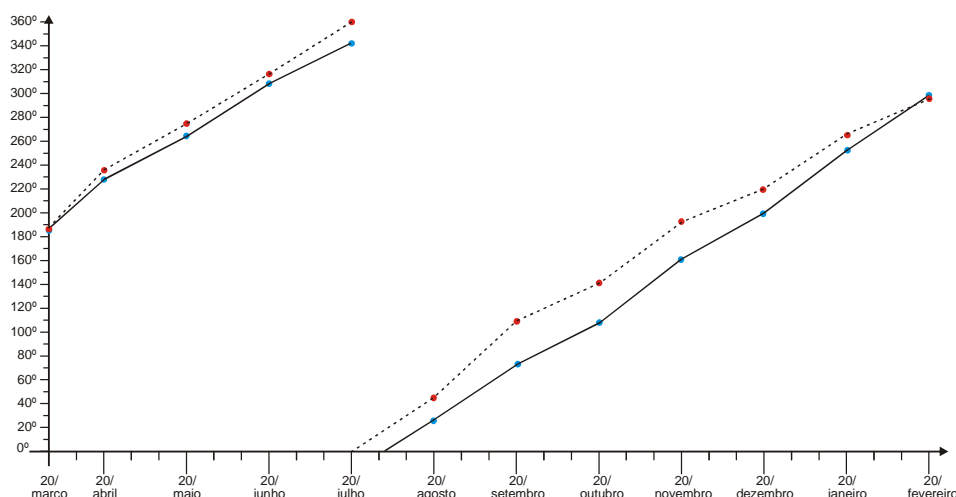


Gráfico I.- Posição da Lua verdadeira (linha cheia) e posição da lua indicada pela réplica (linha pontilhada).

Apesar da leitura para o teste ter sido realizada no ciclo de um ano, e a anomalia lunar transcorrer durante o mês, o fato de a cada mês do calendário a posição da Lua se adiantar em relação às constelações de fundo acaba refletindo o mesmo efeito da anomalia lunar no decorrer de um ciclo da Lua. A escolha teve um critério prático: realizar o teste em um único mês exigiria leituras em escala de tempo pequena (cerca de 3 em 3 dias), de mais difícil visualização, e a precisão das medidas seria menor. Ao fixar um dia no mês e observar o ponteiro da Lua até completar um ciclo de um ano, a leitura se tornou mais fácil e precisa.

### 3.2. Réplica didática simplificada Sol-Lua de painéis separados ( $R_1$ )

Na réplica didática simplificada do Mecanismo de Antikythera denominada  $R_1$ , a quantidade de engrenagens é a mesma do protótipo, mas o número de dentes foi alterado para evitar o problema residual de travamento citado anteriormente. A solução foi simples: para se obter a relação de 254/19 do Mecanismo original, a engrenagem E1 foi feita com 254 dentes e a E3 com 19. A engrenagem intermediária (E2) ficou com 127 dentes (metade de E1). Como se trata de um trem de engrenagens simples, a relação de transmissão final depende apenas de E1 e E3:

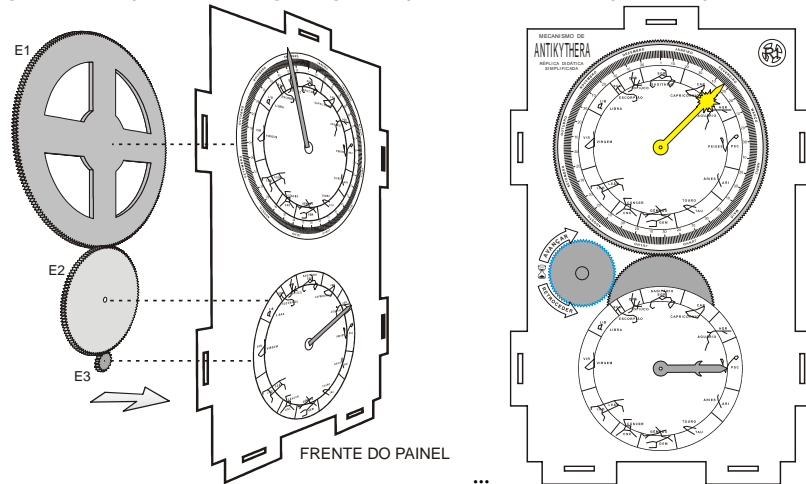
$$i = \frac{254}{19} \quad (\text{Equação 3})$$

Foi obtida assim uma relação de transmissão total exata de 19 ciclos solares por 254 ciclos lunares siderais, com números inteiros calculados de dentes para todas as engrenagens, solucionando os travamentos ocasionais.

Como o objetivo da réplica  $R_1$  é ter montagem simples, o painel frontal com o mostrador do Sol e da Lua são idênticos aos do protótipo, como mostrado na Figura 13, diferenciando-se apenas no acabamento e invólucro do conjunto: um painel e invólucro de acrílico transparente (29cm x 18cm) e engrenagens de MDF, para que as engrenagens fiquem visíveis. Isto foi feito

também nas outras réplicas. Os eixos são encaixados em rolamentos de 4mm de orifício, na parte frontal do dispositivo. A engrenagem E0 tem 72 dentes. Os eixos são espetos de madeira de 3,7mm de diâmetro. A figura 13 ilustra engrenagens e aspecto final da réplica.

Figura 13. Esquema das engrenagens e painel frontal da réplica simplificada R1.



Fonte: Projeto e imagens do autor.

Para mensurar a precisão da réplica R1, foi usada a mesma metodologia aplicada no protótipo. O horário da simulação foi fixado à 0h para facilitar a leitura da data no painel superior. O quadro 4 mostra os valores obtidos.

Quadro 4. Lua de 20/03/2019 a 20/02/2020 - Posições: real (*Stellarium*) e da réplica R1.

Data	Posição da Lua ( <i>Stellarium</i> )	Constelação ( <i>Stellarium</i> )	Posição da Lua (réplica)	Constelação (réplica)
20/março	165°	Leão	165°	Leão
20/abril	218°	Libra	204°	Virgem
20/maio	254°	Ofiúco	244°	Escorpião
20/junho	301°	Capricórnio	290°	Sagitário
20/julho	333°	Aquário	309°	Capricórnio
20/agosto	18°	Peixes	05°	Peixes
20/setembro	64°	Áries	61°	Touro
20/outubro	100°	Gêmeos	95°	Gêmeos
20/novembro	151°	Leão	141°	Câncer
20/dezembro	190°	Virgem	178°	Leão
20/janeiro	243°	Escorpião	225°	Libra
20/fevereiro	292°	Sagitário	290°	Sagitário

Fonte: Simulador *Stellarium* e indicação direta no protótipo.

Os valores angulares do quadro 4 são expressos no gráfico II.

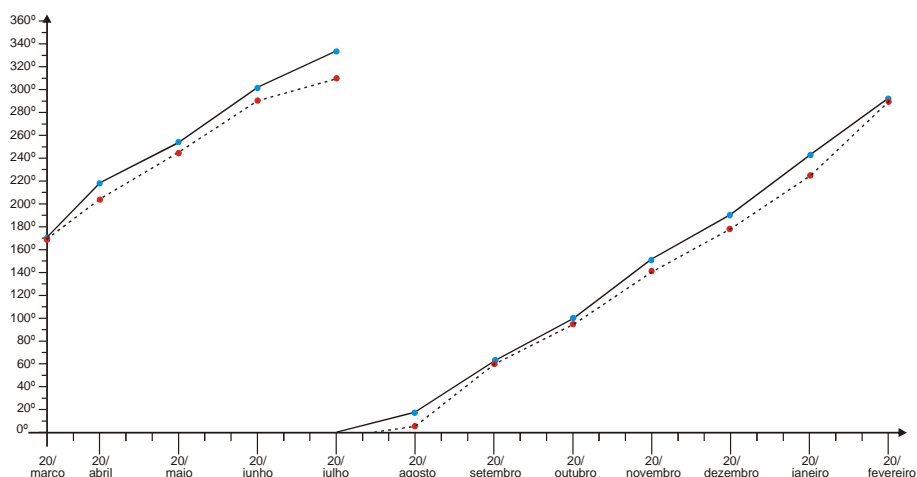
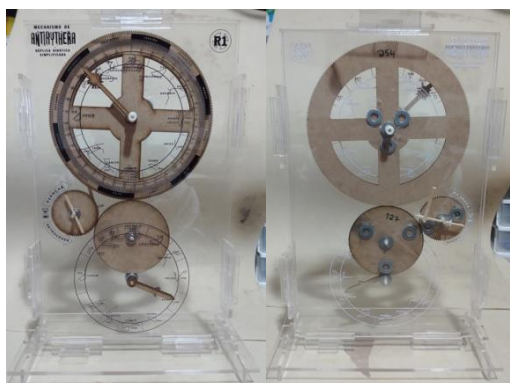


Gráfico 2. Posição da Lua verdadeira (linha cheia) e posição da lua indicada pela réplica R1 (linha pontilhada).

Tal como verificado com o protótipo, a réplica R1 perde precisão na indicação da posição da Lua enquanto o tempo avança devido ao fenómeno da anomalia lunar, que a réplica não contempla. O descompasso é diferente do caso anterior porque desta vez foi optado por outro horário na simulação (0h). O maior erro ocorreu em julho, com diferença de  $11^\circ$  entre a posição real da Lua e a indicada pela réplica. É um erro máximo bem menor do que o do protótipo, que tinha atingido  $38^\circ$ . A melhora se deve a modificação nos dentes das engrenagens que, desta vez, tem valores exatos, sem aproximações, compondo precisamente o ciclo de 19 ciclos solares siderais por 254 ciclos lunares siderais. Ao fim, em fevereiro, a diferença foi de apenas  $2^\circ$ .

A figura 14 traz uma fotografia da réplica R1 montada e funcional. As engrenagens são feitas em MDF de espessura 2,7mm, assim como os ponteiros solar e lunar. O invólucro é feito de acrílico transparente de espessura 3,1mm.

Figura 14. Réplica R1: face frontal (esquerda) e traseira (direita).

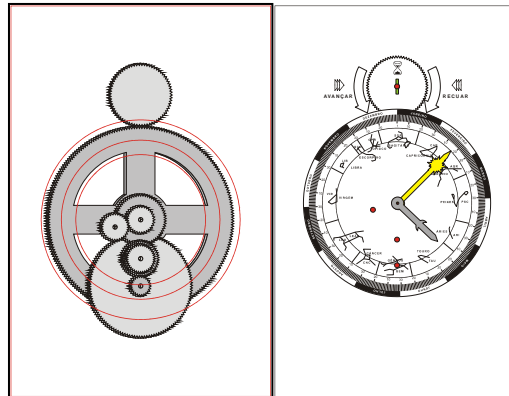


Fonte: Projeto e imagens do autor.

### 3.3. Réplica didática simplificada Sol-Lua de painel único (R<sub>2</sub>)

A réplica didática simplificada R<sub>2</sub> tem seu *layout* idêntico ao do Mecanismo de Antikythera: o painel do planetário que contém os ponteiros do Sol e da Lua é único. As engrenagens são totalmente diferentes das usadas na réplica anterior: mais numerosas, conectadas de modo mais elaborado umas com as outras e seguindo o mesmo engrenamento do trem de engrenagens principal do Mecanismo original, exceto pela ausência das engrenagens com sistema pino e fenda (*pin and slot*). Um esquema de R<sub>2</sub> é ilustrado na Figura 15.

Figura 15. Engrenagens (esquerda) e painel frontal (direita) da réplica didática simplificada R<sub>2</sub>.



Fonte: Projeto e imagens do autor.

As engrenagens da réplica R<sub>2</sub> têm as seguintes características:

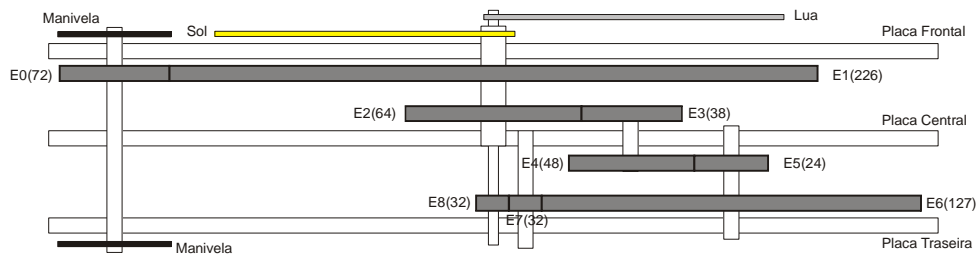
- E0: sua função é dar movimento do mecanismo. Possui 72 dentes (valor arbitrário). Está conectada a uma manivela e é engrenada com E1.
- E1: é a engrenagem solar. Possui 226 dentes, dentro do limite do que foi estabelecido para a engrenagem solar do Mecanismo original (B1).
- E2: rigidamente ligada com E1 por quatro pinos, tem 64 dentes e é a primeira engrenagem que compõe o sistema para o movimento do ponteiro da Lua. O cálculo das relações de transmissão para o sistema lunar começa nesta engrenagem.
- E3: engrenada com E2, possui 38 dentes.
- E4: rigidamente ligada com E3 pelo eixo. Possui 48 dentes.
- E5: engrenada com E4, tem 24 dentes.
- E6: rigidamente ligada com E5 pelo eixo, tem 127 dentes.
- E7: engrenada com E6, tem 32 dentes. Está presente como engrenagem intermediária para "desinverter" o sentido final de rotação do ponteiro da Lua, deixando-o no mesmo sentido do ponteiro do Sol.
- E8: engrenada com E7, é a última engrenagem. Seu eixo se estende até a parte frontal da réplica. O ponteiro da Lua fica fixado em sua extremidade. É idêntica a E7 (32 dentes).

Os eixos das engrenagens E3, E4, E5 e E6 são encaixados em rolamentos com orifício de 4mm de diâmetro. Isso foi fundamental pois testes anteriores mostraram muita pressão nesse



conjunto, que travava com frequência. O uso dos rolamentos permitiu um movimento muito mais livre do sistema. O *layout* das engrenagens da réplica R2 está na Figura 16.

Figura 16. Engrenamento da réplica R2. Entre parênteses estão o número de dentes das engrenagens.



Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

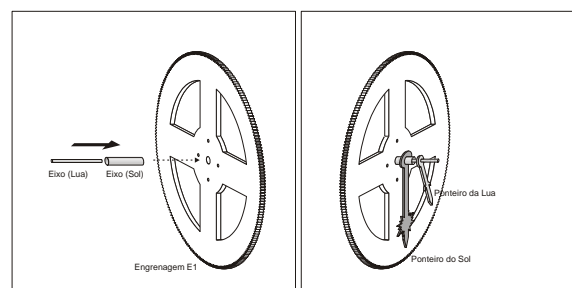
Para o sistema lunar, um trem de engrenagens composto, as relações de transmissão partem de E2 até E7. E8 não é necessária no cálculo porque tem o mesmo número de dentes que E7. A relação de transmissão final fica em 254/19, como no Mecanismo original, seguindo a equação:

$$i = \frac{64}{38} \times \frac{48}{24} \times \frac{127}{32} = \frac{254}{19} \quad (\text{Equação 4})$$

que é idêntica à equação 04 (da parte I deste artigo) para o Mecanismo original.

Para que o painel frontal fosse único, os ponteiros do Sol e da Lua devem partir do mesmo ponto. Por isto o eixo das engrenagens E1 e E2 é feito de um tubo de cobre de 3cm de comprimento e 5mm de diâmetro externo usado em sistemas de refrigeração. É nele que o ponteiro do Sol é fixado. O eixo ponteiro da Lua é um palito dentes e passa pelo interior do tubo. Sua extremidade interna serve como eixo de rotação rigidamente ligado à engrenagem E8 e sua extremidade externa é onde o ponteiro da Lua é fixado. Essa técnica é usada no Mecanismo original e está representada no esquema da Figura 17. Os eixos das demais engrenagens são feitos de espeto de madeira com 3,7mm de diâmetro.

Figura 17. Tubo (eixo para o ponteiro do Sol) montado na engrenagem E1. Pelo seu interior passa o eixo do ponteiro da Lua.



Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

Medidas para indicar a precisão desta réplica foram realizadas usando a mesma metodologia da réplica anterior. O resultado está no quadro 5.



Quadro 5. Lua de 20/03/2019 a 20/02/2020 - Posições: real (*Stellarium*) e da réplica R1.

Data	Posição da Lua ( <i>Stellarium</i> )	Constelação ( <i>Stellarium</i> )	Posição da Lua (réplica)	Constelação (réplica)
20/março	165°	Leão	165°	Leão
20/abril	218°	Libra	180°	Virgem
20/maio	254°	Ofiúco	210°	Virgem
20/junho	301°	Capricórnio	285°	Sagitário
20/julho	333°	Aquário	336°	Aquário
20/agosto	18°	Peixes	30°	Áries
20/setembro	64°	Áries	60°	Touro
20/outubro	100°	Gêmeos	91°	Gêmeos
20/novembro	151°	Leão	122°	Câncer
20/dezembro	190°	Virgem	141°	Leão
20/janeiro	243°	Escorpião	197°	Virgem
20/fevereiro	292°	Sagitário	261°	Ofiúco

Fonte: Simulador *Stellarium* e indicação direta no protótipo.

Os valores angulares do quadro 5 são expressos no gráfico III.

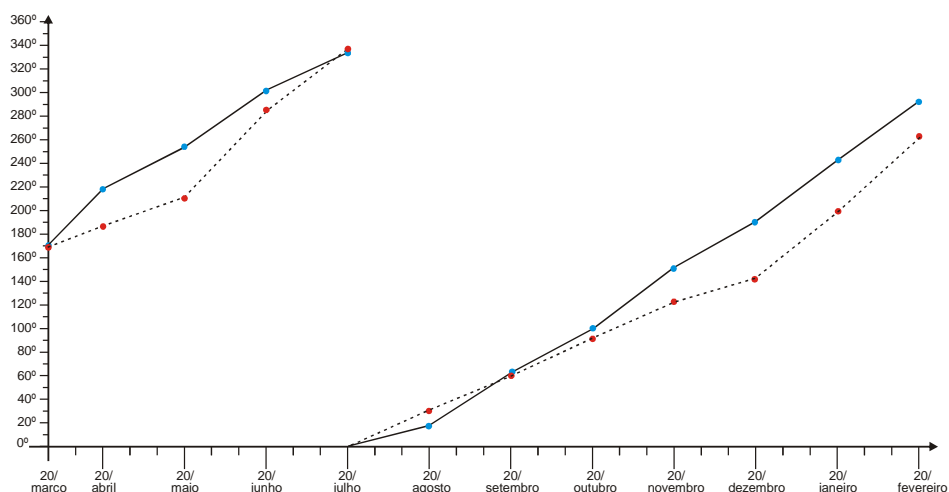
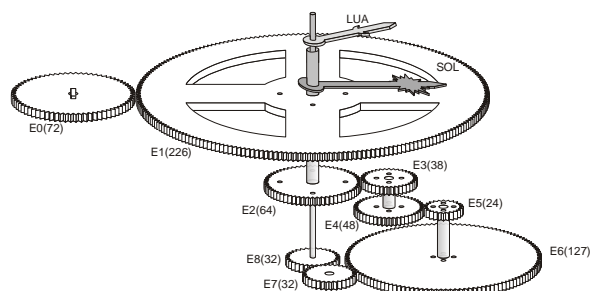


Gráfico3. Posição da Lua verdadeira (linha cheia) e posição da lua indicada pela réplica R2 (linha pontilhada).

A Figura 18 ilustra o trem de engrenagens da réplica R2. Na Figura 19 estão as fotos da réplica R2 montada e funcional.

Figura 18. Trem de engrenagens da réplica R2. Entre parênteses estão o número de dentes das engrenagens.



Fonte: Projeto e ilustração do autor.

Figura 19. Réplica R2: face frontal (esquerda) e traseira (direita).

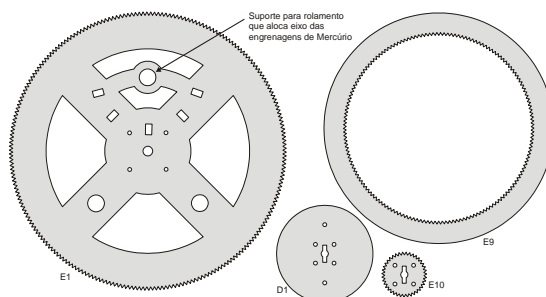


Fonte: Projeto e imagens do autor.

### 3.4. Réplica didática simplificada Sol-Lua-Mercúrio de painel único (R<sub>3</sub>)

A réplica didática simplificada R<sub>3</sub> foi concebida para a partir do *layout* do modelo anterior, ou seja, com o painel do planetário unitário. A diferença é que, além dos ponteiros indicadores do Sol e da Lua, este modelo apresenta também o ponteiro indicador do planeta Mercúrio. Isto torna esta a mais elaborada das réplicas apresentadas aqui. As engrenagens da réplica R<sub>3</sub> para a Lua são idênticas as de R<sub>2</sub>. A diferença fica por conta das engrenagens do planeta Mercúrio. Elas têm configuração inspirada nas engrenagens epicíclicas da proposta apresentada por Carman. Isto exigiu uma ligeira modificação na engrenagem do Sol (E1) para acomodar o conjunto de engrenagens responsáveis pelo movimento do ponteiro de Mercúrio. Esta modificação na engrenagem E1 e as engrenagens para Mercúrio são ilustradas na Figura 20. O eixo do ponteiro da Lua, como na réplica anterior, é feito de um palito de dentes (madeira). Os demais eixos são feitos a partir de espetos de madeira de 3,7mm de diâmetro. Mais rolamentos foram usados nesta réplica para alocar as extremidades dos eixos das engrenagens, afim de deixar o movimento do conjunto o mais livre possível. O rolamento do eixo da engrenagem E1 é maior que os outros, com orifício de 5mm de diâmetro para permitir o encaixe de um tubo de cobre de 5cm que é o eixo de E1.

Figura 20. Alteração em E1 e engrenagens para o ponteiro do planeta Mercúrio (E9 e E10) e o disco D1.

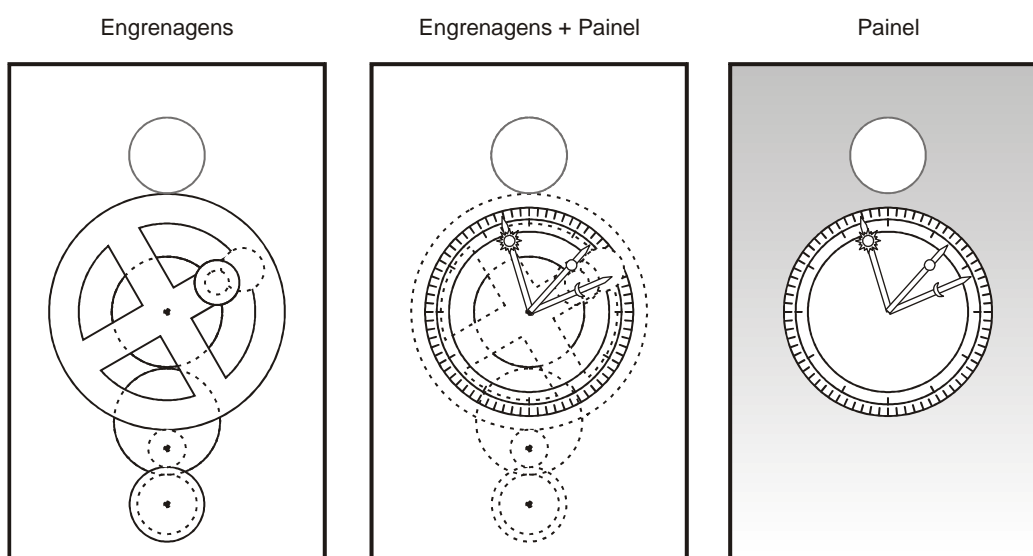


Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

As partes constitutivas do sistema epicíclico que controla o ponteiro de Mercúrio são as engrenagens E9 e E10 e o disco de acrílico D1. Foram concebidas da forma como estão apenas para uso nesta réplica. Não estão presentes com esta configuração nas réplicas fiéis do

Mecanismo feitas no AMRP, e são inteiramente conjecturais. A engrenagem E9 é de dentes internos, em uma abertura na placa frontal. A engrenagem E10 e o disco de acrílico D1 são rigidamente ligados pelo eixo. Este eixo é fixado no rolamento alocado no orifício apropriado na engrenagem E1, como mostra esquematicamente a Figura 21. E9 e E10 são engrenadas, ou seja, são conectadas pelos seus dentes (E10 fica dentro de E9).

Figura 21. Engrenagens e painel frontal do modelo simplificado M3.



Fonte: Projeto e imagens do autor.

O número de dentes de E9 e E10 foram calculados a partir do período orbital de Mercúrio, de aproximadamente 88 dias. Como o ano de 365 dias, a relação que deve ser obedecida é  $365/88$ . Se esses números fossem utilizados para determinar a quantidade de dentes (respectivamente E9 e E10), estas engrenagens ficariam muito grandes e não se encaixariam na réplica. Então foi realizada uma redução proporcional: E9 com 162 dentes e E10 com 39 dentes. Assim:

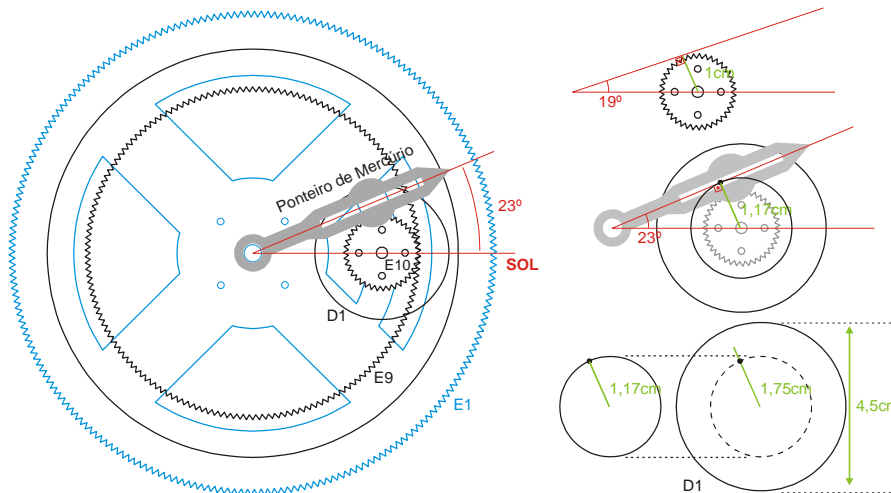
$$i = \frac{365}{88} \cong \frac{162}{39} \cong 4,15 \quad (\text{Equação 5})$$

Ou seja, o ponteiro de Mercúrio realiza 4 epiciclos durante um ano. Como a órbita de Mercúrio é muito elíptica e precessiona em decorrência de efeitos relativísticos que já não podem ser desconsiderados por causa da proximidade com o Sol, a elongação máxima<sup>8</sup> deste planeta varia de  $18^\circ$  a  $28^\circ$  (OLIVEIRA, SARAIVA, 2014). Será usado então a média de  $23^\circ$  para a elongação máxima de Mercúrio que esta réplica poderá indicar. O ponteiro de Mercúrio possui uma fenda que é conectado à engrenagem epicíclica. Mas esta engrenagem (E10), com o diâmetro necessário para ter 39 dentes, não é suficiente para fazer o ponteiro alcançar um angulo máximo de  $23^\circ$ . Então um disco de acrílico com diâmetro maior (4,5cm) denominado

<sup>8</sup> Elongação máxima de um planeta é a maior distância aparente que ele adquire do Sol, quando visto da perspectiva da Terra. É uma medida angular.

aqui de D1 foi conectado rigidamente com E10 pelo eixo. O disco D1 é que contém um pino onde o ponteiro de Mercúrio é encaixado. O esquema é ilustrado na Figura 22.

Figura 22. Esquema das engrenagens epicíclicas para o planeta Mercúrio, semelhante a proposta de Carman e Evans (2012).

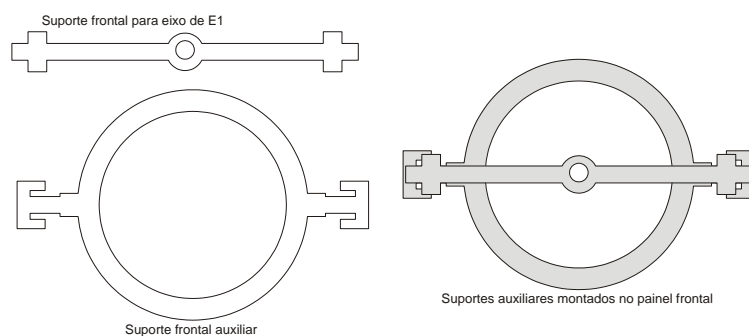


Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

Foi projetado um local para fixar o rolamento para o eixo de E10 ao invés de fazê-lo em um dos braços da engrenagem E1, com já visto na Figura 20. Assim o ponteiro do Sol pode ficar entre os braços de E1, garantindo sua melhor visibilidade. Caso contrário poderia facilmente se confundir com o braço da engrenagem por causa da coloração semelhante.

A engrenagem E9, de dentição interna, exigiu uma grande abertura no painel frontal. Isto deixou o eixo da engrenagem E1 sem apoio. Foi necessário um suporte auxiliar no painel da réplica R3: uma haste de acrílico horizontal com um orifício central onde se fixou um rolamento de abertura de 5mm. Ali o eixo de E1 pode ser encaixado. Sobre a estrutura que fixa a haste no painel foi também acrescentada uma borda circular de acrílico para manter o ponteiro de Mercúrio sempre no mesmo plano. Sem esta borda circular, o ponteiro tenderia a desencaixar-se do pino do disco D1. Estes suportes auxiliares estão ilustrados na Figura 23.

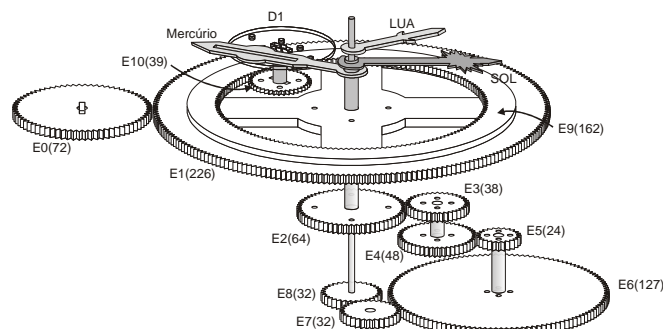
Figura 23. Suportes auxiliares no painel frontal da réplica R3.



Fonte: Ilustração vetorizada pelo autor.

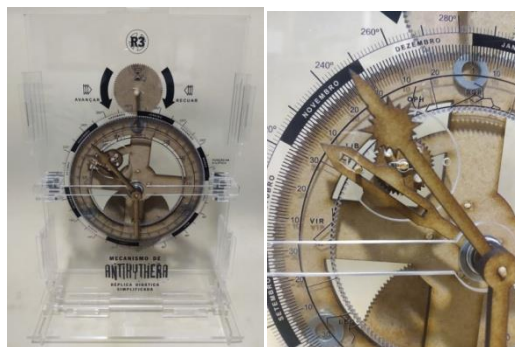
Devido a todas as aproximações feitas em relação a órbita de Mercúrio, a precisão na indicação do ponteiro deste planeta é baixa. Mas o sistema reproduz bem o movimento epicíclico, que é o conceito principal que pode ser explorado nesta réplica. O restante do sistema de engrenagens segue o esquema de R2. Assim dispensa-se aqui uma análise de precisão pois é razoável assumir que é muito parecida (senão idêntica) a precisão expressa no quadro 4 e no gráfico III da réplica anterior. A Figura 24 ilustra o trem de engrenagens da réplica R3. Na Figura 25 estão fotos da réplica R3 montada e funcional.

Figura 24 - Trem de engrenagens da réplica R3. Entre parênteses estão o número de dentes das engrenagens.



Fonte: Projeto e ilustração do autor.

Figura 25. Réplica R3: face frontal (esquerda) e destaque à engrenagem epicíclica e o ponteiro do planeta Mercúrio (direita).



Fonte: Projeto e imagens do autor.

#### 4. Considerações Finais

O Mecanismo de Antikythera sintetiza a Ciência e a Técnica da Antiguidade Grega em um conjunto complexo, otimizado e harmonioso de engrenagens. Astronomia, Física, Matemática e Filosofia se encontram nesta máquina de mais de 2.000 anos de idade. A história e sofisticação encantadoras do Mecanismo o torna um instrumento didático motivador para estudantes e entusiastas da Astronomia e das Ciências.

Um estudo do funcionamento do Mecanismo traz conceitos de Astronomia que podem orientar o ensino desta ciência tanto no espaço formal, da escola, como no informal, da difusão e divulgação de Ciência. Mais do que isto: olhar para seu intrincado sistema de engrenagens é um convite ao estudo da Física, das técnicas, e até uma ponte entre o estudante da educação básica com uma introdução às engenharias.

O histórico das pesquisas realizadas para se compreender o Mecanismo enquanto um artefato arqueológico mostra que houve (e ainda há) um esforço de cientistas de muitas áreas de conhecimentos diferentes. Isto demonstra como a ação combinada multidisciplinar é importante no desenvolvimento da Ciência, e que a própria máquina pode se apresentar como um instrumento didático articulado com a multidisciplinaridade e a interdisciplinaridade.

Apontados estes aspectos acerca do Mecanismo de Antikythera, foi proposta a construção de réplicas didáticas simplificadas. A ideia da construção de réplicas parte da utilização de outros instrumentos didáticos mais simples, como os relógios astronômicos. Estas réplicas do Mecanismo, e os instrumentos didáticos em geral, dão mais materialidade aos conceitos estudados, convergindo-os em um único dispositivo. Os custos para a construção destas réplicas, nos três níveis diferentes de complexidade apresentados neste estudo, são factíveis para uma instituição de ensino, um grupo de divulgação científica e até para muitas pessoas individualmente, como profissionais da Educação e entusiastas da Astronomia e História da Ciência.

## Referências

BANDEIRA, B.; Mecanismo de Anticítera: uma dinâmica de representação do Cosmos, Buenos Aires, **Filosofia e Historia de la Ciencia en el Cono Sur**, out 2015.

BANDEIRA, BEATRIZ; Comparações entre os mecanismos com engrenagens do séc. II a.C a 1221/2 d.C, São Paulo, 13º **Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia**, set 2012.

BANDEIRA, B.; **Mecanismo de Anticítera: a precisão das engrenagens**, Paraíba, 16º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia, out. 2018.

FREETH, T. et al, Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera Mechanism, **Nature**, v. 454, p. 614-617, jul.2008. Disponível em: <www.antikythera-mechanism.gr>. Acesso em: 07 abr 2019.

JONES, A. The Antikythera Mechanism and the Public Face of Greek Science, Conference: From Antikythera to the Square Kilometre Array: **Lessons from the**

**Ancients**, Kerastari, jun. 2012. Disponível em: <www.antikythera-mechanism.gr>. Acesso em: 07 abr 2019.

LANGHI, N. **Educação em Astronomia: repensando a formação de professores**. São Paulo: Editora Escrituras, 2012.

LANGHI, R.; **Aprendendo a ler o céu**; São Paulo: Livraria da Física, 2016.

MOUSSAS et al, **The gears of the Antikythera Mechanism: an educational pathfinder to the solar system**, Cambridge, The Role of Astronomy in Society and Culture, 2009.

MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas; **Astronomia na época dos descobrimentos**; Rio de Janeiro; Lacerda, 2000.

MOURÃO, R. R. de F. **Manual do Astrônomo**; Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2001.

Recebido em: 05/12/2019

Aceito em: 30/12/2019

Endereço para correspondência:

Nome: Wilson Guerra

Email: wilsonguerra@gmail.com



Esta obra está licenciada sob uma Licença [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)