

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**O USO DO TEATRO PARA INTRODUÇÃO DA
ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO**

EDERALDO BUENO DE MACEDO JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

COORIENTADOR: PROF. DR. EDEMAR BENEDETTI FILHO

Sorocaba - SP
Agosto de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**O USO DO TEATRO PARA INTRODUÇÃO DA
ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO**

EDERALDO BUENO DE MACEDO JUNIOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Edemar Benedetti Filho.

Sorocaba - SP
Agosto de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Ederaldo Bueno de Macedo Junior, realizada em 05/08/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. James Alves de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Renato Fernandes Cantão (UFSCar)

Prof. Dr. Thiago Werlang de Oliveira (UFMT)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Ederaldo Bueno de, Macedo Junior

O uso do teatro para introdução da Astronomia no ensino médio / Macedo Junior Ederaldo Bueno de -- 2021. 147f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): James Alves de Souza

Banca Examinadora: Renato Fernandes Cantão, Thiago Werlang de Oliveira

Bibliografia

1. Teatro. 2. Astronomia. 3. Ensino de física. I. Ederaldo Bueno de, Macedo Junior. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais – Ederaldo e Maria Heloíza –, a minha filha – Isadora – e a minha irmã – Patrícia –, que sempre me apoiaram e nunca desistiram de mim.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Agradeço ao Prof. Dr. James Alves de Souza por sua dedicação, assertividade, atenção, prontidão e carinho em me orientar. Mesmo sendo um Professor muito ocupado, sempre arrumava um tempo para me auxiliar. Muito obrigado por tudo que o senhor me proporcionou em termos de aprendizado, humildade e lealdade.

Agradeço ao Prof. Dr. Edegar Benedetti Filho por ter sido o meu coorientador. Muito obrigado, Professor, por ter me auxiliado na parte artística da dissertação, o senhor me proporcionou crescimento e ampliou minha mente em relação a educar de uma maneira lúdica e divertida.

Agradeço a todos os professores do PROFIS-So e aos meus colegas de mestrado, em especial ao Paulo Sergio Prado de Oliveira, pelo tempo que passamos juntos e pelas ideias trocadas, cada um contribuiu de uma forma especial na minha vida.

Agradeço aos meus pais pela educação e formação que me proporcionaram, à minha filha que é meu tesouro, à minha irmã pelo carinho, aos meus sobrinhos queridos e ao meu cunhado por serem minha família e sempre me apoiarem.

Agradeço à escola que trabalhei por ter me oferecido uma sala grande para realização do teatro, aos meus alunos e principalmente aos que participaram da peça de teatro “Sistema Maluco”, pois foram fundamentais para que eu pudesse escrever esta dissertação.

“A vida é como andar de bicicleta. Para se equilibrar é preciso estar em movimento.”

ALBERT EINSTEIN

RESUMO

MACEDO JUNIOR, E. B. O Uso do Teatro para Introdução da Astronomia no Ensino Médio. 2021. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2021.

A participação ativa dos alunos em atividades que fazem sentido para os mesmos é uma alternativa muito promissora para tornar o ensino de Física mais interessante e acessível. Para isso os estudantes devem ser engajados em processos criativos, através dos quais eles poderão agir como jovens cientistas comunicando a ciência. Outro fator importante neste processo é a contextualização dos assuntos a serem aprendidos em sala de aula com o cotidiano deles, mesmo estes tendo um caráter mais teórico, através de teorias e modelos matemáticos, ou um caráter mais observacional, através de experimentos ou análises dos fenômenos da natureza. O ensino de ciências através do teatro tem o potencial de reunir investigação científica e artística. Os alunos podem aprender ciência de uma forma criativa enquanto implementam uma performance teatral dos conceitos científicos relacionados. Neste trabalho utilizamos o teatro como metodologia de ensino para introduzir conceitos de astronomia no ensino médio. Desenvolvemos o roteiro de uma peça de teatro intitulada como “Sistema Maluco”, a qual foi apresentada em uma feira de Ciências de uma escola particular da cidade de Mogi Guaçu no interior de São Paulo. Nas encenações teatrais trabalhamos conceitos como o sistema geocêntrico e heliocêntrico, os movimentos do Sol, da Terra e da Lua, dias, noites, estações do ano, eclipses solares e lunares, marés, entre outros. A peça foi conduzida pelo professor e pelos próprios alunos e apresentada para um público geral, bastante diversificado, de uma maneira lúdica e divertida. Com esta proposta foi possível fazer com que os alunos compreendessem os conceitos científicos e os fenômenos abordados, assim como desenvolver um espírito de cooperatividade e trabalho em grupo, permitindo que eles participassem ativamente da negociação dos conceitos científicos abordados na peça, desenvolvendo habilidades de pensamento crítico e criativo. Adicionalmente, por ser uma atividade de divulgação, a atuação teatral dos alunos contribuiu de maneira significativa para aproximar a escola da sociedade e para desenvolver suas próprias competências sociais e empreendedoras.

Palavras-chave: Teatro. Astronomia. Ensino de Física. Ensino Médio.

ABSTRACT

MACEDO JUNIOR, E. B. The Use of Theater to Introduce Astronomy in High School. 2021. Dissertation (Master in Physics Teaching) - Federal University of São Carlos, Sorocaba *campus*, Sorocaba, 2021.

The active participation of students in activities that make sense to them is a very promising alternative to make Physics teaching more interesting and accessible. For that, students must be engaged in creative processes, through which they can act as young scientists communicating science. Another important factor in this process is the contextualization of subjects to be learned in the classroom with their daily lives, even though they have a more theoretical character, through theories and mathematical models, or a more observational character, through experiments or analysis of natural phenomena. Learning science through theater has the potential to bring together science and art inquiry. Students can learn science in a creative way while implementing a theatrical performance related to scientific concepts. In this work we use theater as a teaching methodology to introduce astronomy concepts in high school. We developed the script for a play called “Crazy System”, which was presented at a science fair at a private school in Mogi Guaçu city at São Paulo state. In the theatrical performance we explore concepts such as the geocentric and heliocentric systems, the movements of the Sun, Earth and Moon, days, nights, seasons, solar and lunar eclipses, tides, among others. The play was conducted by the teacher and the students themselves and presented to a general audience, quite diverse, in a playful and fun way. With this proposal it was possible to make the students understand the scientific concepts and the phenomena addressed, as well as to develop a spirit of cooperation and teamwork, allowing them to actively participate in the negotiation of the scientific concepts covered in the play, developing creative and thinking skills. Furthermore, as a dissemination activity, the students' theatrical performance contributed significantly to bring the school closer to society and to develop their own social and entrepreneurial skills.

Keywords: Theater. Astronomy. Physics Teaching. High School.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1** – Excêntrico é o ponto central do Deferente; Epiciclo é a trajetória do planeta e Equante é o centro do movimento de translação do Epiciclo. 19
- Figura 3.2** – Modelo Cosmológico de Copérnico. 19
- Figura 3.3** – Concepção artística mostrando a formação do Sol e do sistema solar. A região mais clara corresponde à estrela em torno da qual estão orbitando alguns planetas do sistema solar em formação. 21
- Figura 3.4** – Vento solar e sua interação com o campo magnético terrestre. A ação do vento solar pressiona o campo magnético terrestre em direção ao espaço exterior. 22
- Figura 3.5** – (a) Aurora colorida formada no céu, parecendo enormes cortinas sopradas pelo vento brilhando no escuro. (b) Aurora bem acima da Terra, fotografada de um ônibus espacial (visível à esquerda). 22
- Figura 3.6** – Mosaico de imagens do planeta Terra obtidas com a sonda Clementine (NSSDC). 23
- Figura 3.7** – Ilustração do planeta Terra com seus eixos de rotação e magnético. As linhas de indução magnéticas representam o campo magnético terrestre. 25
- Figura 3.8** – Ilustração do planeta Terra com suas linhas de campo magnético e as duas regiões de radiação de Van Allen, a interna a 3.000 km de altitude e a externa a 20.000 km de altitude. 25
- Figura 3.9** – Imagem da Lua cheia obtida pela Apollo 11 (NSSDC). 26
- Figura 3.10** – Ilustração mostrando o dia sideral, cuja duração é o período de rotação da Terra e o dia solar, cuja duração é ligeiramente maior que o período do dia sideral, para que o Sol retorne à mesma posição aparente no céu. 28
- Figura 3.11** – Ilustração mostrando a influência da inclinação de $23,5^\circ$ do eixo de rotação da Terra, em relação à eclíptica (curva tracejada), nas estações do ano e nas posições dos solstícios (1 e 3) e equinócios (2 e 4). 29
- Figura 3.12** – Imagem mostra as fases da Lua vista por um observador no hemisfério sul da Terra. 30
- Figura 3.13** – Imagem mostra o ciclo das fases da Lua, sua rotação e translação. 31
- Figura 3.14** – Ilustração de um eclipse total da Lua. O Sol, a Terra e a Lua se alinham, com a Lua se encontrando na região central de sombra (umbra) da Terra. 32
- Figura 3.15** – Ilustração de um eclipse solar. Na região de umbra na Terra ocorre o eclipse solar total e na região de penumbra ocorre o eclipse solar parcial. 32

- Figura 3.16** – Eclipse anular do Sol. Um fino anel de luz solar envolve o disco lunar. Nesta situação a coroa solar não é visível. 33
- Figura 3.17** – Ilustração mostrando quatro lunações diferentes. Em (a) e (c) não há eclipse, pois os astros não estão alinhados. Em (b) e (d) pode haver eclipses solar e lunar, pois os astros estão alinhados. 34
- Figura 3.18** – Ilustração mostrando uma elipse cujo lugar geométrico dos pontos para os quais $r_1 + r_2 = constante$. A distância a é chamada de semieixo maior, e b é o semieixo menor. As circunferências são casos especiais onde os focos coincidem. 36
- Figura 3.19** – Ilustração mostrando a trajetória elíptica de um planeta com o Sol ocupando um de seus focos. O ponto P , onde o planeta se encontra mais próximo do Sol, é chamado de Periélio. O ponto A , onde o planeta se encontra mais afastado do Sol, é chamado de Afélio. A distância média entre um planeta e o Sol é igual a $(r_p + r_a)/2$ e é igual ao semieixo maior. Os planetas conhecidos descrevem órbitas mais circulares do que a órbita aqui mostrada. 36
- Figura 3.20** – Ilustração mostrando a lei das áreas. As áreas varridas pelo segmento de reta imaginário Sol-Planeta, durante um dado intervalo de tempo Δt , são iguais. O planeta se move mais rapidamente quando está próximo do Sol do que quando está mais afastado. 37
- Figura 3.21** - (a) Se o momento angular $L = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ é constante a área sobreada $dA = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{v} dt| = \frac{1}{2} mL dt$, varrida no tempo dt também é constante, ou seja, $\frac{dA}{dt} = cte$. (b) Mostra que a magnitude do momento angular, dada por $L = m v r \sin\phi$, permanece constante, e portanto, $r v \sin\phi$ permanece constante. Para $\phi = 90^\circ$ no periélio (p) e no afélio (a) tem-se que $r_a v_a = r_p v_p$ 38
- Figura 3.22** – Ilustração mostrando a Terra atraindo a Lua e simultaneamente a Lua atraindo a Terra, com uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. A massa da Terra é M e a da Lua é m . A distância entre os centros dos astros é dada por r e G é a constante gravitacional. 40
- Figura 3.23** – Gráfico da força gravitacional em função da distância entre dois corpos que estão interagindo entre si. A força varia de maneira inversamente proporcional com o quadrado da distância entre o centro dos corpos e o gráfico é uma hipérbole cúbica. 41
- Figura 3.24** – Ilustração mostrando um corpo de massa m próximo da superfície da Terra a uma altitude h . A Terra possui massa M e raio R . A distância do centro da Terra até o centro do corpo é r . A força gravitacional é o próprio peso do corpo. 42
- Figura 3.25** – Ilustração das forças geradoras de maré induzidas pelo Sol (S) em diferentes pontos A, B, Z e N . Somente no centro da Terra (T) que a força geradora de maré é nula, pois a soma vetorial entre a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a força \mathbf{F}_{sol} é um vetor nulo.

Então, \mathbf{F}_{in} e \mathbf{F}_{sol} passam a ter mesma magnitude e direção, com sentidos opostos.
 $\beta \approx r/R$ é o ângulo entre o corpo e o centro da Terra vista do Sol..... 44

- Figura 3.26** – Ilustração mostrando o Sol S , a Terra T e um ponto arbitrário D . O vetor \mathbf{r} é medido do centro da Terra até o ponto D , \mathbf{R} é o vetor do centro do Sol até o centro da Terra e $\mathbf{r}_s = \mathbf{R} + \mathbf{r}$ é o vetor medido do centro do Sol até o ponto D . O ângulo θ situa-se entre \mathbf{r} e a linha Sol-Terra..... 46
- Figura 4.1** – Panfleto mostrando o horário e o local da peça de teatro Sistema Maluco. 50
- Figura 4.2** – Personagem Terra colocando seu colar de isopor..... 52
- Figura 4.3** – Personagem Lua pintando uma parte do colar de isopor. 53
- Figura 4.4** – Início da peça com o narrador cumprimentando o público e introduzindo o espetáculo. 55
- Figura 4.5** – **Sol:** (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas. 56
- Figura 4.6** – **Terra:** Muito bem, esta posição se chama Afélio. 56
- Figura 4.7** – **Terra:** Porque você me atrai e eu te atraio com uma força de mesma intensidade e sentidos opostos, chamada força gravitacional. (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol com os braços esticados em direção aos braços esticados do Sol, quando a Terra passar pelo Periélio estará de mãos dadas com o Sol e passará mais rápido). 57
- Figura 4.8** – **Sol:** (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica). 59
- Figura 4.9** – **Terras:** (entram e se posicionam nos solstícios e equinócios. Cada uma das quatro Terras com um cabo de vassoura perpendicular a eclíptica e formando um ângulo de $23,5^\circ$ com esses cabos). 59
- Figura 4.10** – **Sol:** (Sol bate palmas para a Terra) Você é o meu planeta favorito adoro te aquecer! Agora vem comigo, vamos passear pela nossa galáxia, a maravilhosa Via Láctea. (Sol e Terra saem do palco)..... 60
- Figura 4.11** – **Lua:** (entra e gira no sentido horário em torno da Terra e dela mesma sempre mostrando a mesma face para a Terra)..... 61
- Figura 4.12** – **Terra:** Que memória de elefante, hein menina Lua!..... 62
- Figura 4.13** – **Lua Nova:** (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Nova e só apareço durante o dia, pois estou entre o Sol e a Terra. Sou responsável pelas maiores marés. 63
- Figura 4.14** – **Lua Cheia:** (entra e se posiciona em cima de um banquinho na órbita lunar, a Terra fica entre Lua Cheia e o Sol) Olá, muito prazer eu sou a Lua Cheia e clareio as noites escuras. E também sou responsável pelas maiores marés. 63
- Figura 4.15** – **Lua Crescente:** (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à direção da reta que une o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Crescente

e tenho a forma da letra C. Sou a melhor fase para ser observada e sou responsável pelas marés de quadratura.	64
Figura 4.16 – Lua Nova: Vou explicar, dei-me licença. (sai e volta com o colar de isopor) Na verdade o plano da minha órbita é inclinado de $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra.	65
Figura 4.17 – Terra gira no sentido horário, Lua Nova sai, entra Lua Crescente e depois sai, entra Lua Cheia e se alinha com o Sol e a Terra.	66
Figura 4.18 – Terra: Sol, sei que hoje eu, você e a Lua Cheia estamos alinhadas, mas não estou vendo a Lua Cheia. (Terra gira em torno do seu eixo no sentido horário procurando a Lua Cheia)	66
Figura 4.19 – Lua Nova: (entra e se posiciona próximo ao colar de isopor da Terra entre o Sol e a Terra).	67
Figura 4.20 – Elenco agradecendo ao público logo após a finalização do espetáculo.	68
Figura 4.21 – Estudantes-Atores e Professor-Diretor após o espetáculo.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES – *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.*

SBF – *Sociedade Brasileira de Física.*

MNPEF – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.*

PROFIS-So – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

UFSCar – *Universidade Federal de São Carlos.*

USP – *Universidade de São Paulo.*

IAG-USP – *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*

BNCC – *Base Nacional Comum Curricular.*

PCN – *Parâmetros Curriculares Nacionais.*

PCNEM – *Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio.*

ENPEC – *Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências.*

STEM – *Science, Technology, Engineering and Mathematic.*

FIOCRUZ – *Fundação Oswaldo Cruz.*

CECIERJ – *Centro de Ciências e Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	5
2.1 ARTE E CIÊNCIA	6
2.2 TEATRO	8
2.3 TEATRO E ENSINO	10
2.4 O USO DO TEATRO COMO METODOLOGIA DE ENSINO DE FÍSICA	13
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	15
3.1 INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA	15
3.2 SISTEMAS GEOCÊNTRICO E HELIOCÊNTRICO	18
3.3 SOL, TERRA E LUA	20
3.4 DIAS, NOITES E ESTAÇÕES DO ANO	28
3.5 ECLIPSES LUNARES E SOLARES	30
3.6 LEIS DE KEPLER	35
3.7 LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE NEWTON	39
3.8 MARÉS	43
CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO	49
4.1 ENCENAÇÕES TEATRAIS ACERCA DOS MOVIMENTOS DO SOL, DA TERRA E DA LUA	49
4.2 METODOLOGIA	50
4.3 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL: A PEÇA DE TEATRO	54
4.3.1 Esquete 1: Apresentando o “Sistema Maluco” e o Modelo Geocêntrico	54
4.3.2 Esquete 2: O Modelo Heliocêntrico	55
4.3.3 Esquete 3: A Órbita da Terra	56
4.3.4 Esquete 4: Os Dias e as Noites	57
4.3.5 Esquete 5: As Estações do Ano	59

4.3.6 Esquete 6: O Lado Escuro da Lua	61
4.3.7 Esquete 7: As Fases da Lua e as Marés	62
4.3.8 Esquete 8: Eclipse Lunar	65
4.3.9 Esquete 9: Eclipse Solar	67
4.4 COLETA DE DADOS	69
4.4.1 Diário de Campo do Pesquisador	69
4.4 RELATOS DOS ESTUDANTES-ATORES SOBRE A PEÇA DE TEATRO	72
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL.....	83

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

“Nada de grande se cria de repente.”

Epicteto

O ensino de Física vem passando por dificuldades, sendo apresentado muitas vezes como uma ciência pronta, com pouca relação com o cotidiano dos estudantes. A principal metodologia tem sido a memorização de fórmulas para os alunos aplicarem nas resoluções de exercícios tendo como objetivo final, usualmente, os vestibulares (ZANETIC, 2005).

Para mudar esse quadro o ensino de física não pode prescindir, além de um número mínimo de aulas, da conceituação teórica, da experimentação, da história da física, da filosofia da ciência e de sua ligação com a sociedade e com outras áreas da cultura. Isso favoreceria a construção de uma educação problematizadora, crítica, ativa, engajada na luta pela transformação social (ZANETIC, 2005, p. 21).

Um ensino de Física que usa somente exercícios de livros didáticos, por exemplo, é insuficiente em relação ao potencial que a Física pode revelar para o estudante. Em outras palavras “não é suficiente para fornecer uma visão razoável do completo sistema representado por qualquer ramo do conhecimento, especialmente a Física” (ZANETIC, 1989, p. 17).

O professor, como mediador do processo ensino-aprendizagem, deve fornecer ao estudante, através da literatura, da encenação, da linguagem matemática (por meio de expressões algébricas, funções, gráficos) o conceito do assunto que ele está trabalhando. É importante que o fenômeno físico fique entendido em contextos diversos e que a Física é uma ciência natural articulada com a sociedade para o desenvolvimento de tecnologias (LIMA e CORRALLO, 2019).

Na educação em que o aluno recebe informações depositadas pelo professor, mesmo que haja diálogo, não existirá reflexão crítica, pois o professor se coloca como detentor do conhecimento e o aluno como aquele que nada sabe (OLIVEIRA, 2004).

A relação entre Física e cultura, como a arte, a ficção científica, a leitura, entre outros, tem como principal objetivo a ampliação do ensino-aprendizagem de Física. É desejável que os estudantes do ensino médio sejam estimulados a refletirem para entenderem a disciplina de uma maneira cultural mais ampla. O papel da leitura e da escrita são fundamentais nas investigações e desenvolvimento dos estudos. Pesquisadores revelam claramente essa relação nas pesquisas realizadas em ensino de Física (LIMA e CORRALLO, 2019).

Os alunos devem se envolver culturalmente nas aulas e não apenas absorverem o conteúdo formal, como diz Zanetic (1989):

A física também é cultura. A física também tem seu romance intrincado e misterioso. Isto não significa a substituição da física escolar “formulista” por uma física “romanceada”. O que desejo é fornecer substância cultural para esses cálculos, para que essas fórmulas ganhem realidade científica e que se compreenda a interligação da física com a vida intelectual e social em geral (ZANETIC, 1989, p. 6).

Uma das maneiras de trabalhar a Física culturalmente seria através do teatro. O teatro pode ser explorado na escola para vincular a arte de tornar uma história visualmente verdadeira com as aulas de Física. Neste caso o enredo seria os conteúdos de Física e a história da ciência e os atores, que falam e atuam no palco, seriam os alunos e o professor. Para isso o aluno deve ser preparado para que a aula seja rica, diferenciada e lúdica. A atividade teatral deve ser motivadora e instigadora da aprendizagem, além de trabalhar a sensibilidade, a percepção, a intuição e as emoções dos estudantes (OLIVEIRA, 2004).

Existem textos de teatro relacionados à Física, como as peças *Einstein* e *Copenhagen* do grupo “Arte e Ciência no Palco”. Essas duas peças fizeram sucesso aqui no Brasil (ZANETIC, 2006).

As atividades teatrais podem trazer grande colaboração na aprendizagem, podendo nos apontar a possibilidade de tratar, na sala de aula, como se processa a atividade científica, questões éticas na prática científica e discussões sobre teorias ou mesmo utilizá-las no ensino de um conceito. E assim tornar familiar ao aluno algo sobre a comunidade científica. Uma comunidade com características intrínsecas, mas constituídas por homens e mulheres com inquietações pessoais, contradições, sonhos e esperanças, como quaisquer outros indivíduos (OLIVEIRA, 2004, p. 20).

Segundo Júdice e Dutra (2001), o teatro é uma atividade que pode ser usada para abordar a história dos fatos físicos e ao mesmo tempo explora o aluno em toda a sua essência, desenvolvendo

o seu potencial artístico no campo da interpretação e da produção literária para teatro, além de permitir-lhe conhecer a vida e a obra de grandes cientistas e descobrir que a ciência é feita por homens de carne e osso, não muito diferentes deles próprios (JÚDICE e DUTRA, 2001, p. 7-8).

Neste trabalho elaboramos um produto educacional que consiste em uma peça teatral com a finalidade de abordar o contexto histórico da Astronomia no Ensino Médio para explorar e estimular o desenvolvimento de habilidades e competências dos alunos, como a comunicação através da oratória, a expressão e consciência corporais, a organização do pensamento e a empatia, as quais muitas vezes, são desconhecidas por eles. Nossa peça teatral foi intitulada como “Sistema Maluco” e foi inspirada no Teatrinho do Sistema Sol-Terra-Lua do Professor Doutor Roberto Boczko do Departamento de Astronomia da Universidade de São Paulo (IAG-USP) em um curso de Astronomia na USP.

Dentre outros trabalhos que exploram assuntos astronômicos e que pode ser inspirador para uso no teatro é o romance brasileiro chamado “Viagem ao Céu” de Monteiro Lobato.

Romance brasileiro que explora assuntos astronômicos é “Viagem ao céu”, de Monteiro Lobato (1882-1948), publicado em 1932, onde Emília e seus companheiros fazem uma viagem pelo espaço sideral num texto recheado de conteúdo conceitual e de história da ciência (ZANETIC, 2006, p. 64).

A aplicação da nossa proposta na escola foi muito bem recebida pelos alunos, os quais puderam estudar de maneira lúdica, através de muita interação, diversão, abstração, e também pelo público geral que assistiu à peça, de maneira que os alunos auxiliaram no processo de divulgação científica, levando a Física e a história da ciência para os seus pais, amigos e familiares.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A opção de utilizar uma metodologia diferenciada, como o teatro, para abordar conteúdos de Física se deu para sobrepôr a maneira com que trabalhamos usualmente o assunto, e que as vezes nos é cobrado, nas escolas públicas e particulares onde temos experiência profissional. Nestas, as aulas são geralmente expositivas, em que a transmissão e recepção do conteúdo são feitas junto com resoluções de exercícios e algumas vezes com experimentos demonstrativos. Utilizando somente essa maneira de trabalhar fica difícil de motivar os alunos

no processo de ensino e aprendizagem. Segundo o PCN+ (BRASIL, 2002) o Ensino de Física ainda tem sido um processo que privilegia o uso de fórmulas e exercícios repetitivos, que pouco leva o aluno a desenvolver o pensamento crítico e a construção do conhecimento.

O teatro pode motivar os alunos deixando o ensino mais interessante, divertido e contextualizado. Além disso, o teatro trabalha com o corpo, arte, leitura e escrita. Segundo Zanetic (2006), o Ensino de Física deve conter História da Física, Filosofia da Física e ligação com outras áreas da cultura, como a literatura, letras de música, cinema, teatro, etc. Ele chama de ponte a ligação da Física não só com o teatro, mas com todas essas iniciativas culturais e diz que essas iniciativas têm crescido bastante nos últimos cinquenta anos.

Uma das motivações para elaborar o produto educacional apresentado nesta dissertação foi despertar a curiosidade e o interesse do aluno em aprender, construir o conhecimento de uma maneira lúdica e acessível através do tema Astronomia. Nosso objetivo com esta proposta é fazer com que o aluno desenvolva, através das encenações com suas expressões corporais, a intuição, o diálogo, a problematização e a abstração para construírem em conjunto o conhecimento do assunto tratado.

O teatro, quando utilizado como uma estratégia de ensino aprendizagem, pode favorecer o uso de concepções e conhecimentos prévios que os estudantes adquirem na escola e na própria vida. A fusão teatro e Astronomia pode favorecer o desejo de aprender nos alunos de uma maneira a valorizar a ciência, a cultura e principalmente o próprio estudante como ser humano pertencente a uma sociedade que o valorize.

Nesta proposta o aluno é o protagonista, ele é quem se põe a conhecer, encenar, questionar, pensar, repensar, analisar, ou seja, o aluno fica totalmente envolvido na atividade, ao contrário de um aluno que passivamente assiste uma aula em que apenas o professor é o protagonista. Além de trabalharmos a motivação dos alunos, objetivamos também explorar a leitura, através de roteiros, e a cooperatividade, através da dialogicidade, problematização e encenações teatrais.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

A escolha de usar o teatro como metodologia foi devido à possibilidade dos alunos poderem interagir entre si, além de poderem adquirir uma apropriação cognitiva do conteúdo da peça teatral. Quando o aluno reflete, expressa e comunica o que está fazendo, fica evidente que ele está envolvido e construindo seu conhecimento de uma maneira lúdica, divertida (OLIVEIRA, 2004).

Na nossa proposta, não usamos o teatro de uma maneira descontextualizada, só para fazer alguma coisa diferente e depois voltar à sala de aula. O aluno pôde a todo momento fazer relações do conteúdo do teatro com o seu dia a dia, sendo preparado para uma aula diferente, mais rica e dinâmica.

É importante que o teatro seja para os alunos, além de motivacional, uma atividade divertida e investigativa para o aprendizado, um divisor de águas em que o aluno possa enxergar com outros olhos o conhecimento e tenha desejo de entendê-lo e adquiri-lo (OLIVEIRA, 2004).

A escolha de se trabalhar com introdução à Astronomia e teatro para elaboração do nosso produto educacional justifica-se através de um teatrinho chamado Sol-Terra-Lua, apresentado em um curso ministrado pelo professor Roberto Boczko, que o autor deste trabalho fez na USP em São Paulo, quando estava numa aula sobre sistema solar. A partir disso foi decidido que uma peça teatral seria elaborada para ser apresentada em uma feira de ciências na escola em que o autor trabalha, com os alunos do 1º ano do Ensino Médio.

2.1 ARTE E CIÊNCIA

Os conhecimentos científicos e artísticos sempre foram profundamente conectados, desde a Grécia antiga do século VI a.C. com sua filosofia do mundo ocidental que distinguiu razão do misticismo, até o advento do positivismo do século XIX. Na história, somente depois dessa época que a ciência e a arte começaram a se separar. Porém, raciocínio lógico (ciência), criatividade (arte), desenvolvimento de técnicas (tecnologia) e a capacidade de reflexão e abstração (filosofia), podem ser muito mais interessantes juntos, ou seja, conectadas, principalmente no que concerne o ensino de ciências (SILVEIRA, 2018).

Segundo Silveira (2018), as possíveis interações entre arte e ciência são ilimitadas.

Neste caso existem trabalhos que vão desde a visualização de dados até a criação de inteligência artificial. Da neurociência à robótica. Da engenharia de tecidos à ética em pesquisas por uma visão não antropocêntrica. Da criação de novas metodologias até o questionamento das abordagens reducionistas do método científico (SILVEIRA, 2018, p. 24).

Quando falamos em arte e ciência, nos referimos a elas contidas nas diversas áreas específicas do conhecimento, as quais podem estar relacionadas ou não. A inter-relação entre essas áreas nos remete a interdisciplinaridade, a qual é muito importante para o ensino da Física (ZANETIC, 2006).

Na área da educação, existe nos Estados Unidos desde a década de 1990 o movimento STEM (acrônimo em inglês para *science, technology, engineering and mathematic*) e essa prática vem se espalhando gradativamente pelo mundo. STEM consiste em promover uma educação com criatividade e inovação, além de quebrar as barreiras entre as disciplinas. No Brasil infelizmente há pouco investimento por parte das agências de fomento e os que existem, são para projetos extensionistas dispersos, em sua maioria feitos pelas instituições. Porém existem alguns trabalhos realizados por iniciativa dos próprios pesquisadores, tais como: a pesquisadora Tania Araújo-Jorge e colaboradores tratam em seu artigo sobre os mais de 30 anos de atividades integrando ciência e arte na Fiocruz (o grupo defende essa abordagem no ensino, em todos os níveis, para a formação de cientistas e para a formação de cidadãos). A pesquisadora Carla Almeida e colaboradores abordam ações de ciência e teatro no campo da divulgação científica, dando destaque para as iniciativas do Museu Ciência e Vida/Fundação Cecierj e do Museu da Vida/Fiocruz, ambos no Rio de Janeiro (SILVEIRA, 2018).

“A ciência e a arte, assim como toda e qualquer realização humana, estão conectadas com as condições históricas de sua concretização” (ZANETIC, 2006, p. 48). Um exemplo é o poema “O paraíso perdido” de John Milton, poeta e professor de ciências inglês, em que houve forte influência dos trabalhos de Galileu. Este foi mencionado nominalmente três vezes ao longo do poema. Em 1638, John e Galileu se encontraram e fortaleceram os laços entre ciência e arte (ZANETIC, 2006). O poema narra as penas dos anjos caídos após a rebelião no paraíso, o ardil de Satanás para fazer Adão e Eva comerem o fruto proibido da Árvore do Conhecimento e a subsequente queda do homem.

A racionalidade científica e a imaginação poética devem ser identificadas separadamente, porém elas se complementam produtivamente. Estudiosos como Umberto Eco, Gaston Bachelard, Mikhail Bakhtin, entre outros, conseguem separar a ciência da arte e ao mesmo tempo perceber a sua complementaridade (ZANETIC, 2006).

Segundo Ferreira (2010), definir o campo da arte é uma tarefa inviável,

pois o que é considerado arte ou artístico abarca diferentes dimensões temporais (desde a pré-história até o futuro da ficção científica); compreende todas as áreas habitadas da comunidade humana (independente do seu estágio tecnológico ou cultural); incorpora diversos tipos de manifestação (como as artes visuais, a dança, o teatro, o cinema, a jardinagem etc.); tanto se manifesta numa escala macro (incorporando monumentos e cidades, com suas ruas, praças, parques etc.), quanto numa escala micro (incorporando miniaturas, joias, objetos, roupas de época, moedas etc.); como também compreende as atividades técnicas (como a marcenaria, ourivesaria, construção civil, etc.), atendendo a suas funções práticas, representativas e ornamentais (FERREIRA, 2010, p. 264).

Há uma contradição entre a ciência e a arte. A primeira é regida por leis universais, procedimentos metodológicos padronizados para a construção do saber utilizando o rigor lógico. A segunda continua produzindo significado independente de como foi a imaginação de seu criador, produz sensações e pensamentos abstratos que fogem do domínio lógico, racional (FERREIRA, 2010).

Apesar das diferenças entre elas é importante que percebamos como o pensamento é produzido em cada campo e a partir daí pensar juntos, estabelecendo um diálogo entre eles. A busca pela racionalidade, criatividade, imaginação e intuição, vão nos ajudar com essa nova maneira de pensar. Ideias e conceitos são necessários para a problematização e pensamento com esses dois campos do saber (FERREIRA, 2010).

Tanto para o público em geral quanto para estudantes em uma escola, a conexão entre arte e ciência pode se desenvolver através de peças teatrais, esquetes, teatros de fantoche e

oficinas (música, dança, ciências e teatro). O conhecimento adquirido com essas atividades são alcançados através da interatividade, do trabalho em equipe, da reflexão, da crítica, da desinibição, etc. Esses fatores podem nos permitir explorar a diversidade e as experiências das pessoas envolvidas e estimulá-las a compartilhar desse aprendizado (CAMPANINI e ROCHA, 2017).

Podemos dizer, portanto, que essa conexão traz sentido para o que se quer ensinar e a maneira que se é aprendido é lúdica, divertida e prazerosa.

Com todas essas ações, cada vez mais a ciência e a arte estão sendo integradas nas escolas através da interpretação, da dança, da música e de experimentos científicos que tendem a desmistificar os fatos científicos diminuindo a distância entre ciência e a sociedade, contribuindo com a formação de cidadãos críticos, reflexivos e cientes da responsabilidade de suas atitudes para com o mundo à sua volta (CAMPANINI e ROCHA, 2017, p. 8).

2.2 TEATRO

Desde a pré-história, mesmo não sabendo falar, os seres humanos gesticulavam para se comunicar, utilizando o corpo como um instrumento de comunicação. Como não existia o discurso, o homem que habitava as cavernas se relacionava e dialogava com seus pares via encenações teatrais, semelhantes às que observamos nas peças de teatro. Ou seja, o teatro surge da necessidade do ser humano de se expressar, sendo uma linguagem que abrange o verbal e o não-verbal (GRÜTZMANN, 2009).

Uma excelente referência sobre a história do teatro é o livro *História Mundial do Teatro*, de Margot Berthold (BERTHOLD, 2010). Uma resenha muito interessante sobre o livro é feita pelo professor Sérgio de Carvalho na Revista USP (CARVALHO, 2001). O teatro como é conhecido hoje teve sua origem na Grécia antiga – em festas em honra e agradecimento a Dionísio, deus do vinho, da vegetação e do crescimento (BARTHES, 1990) – e nas civilizações antigas – como as dos egípcios, chineses, indianos, persas –, colocando em pé de igualdade as produções eruditas e populares.

O teatro e o drama são classificados por Berthold (BERTHOLD, 2010) como duas coisas distintas. O desenvolvimento e a harmonização demandam força criativa, dialogicidade, participação na vida pública da cidade e óptica do próprio indivíduo. Levando-se tudo isso em conta ocorre o florescimento do teatro.

Sérgio Carvalho (CARVALHO, 2001) acredita que o conceito de drama para Margot é uma conquista civilizatória, que corresponde a uma forma teatral e literária. Já o conceito de teatro a que ela se refere parece sugerir toda e qualquer organização espetacular com intenção estética evidente. Uma dança ritual indígena ou um canto invocatório, por exemplo, seriam formas que “carregam em si as sementes do teatro”, mas que não podem ser lidas com os mesmos parâmetros.

No teatro grego, o drama teve origem quando Téspis em 534 a.C. em uma festa que participava como corifeu (chefe do coro), deixa de dialogar com o coro e passa a encarnar o próprio deus. Por isso, ele “é considerado o primeiro ator da história” (PAIS, 2000, p. 6). Foi com Téspis que começou “uma aventura espiritual que atravessaria os séculos, mesclando – à imagem do próprio homem – verdade e fantasia, riso e lágrimas: o nascimento do teatro” (CIVITA, 1976, p. 12). “Quando surgiu, o ator era chamado de *Hypokrites* (respondedor), que deu origem a palavra hipócrita (aquele que finge ser o que não é)” (CIVITA, 1976, p. 7). Foi nessa época que surgiram dois importantes gêneros dramáticos: a Tragédia e a Comédia.

A Tragédia relaciona o mistério, o desconhecido ao homem que tem sua existência governada pelos deuses. Quando o homem não aceitava as vontades dos deuses, ele estava condenado a sofrer e levar uma vida que não valia a pena. Já a Comédia era um história da vida humana, com suas ilusões, fantasias e toda graça que existe no dia a dia. Ela surgia também a partir dos ritos religiosos, ligada então às atividades mais profanas, sem tanta seriedade, mais populares e críticas (CARVALHO, 2001).

O componente decisivo do teatro, seu indispensável parceiro criativo, o público, é quem define a relação com a obra. Por isso as relações entre o teatro e a religião são muito importantes na história do teatro. Podemos citar o favorecimento de teatros religiosos na ascensão do cristianismo e declínio do Império Romano (BERTHOLD, 2010).

Um grande exemplo disso ocorreu no cristianismo ocidental da Idade Média que são as representações da Paixão de Cristo, ocorridas nas festividades da Páscoa. No início estas eram mostradas no interior da nave da Igreja, depois foram para o pátio próximo à porta principal e depois estendendo-se às ruas e praças públicas (CARVALHO, 2001).

O teatro, quando alcança a perfeição, é igualmente a mais antiga e a mais contemporânea representação da vulnerabilidade do homem diante de forças inescrutáveis (BERTHOLD, 2010). As angústias do homem em relação à morte, ou qualquer nome que se dê a este campo de preocupações, constituem um tema de alcance universal na história do Teatro (CARVALHO, 2001).

Quando um grupo tenta definir a sua visão histórica e cultural através do teatro em busca de hegemonia, nem sempre atinge seu objetivo e tampouco é aplaudido, como os teatros nacionais europeus, que, entre os séculos XVII e XIX caminharam de um racionalismo ilustrado para um pobre nacionalismo burguês.

2.3 TEATRO E ENSINO

O teatro de Bertolt Brecht (1898-1956) priorizava a função didática. Quando usamos o teatro como uma ferramenta didática estamos permitindo aos estudantes fazerem relações entre o conteúdo estudado e questões sociais. Através do diálogo, eles podem relacionar aspectos da Natureza da Ciência, além de abordarem a História e a Filosofia da Ciência (MARTINS, 2006).

Outra característica do teatro de Brecht é a interação dos personagens com o público. Os personagens ao longo da peça vão fazendo perguntas do tema abordado para o público. O teatro passa a ter uma função didática no momento em que ele passa a divulgar conhecimentos e não sendo mais somente para lazer (BRECHT, 1978).

Para Brecht, o ambiente escolar era enfadonho e desagradável, ele acreditava no ensino através do teatro. Com isso o estudante iria aprender de uma maneira lúdica e divertida. De acordo com Brecht (1978, p. 48) “trata-se na realidade, de uma compra. A instituição é mera mercadoria, adquirida com objetivo de revenda.”

Segundo Melo (2016, p. 533), “entendemos que o teatro, como uma função didática, deve pautar-se em uma concepção de ensino-aprendizagem”. A função mais importante do teatro é ir do entretenimento para o aprendizado.

Na prática teatral o ambiente não precisa ser específico, o professor não é o detentor do saber, o conhecimento é construído baseando-se na realidade dos fatos, o estudante se desenvolve por completo: socialmente, historicamente e culturalmente. As práticas pedagógicas devem ser modernas e participativas (MELO, 2016).

O conhecimento é uma construção pessoal, cada um tem um caminho para a construção do conhecimento. O papel do professor é apontar as possibilidades de caminhos, esclarecer os diferentes trechos percorridos, mas o caminhar é de cada um (MELO, 2016, p. 123).

O teatro na educação vai muito além de ser somente uma maneira de fazer com que os alunos aprendam um assunto em específico. O aluno vai se conhecer melhor, vai ficar admirado

com a pessoa que ele é e não sabia. Sentimentos poderão fluir, medos poderão ser enfrentados, timidez superada, e eles poderão perceber que o corpo tem um potencial muito grande de “falar” mais do que imaginavam, de tal forma que os conceitos do tema estudado podem ser compreendidos e não apenas memorizados (DOLCI, 2004). Em outras palavras:

Utilizar a Arte Cênica aliada à educação, oportuniza aos educandos um conhecimento diversificado e lúdico, favorecendo a liberdade de expressão, permitindo, assim, o desenvolvimento do aluno na sua totalidade. O Teatro amplia o horizonte dos alunos, melhora sua autoimagem e colabora para torná-los mais críticos e abertos ao mundo que os cerca (DOLCI, 2004, p. 5).

Quando olhamos a educação em relação à formação de um indivíduo para a sociedade, percebemos que o teatro potencializa estratégias para o ensino-aprendizagem e para sua formação. O teatro prepara o aluno para o seu dia a dia. Sua postura, maneira de falar, expressões corporais, coerência dos pensamentos etc., são atributos conquistados concomitantemente com os conteúdos dos assuntos estudados.

A prática teatral no meio escolar é uma atividade que permite o desenvolvimento global do sujeito, um processo de socialização consciente e crítico; um exercício de convivência democrática; uma atividade artística com preocupações no desenvolvimento da organização, compreensão e colaboração; uma experiência que deve compor a trajetória dos alunos e que, posteriormente, terá participação no comportamento desses cidadãos em sua vida coletiva adulta (DOLCI, 2004, p. 14).

Viola Spolin (1906-1994) foi teatro-educadora, diretora, atriz norte americana e precursora dos jogos teatrais a partir da década de 40. Os jogos teatrais têm como objetivo a investigação, o estudante-ator tem um foco determinado, que deve ser trabalhado a partir das instruções prévias, as quais levam o jogador a desenvolver uma parte específica da arte teatral. Na sua principal obra, *Improvisação para o Teatro*, ela diz:

Todas as pessoas são capazes de atuar no palco. Todas as pessoas são capazes de improvisar. (...) Aprendemos através da experiência que ninguém ensina nada a ninguém. (...) Se o ambiente permitir, pode-se aprender qualquer coisa, e se o indivíduo permitir, o ambiente lhe ensinará tudo o que ele tem para ensinar (SPOLIN, 2005, p. 3).

Embora o teatro na educação não seja uma novidade, a espontaneidade dos estudantes muitas vezes deve ser trabalhada, pois eles terão que sair de uma posição confortável de estudantes passivos para estudantes ativos. Nas palavras de Spolin, “o medo da espontaneidade

é comum. Há segurança nos sentimentos e nas ações velhas e familiares. A espontaneidade pede que entremos num território desconhecido – nós mesmos!” (SPOLIN, 2004, p. 26).

De qualquer maneira, nos jogos teatrais os estudantes trabalham através da improvisação, resolvem problemas em grupo, desenvolvem a personalidade, ficam motivados, melhoram a expressão corporal e verbal. Neste processo de aprendizagem há um grande potencial pedagógico na formação dos estudantes. A professora e tradutora das obras de Spolin, aqui no Brasil, Koudela diz: “a imaginação dramática está no centro da criatividade humana e, assim sendo, deve estar no centro de qualquer forma de educação” (KOUDELA, 1998, p. 27-28).

Os jogos teatrais na educação, segundo Kishimoto, apresentam duas funções que devem ser muito bem balanceadas (equilibradas) para que ocorra uma aprendizagem significativa de forma lúdica. Uma das funções é a lúdica que proporciona prazer, diversão, interação, entre outros, aos estudantes, a outra é a função educativa que propicia a construção do conhecimento, desenvolvimento pessoal e uma nova visão de mundo. Se tivermos prevalência da lúdica sob a educativa teremos apenas o jogo e, no caso contrário, teremos apenas material didático (KISHIMOTO, 1994).

O uso do Teatro no Ensino é uma maneira lúdica que propicia aos estudantes um aprendizado significativo, ao mesmo tempo que permite ao estudante resgatar conhecimentos prévios e relacioná-los aos novos. De acordo com Roque:

Esta, além de ser uma forma lúdica de se entender a Química e melhorar a formação geral, faria com que os estudantes refletissem sobre os conhecimentos adquiridos. O teatro em questão não significa, evidentemente, formação do ator. No caso, significa uma maneira de estudantes, mediante improvisações teatrais, interpretarem um conhecimento (ROQUE, 2007, p. 27).

Foram feitas pesquisas de dez atas das edições do ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências), no período de 1997 a 2015, tendo como resultado positivo o uso do teatro no Ensino de Ciências. Segundo o artigo “Ciência e arte: Contribuições do teatro científico para o ensino de ciências em atas do ENPEC”, escrito por Campanini e Rocha (2017),

Foi observada uma crescente preocupação de professores e alunos de graduação em investigar o potencial do teatro científico para desenvolver e aprimorar o conhecimento obtido na sala de aula e dessa forma trabalhar outras questões como a interatividade, o trabalho em equipe, a desinibição, entre outros fatores que permitem ao professor explorar a diversidade e as experiências dos alunos e compartilhá-las (CAMPANINI e ROCHA, 2017, p. 5).

2.4 O USO DO TEATRO COMO METODOLOGIA DE ENSINO DE FÍSICA

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) destacam a importância do uso do teatro como ferramenta didática para o ensino de Física:

O ensino de Física tem enfatizado a expressão do conhecimento através da resolução de problemas e da linguagem matemática. No entanto, para o desenvolvimento das competências sinalizadas, esses instrumentos seriam insuficientes e limitados, devendo ser buscadas novas e diferentes formas de expressão do saber da Física, desde a escrita, [...], até a linguagem corporal e artística. (BRASIL, 2002, p. 84).

O uso do teatro para introdução da Astronomia no Ensino Médio pode ser explorado diretamente com o conteúdo apresentado no caderno de Física do estado de São Paulo, no tema Astronomia, com o título “*Universo, Terra e Vida*” (BRASIL, 2002). Nossa proposta também está de acordo com o que é estabelecido pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

No Ensino Médio, o fazer teatral se constitui pela intensa troca de experiências entre os educandos, aprimorando a percepção estética, a imaginação, a consciência corporal, a intuição, a memória, a reflexão e a emoção. Possibilita o desenvolvimento integral dos estudantes, tanto do ponto de vista cognitivo quanto estético, afetivo, político, cultural e social, propiciando um espaço singular para a interdisciplinaridade com outros componentes e áreas do currículo. Este componente articula manifestações culturais em tempos e espaços diversos, incluindo o entorno artístico do educando e as produções artísticas e culturais que lhe são contemporâneas. (BRASIL, 2016, p. 522).

As encenações teatrais já têm sido usadas para expressar conteúdos científicos e filosóficos. Podemos citar Platão e Galileu que usaram de diálogos entre personagens para consolidar suas ideias. Uma grande peça teatral é “*A Vida de Galileu*” de Bertolt Brecht, outra que também é bastante conhecida é “*Oxigênio*” de Carl Djeressi e Roald Hoffmann. Entretanto, temos outras peças de teatro que se referem a grandes cientistas que se transformaram em personagens de teatro, tais como: Einstein (Einstein, 1998), Niels Bohr e Heisenberg (Copenhague, 2001), Richard P. Feynman (E agora Sr. Feynman?, 2004), Kepler e Galileu (Dança do Universo, 2005), Newton e Leibniz (Calculus, 2003) e Lavoisier (Oxigênio, 2006). O uso do teatro no ensino de Física é uma metodologia que faz o estudante aprender significativamente de forma diferente, em especial, faz ele aprender a aprender e também faz com que ele aprenda que pode aprender (MEDINA e BRAGA, 2010).

Para Medina e Braga (2010), o teatro é um elemento motivador, voltado para aprendizagem interdisciplinar, em que a escrita e a linguagem corporal e artística se fazem presentes. Eles acreditam que a encenação e a dramatização podem conquistar os estudantes para serem mais questionadores e refletirem mais sobre a natureza da ciência, em especial, a Física. O ensino de Física tal como ele é usualmente, realizado através da resolução de problemas usando a linguagem matemática, é insuficiente para que os estudantes aprendam significativamente. Para eles, a utilização do teatro como subsídio no ensino de Física se mostrou um instrumento de comunicação excelente, podendo ter um papel muito importante na educação escolar e na humanização da disciplina (MEDINA e BRAGA, 2010).

A Física é uma ciência que está diretamente ligada ao dia a dia do estudante. Estudá-la possibilita uma melhor compreensão do mundo. Entretanto, além de ser uma ciência da Natureza que abrange as dimensões físicas, também pode abranger dimensões culturais, sociais e tecnológicas. A maneira que a disciplina é apresentada a partir do final do ensino fundamental é de uma ciência complexa, abstrata e pronta. No ensino médio essa situação se intensifica e os métodos de ensino se voltam para os vestibulares. Eles ocorrem através de teorias, memorização de fórmulas, aulas expositivas, resoluções de problemas e provas escritas com pouca, ou quase nenhuma, conexão com o cotidiano do estudante e sua realidade. Deste modo o pensamento crítico e aprendizagem significativa deixam de existir (ROSA, PÉREZ e DRUM, 2007).

O uso do teatro no ensino de Física é um recurso que pode ser usado pelos professores, pois através de encenações os estudantes poderão dialogar acerca da Física e o ensino-aprendizagem passa a ser significativo, possibilitando assim a construção do conhecimento. Além dos estudantes interagirem socialmente, usarem seus conhecimentos prévios para construir novos, a linguagem teatral é interdisciplinar e o aprendizado vem acompanhado de divertimento. O uso do lúdico, como metodologia de ensino de Física, tem ganhado espaço na literatura e nas escolas. Os estudantes ficam empolgados, se divertem, aprendem e são bastante participativos, tornando assim o ensino de Física mais prazeroso (MATOS, 2003; REIS, GUERRA e BRAGA, 2005; ZANETIC, 2006).

O ensino de Física tem sido uma tarefa muito difícil para os professores. Porém, o que percebemos é que se os estudantes não se interessarem pela disciplina, o processo de ensino-aprendizagem não é verificado de maneira significativa. O teatro usado como metodologia para ensinar a Física é uma estratégia interessante para conquistarmos os estudantes durante a construção do conhecimento.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

“Para criaturas pequenas como nós, a vastidão só é suportável por meio do amor.”

Carl Sagan

Neste capítulo apresentamos os tópicos que podem ser explorados na peça de teatro e na sala de aula. Todos os conceitos físicos acerca da introdução à Astronomia que utilizamos na peça foram desenvolvidos nos tópicos a seguir. O tema central da peça aborda os três astros, Sol, Terra e Lua que são personagens representados pelos estudantes-atores. Para explicar os fenômenos que ocorrem com esses personagens, usamos as leis do movimento planetário de Kepler e a lei da gravitação universal de Newton.

3.1 INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA

A Astronomia é uma das ciências mais antigas da humanidade. A observação do firmamento teve sua origem na pré-história há cerca de 100 mil anos atrás, quando o ser humano vivia em pequenos grupos nômades. Durante o dia o Sol era contemplado e a noite milhares de outras estrelas eram observadas no firmamento. A Lua, principalmente na fase cheia, clareava as noites escuras. Por eles não compreenderem direito os astros, animais, montanhas, florestas, desertos e a água, esses eram tidos como divindades. Por volta de 3500 a.C. começou-se a

desenvolver a escrita e posteriormente a matemática. Isso foi essencial para o desenvolvimento da cultura e da ciência (MILONE, 2010).

A Astronomia, por ser uma das ciências mais antigas da humanidade vem sendo utilizada por milhares de anos em todas as culturas, seja para entender os fenômenos que ocorrem na natureza, como forma de medir o tempo, determinar as estações do ano, os dias, as horas, as marés, como meio de se localizar geograficamente, utilizada como instrumento de navegação, entre outras tantas formas de utilização (OLIVEIRA e ALBRECHT, 2017, p. 2).

A Astronomia possui uma característica interdisciplinar que permite trabalhar de várias maneiras a contemplação do universo como um todo. Os conhecimentos abordados no ensino de Astronomia têm relação com o aprendizado de Física segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN):

Ao propiciar esses conhecimentos, o aprendizado da Física promove a articulação de toda uma visão de mundo, de uma compreensão dinâmica do universo, mais ampla do que nosso entorno material imediato, capaz portanto de transcender nossos limites temporais e espaciais (BRASIL, 2002, p. 22).

De acordo com os PCN, o estudante do ensino médio deve ser capaz de interpretar e entender os fenômenos naturais, para que sua formação científica e cultural seja efetivada.

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação (BRASIL, 2002, p. 22).

O ensino da Astronomia está em ascendência nos últimos 40 anos no Brasil. A Tese de Caniato (1974) “Um projeto Brasileiro para o ensino de Física”, deu origem a um curso de Física com ênfase no estudo de Astronomia e algumas propostas e pesquisas foram estudadas. Segundo Langhi (2009) os estudantes têm a oportunidade de explorar a história do conhecimento humano através de uma nova óptica e verificar as mudanças dos modelos e pensamentos. Ele enfatiza também que o ensino da Astronomia quase saiu dos currículos escolares. Já Albrecht (2012) acredita que é fundamental o ensino de Astronomia na educação básica para a formação e para a cidadania, sendo que os fenômenos naturais ocorrem no dia a dia do estudante. Ele é a favor da interdisciplinaridade no Ensino de Astronomia (OLIVEIRA e ALBRECHT, 2017).

Diversas pesquisas a respeito dos conteúdos que se devem trabalhar para se introduzir a Astronomia no ensino básico apontam para conteúdos básicos como movimento aparente do Sol, estações do ano, zonas climáticas, movimento da Lua e suas fases, eclipses lunar e solar, sistemas de coordenadas, modelos planetários e sua história, noções sobre instrumentos astronômicos, planetas do Sistema Solar, satélites, asteroides, meteoros, cometas, Sol, estrelas e suas classificações, constelações, galáxias e seus componentes, etnoastronomia e modelos cosmológicos. Com isso os docentes podem se orientar melhor para introduzir os conceitos desses conteúdos para fazer com que os estudantes os relacionem melhor com os seus cotidianos (OLIVEIRA e ALBRECHT, 2017).

A partir da pesquisa feita por Iachel e Nardi (2010), abrangendo 58 artigos referentes à Astronomia presentes em dois periódicos de ensino de Física no país, o Caderno Brasileiro de Ensino de Física e a Revista Brasileira de Ensino de Física, no período de 1990 a 2008, percebeu-se que alguns tópicos como marés, estações do ano, o uso de gnômon e os corpos menores do Sistema Solar (meteoroides, meteoritos, meteoros, cometas, asteroides), foram menos explorados por serem mais complexos que os demais. Dentre os tópicos mais explorados pelos autores nos artigos tem-se o Sol, a Terra, sua constituição, forma, dimensão, rotação, precessão, as fases da Lua, os eclipses solar ou lunar, equipamentos para observação celeste, estrelas, constelações e/ou aglomerados estelares, a gravitação, órbitas dos planetas e as leis de Kepler, o Sistema Solar, considerando os planetas ou sua formação, Cosmologia, sobre a formação do Universo, as leis da Cosmologia, Astrofísica, revolução copernicana, entre outros (IACHEL e NARDI, 2010). Outros tópicos, como a criação dos calendários antigos, a exploração espacial e a evolução da marcação do tempo não são tão explorados e estes são sugeridos pelos PCNs para terceiro e quarto ciclos da educação básica, sendo portanto, também uma opção de trabalho no tema Astronomia (BRASIL, 1998).

As pesquisas e o número de pesquisadores nas áreas de Educação e Ensino de Ciências que trabalham com o Ensino de Astronomia estão crescendo. Nas palavras de Iachel e Nardi (2010):

O número de publicações relacionadas à Astronomia cresceu nas últimas décadas, o que demonstra uma gradativa consolidação da área; o número de pesquisadores da área de Educação e Ensino de Ciências que se dedica a estudar essa temática também cresceu desde 2000; as abordagens que envolvem experimentação, além daquelas sobre formação de professores e levantamento de concepções alternativas relacionadas à Astronomia mostram, mais uma vez, o interesse da área de Educação e Ensino de Ciências pelo Ensino de Astronomia; os conteúdos são diversificados, fato que consideramos importante para a consolidação da área de Ensino de Astronomia (IACHEL e NARDI, 2010, p. 233).

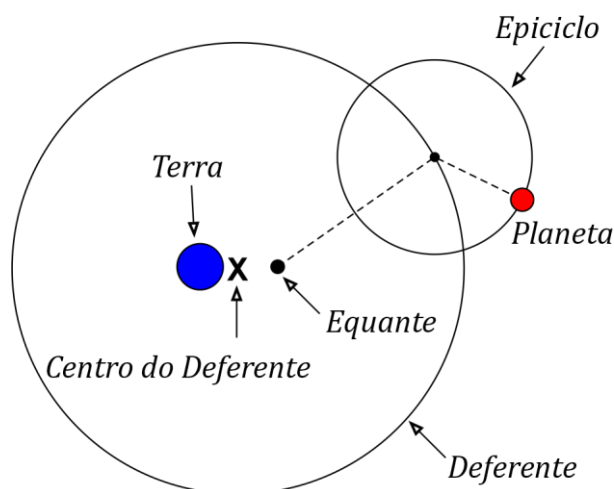
3.2 SISTEMAS GEOCÊNTRICO E HELIOCÊNTRICO

A intuição básica do ser humano é que o Sol, a Lua e os planetas giram ao redor da Terra (de leste para oeste) em períodos distintos, pois é o que vemos, com a Terra localizada fixa no centro do Universo. Daí a origem do modelo geocêntrico (Terra no centro). O modelo que colocava a Terra imóvel no centro foi superado por outro que explicava melhor o movimento dos planetas. Neste outro modelo o Sol era considerado imóvel e posicionado no centro do sistema, com a Terra, a Lua e os planetas girando ao seu redor, sendo por isso chamado de modelo heliocêntrico (MILONE, 2010).

Platão (século IV a.C.) acreditava que os movimentos dos astros ao redor da Terra eram circulares e com velocidades constantes. Ele havia adotado as ideias de perfeição e regularidade de Pitágoras de Samos (século V a.C.). Aristóteles (século IV a.C.), que era discípulo de Platão, transformou essas ideias em dogmas astronômicos que perduraram por mais de 2000 anos. Claudio Ptolomeu (90-168 d.C.) escreveu *Almagest* (O majestoso) que veio para explicar os movimentos errantes dos planetas no modelo geocêntrico. Para isso os astrônomos gregos usaram artifícios como o excêntrico, os epiciclos e o equante, este último introduzido por Ptolomeu (DAMASIO, 2011). Na figura 3.1 apresentamos o excêntrico, o epiciclo e o equante.

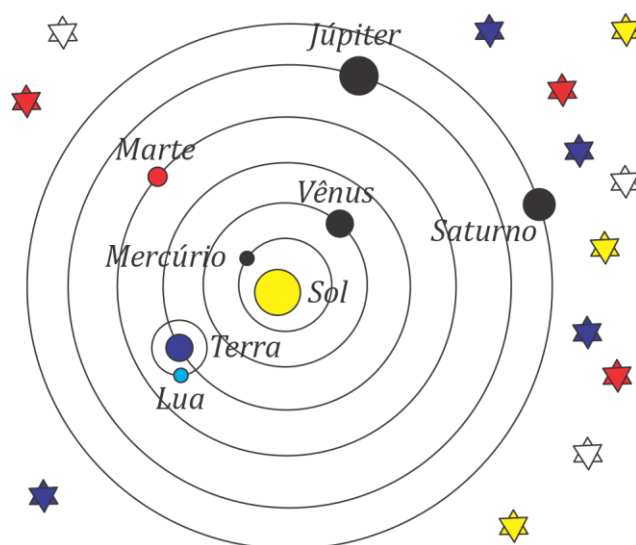
É importante ressaltar que não podemos chamar esse modelo de geocêntrico, visto que a Terra não está mais no centro do sistema. Esse modelo é chamado de geostático e perdurou do século II até o século XVI, quando foi contestado por Nicolau Copérnico (1473-1543). O que o incomodava era a afirmação de que os movimentos não eram mais uniformes em torno do centro, ou seja, a ideia de equante violava os ensinamentos gregos. O modelo de Copérnico já havia sido sugerido antes por Aristarco de Samos (c. 310 – c. 250 a.C.) que era a hipótese do modelo heliocêntrico para o Universo, conforme ilustrado na figura 3.2. Naquela época as pessoas acreditavam que a Terra ocupava a posição central do Universo, porém os movimentos progressivos e retrógrados dos planetas eram explicados de uma maneira muito confusa por este modelo. Foi tentando equacionar esse problema que Copérnico sugere que o Sol deveria estar no centro em vez da Terra. Apesar de criticar o modelo de Aristóteles, Copérnico não dispensava muitas de suas concepções (DAMASIO, 2011).

Figura 3.1 – Excêntrico é o ponto central do Deferente; Epiciclo é a trajetória do planeta e Equante é o centro do movimento de translação do Epiciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.2 – Modelo Cosmológico de Copérnico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por volta de 1519 Copérnico escreveu um ensaio denominado *Commentariolus*, no qual revela que apesar dos dados numéricos de Ptolomeu serem consistentes, os movimentos dos planetas não poderiam ser não uniformes. Os movimentos retrógrados deveriam ser reduzidos a outros movimentos que fossem círculos centrados com velocidade angular constante em torno do centro, e o equante de Ptolomeu violava essa condição. A solução dada para o movimento errante dos planetas foi considerar o Sol fixo e imóvel e, em relação a um ponto central distante de três diâmetros solares dele, os planetas Mercúrio, Vênus, Terra (esta gira em torno de seu

próprio eixo e a Lua gira ao seu redor), Marte, Jupiter e Saturno girando em trajetórias circulares. Quanto mais afastado o planeta estiver do Sol maior será seu período de translação. Esse modelo é chamado de heliostático, pois o Sol não é o centro das circunferências descritas pelos planetas (DAMASIO, 2011).

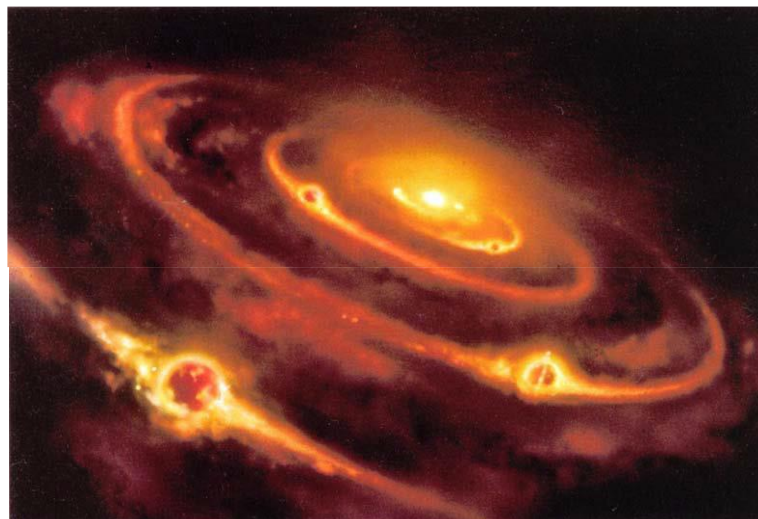
3.3 SOL, TERRA E LUA

O Sol, a Terra e a Lua são os astros mais importantes para nós no sistema solar. A Terra é nosso planeta (nossa casa), a Lua nosso satélite e o Sol nossa estrela. O Sol e a Lua são essenciais para a existência de vida na Terra. O Sol nos fornece energia e junto com a Lua, regulariza diversos fenômenos que ocorrem no planeta, como as marés. O Sol era adorado por culturas antigas como sendo um deus. Os gregos o chamavam de Helios, os persas de Mitras e os egípcios de Rá. Anaxágoras (século V a.C.) acreditava que o Sol era uma bola de fogo, o que intuitivamente faz bastante sentido. Nós aprendemos a admirar sua imponência no céu diurno, igual fazemos com a Lua no céu noturno. O Sol é a estrela mais próxima da Terra, sua luz demora aproximadamente 8 minutos para chegar até nós. A outra estrela mais próxima de nós é alfa do Centauro e sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós, lembrando que a velocidade da luz no vácuo é a maior possível no nosso Universo. O centro geométrico e gravitacional do sistema solar é ocupado pelo Sol, que translada em torno do centro da galáxia e possui uma rotação diferencial, ou seja, nas regiões polares o período de rotação é maior do que nas regiões equatoriais. Em outras palavras, o período de rotação depende da latitude. O período médio de rotação é de 27 dias, possui rotação diferencial de aproximadamente 25 dias no Equador e cerca de 30 dias nas proximidades dos polos (CECATTO, 2010).

O nascimento de estrelas, como Sol, e de sistemas maiores, como o sistema solar, se dá através de nuvens de gás densas e gigantescas, compostas de Hidrogênio e Hélio. No caso de formação de uma estrela, por exemplo, nas regiões de maior concentração dos gases a força gravitacional é maior. Isso faz com que esta massa gasosa se contraia, aumentando consideravelmente a pressão na mesma e conseqüentemente sua temperatura, podendo acarretar na queima do hidrogênio, fusão nuclear, formando a estrela. Se não houver massa suficiente neste processo, o objeto irá se resfriar e planetas poderão ser formados. O Sol e os objetos celestes que compõem o sistema solar se formaram há aproximadamente 4,5 bilhões de anos

(CECATTO, 2010). A figura 3.3 apresenta uma ilustração da formação do Sol e do sistema solar.

Figura 3.3 – Concepção artística mostrando a formação do Sol e do sistema solar. A região mais clara corresponde à estrela em torno da qual estão orbitando alguns planetas do sistema solar em formação.



Fonte: (LANG, 2001 *apud* CECATTO, 2010, p. 4-11).

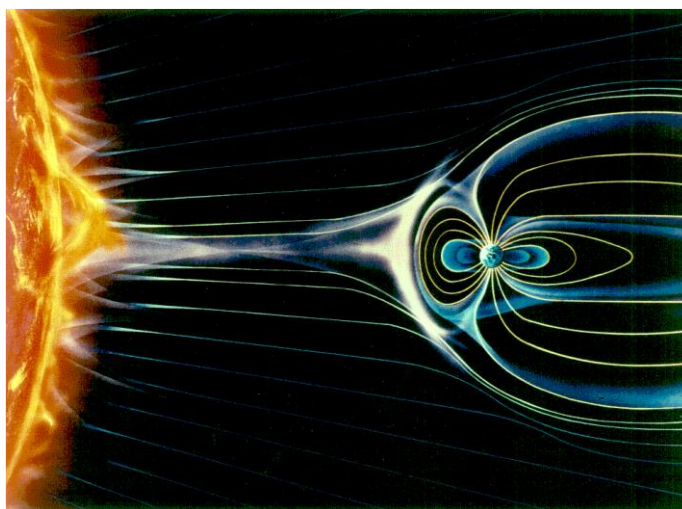
De toda energia utilizada aqui na Terra, 99,98% é proveniente do Sol. A massa solar é muito grande e devido à força gravitacional ela se contrai. A densidade, a pressão e a temperatura são muito altas no centro do Sol (o gás se encontra no estado ionizado – plasma), possibilitando reações de fusão nuclear onde hidrogênios se fundem formando hélio e liberando muita energia. O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do Universo e está presente em 73% da massa solar. A temperatura no núcleo solar atinge 15 milhões de graus centígrados e na superfície a temperatura é de cerca de 5.500 graus centígrados (RODRIGUES, 2010).

Outro fenômeno interessante são os ventos solares, um fluxo de elétrons e íons positivos que escapam do Sol para o espaço através de linhas “abertas” de seu campo magnético e eventualmente viajam até a Terra. Estas partículas interagem com os gases da alta atmosfera e o campo magnético terrestre as desvia para os polos formando as auroras (CECATTO, 2010). O vento solar causa uma deformação na direção da linha Sol-Terra quando interage com o campo magnético terrestre. Veja ilustração na figura 3.4.

Na figura 3.5 (a) e (b) estão representadas as auroras que ocorrem do encontro do vento solar com os gases da atmosfera da Terra. As moléculas da atmosfera ficam excitadas após a colisão com as partículas carregadas do vento solar e emitem luz ao voltarem para os seus estados fundamentais. As cores que vemos nas auroras dependem dos níveis de energia que

cada tipo de átomo ou molécula atinge ao ser excitado, fazendo com que fótons de diferentes energias sejam emitidos ao voltar para os seus respectivos estados fundamentais (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura 3.4 – Vento solar e sua interação com o campo magnético terrestre. A ação do vento solar pressiona o campo magnético terrestre em direção ao espaço exterior.



Fonte: (CECATTO, 2010, p. 4-35).

Figura 3.5 – (a) Aurora colorida formada no céu, parecendo enormes cortinas sopradas pelo vento brilhando no escuro. (b) Aurora bem acima da Terra, fotografada de um ônibus espacial (visível à esquerda).



Fonte: (CHAISSON e MCMILLAN, 2013, p. 182).

A Terra na mitologia grega é conhecida como a deusa Gaia e na mitologia romana deusa Terra, esposa do Céu (RODRIGUES, 2010).

Da mesma maneira que as rochas, árvores e o ar, nós somos “materiais da terra”. Na figura 3.6 apresentamos uma foto da Terra construída a partir de várias imagens coletadas pela sonda Clementine.

Figura 3.6 – Mosaico de imagens do planeta Terra obtidas com a sonda Clementine (NSSDC).



Fonte: (RODRIGUES, 2010, p. 3-25).

Esta imagem remete a um sistema dinâmico em constante mudança, em que os elementos envolvidos são o ar, a água, a terra e a própria vida em nosso planeta. Muitos livros de Astronomia apresentam o estudo da Terra através da geologia.

O conhecimento sobre o nosso planeta pode facilitar o entendimento de outros planetas e da Lua. A Terra possui um formato quase esférico. Sua massa e o seu raio são iguais a aproximadamente 6×10^{24} kg e 6.400 km, respectivamente. Grande parte da superfície da Terra é formada por água, que possui densidade de 1.000 kg/m^3 , e a parte da superfície que é formada por rocha tem densidade que varia de 2.000 kg/m^3 a 4.000 kg/m^3 . Abaixo da superfície o material é ainda mais denso (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A vida na Terra só é possível devido à sua temperatura que permite termos água no estado líquido. Três quartos da superfície terrestre é coberta por água e sua atmosfera é composta por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases como dióxido de carbono, argônio, vapor de água, etc. O efeito estufa é muito importante para a existência de vida na Terra. Ao penetrar na atmosfera terrestre a radiação infravermelha do espectro da luz solar é absorvida principalmente por vapor de água e dióxido de carbono, de maneira que esta energia fica retida entre a atmosfera e a superfície. Com isso, a atmosfera próxima da superfície terrestre fica aquecida viabilizando a existência de inúmeras formas de vida, como a nossa (RODRIGUES, 2010).

Na atmosfera, a cerca de 25 km de altitude, está a camada de ozônio (O_3). A radiação solar ultravioleta é absorvida pelo ozônio e nitrogênio atmosféricos, esta quebra o O_3 , formando

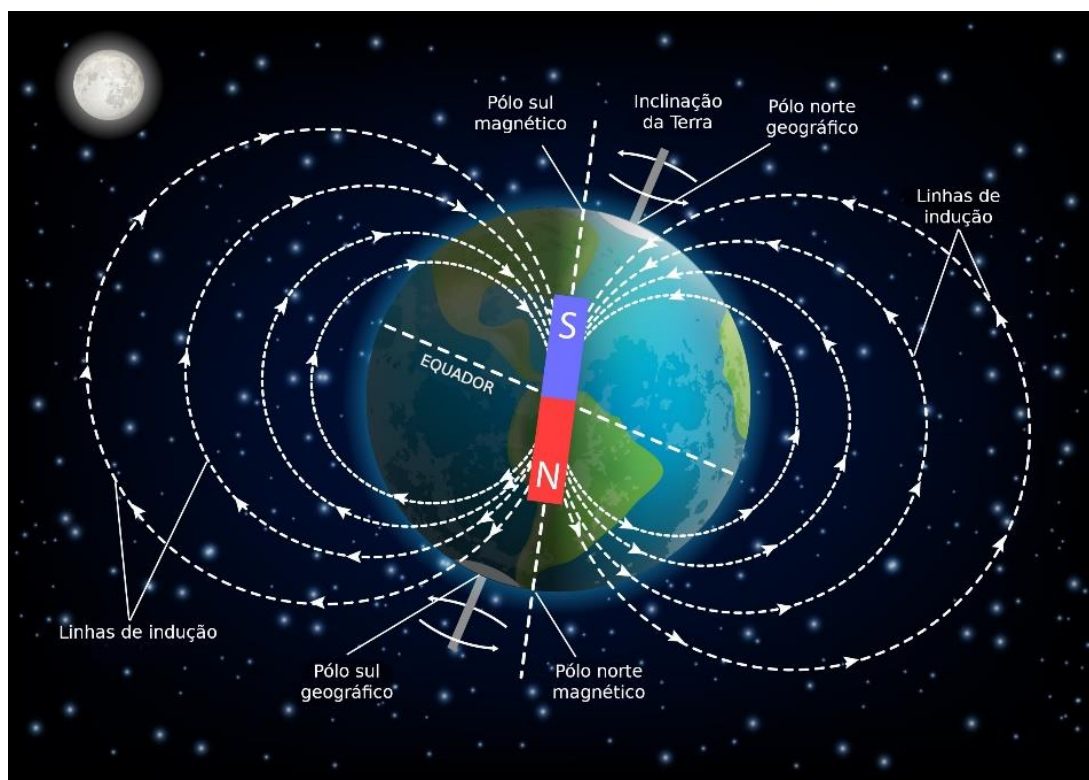
a molécula de oxigênio (O_2). A camada de O_3 protege a vida na Terra da maioria da radiação ultravioleta proveniente do Sol. Alguns gases originados de atividades humanas, como o grupo dos clorofluorcarbonos (CFC), foram por muito tempo utilizados como propelentes em latas de aerossol, solventes na lavagem a seco, produtos refrigerantes, condicionadores de ar e refrigeradores, causando danos à camada de ozônio. O CFC, quando na estratosfera, é quebrado pela absorção de energia solar liberando cloro (Cl). Este reage com o ozônio, transformando-o em O_2 . Este fenômeno foi descoberto na década de 1970. Até então achava-se que os CFCs eram rapidamente quebrados após o uso. O cloro funciona como se fosse um catalizador, não é consumido na reação, fazendo com que uma única molécula de CFC destrua até 100.000 moléculas de O_3 . Portanto, uma pequena quantidade de CFC é capaz de fazer estragos significativos na camada de ozônio, aumentando substancialmente a quantidade de radiação ultravioleta que atinge a superfície da Terra. A principal causa dos buracos na camada de ozônio é associada aos produtos químicos produzidos pelo homem (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). Em 1987, através do Protocolo de Montreal, decidiu-se que o uso de substâncias que destroem a camada de ozônio, como os CFCs, deveriam ser diminuídos significativamente até o final do século XX.

O campo magnético da Terra gera ao seu redor uma região de influência chamada de magnetosfera. Próximo da Terra o campo magnético é semelhante ao campo de uma barra magnética gigante, veja ilustração na figura 3.7. As linhas de indução magnética “saem” do norte magnético e “entram” no sul magnético. Estes polos magnéticos não são fixos em relação ao nosso planeta, eles variam de posição em uma taxa de 10 km por ano. O polo norte magnético da Terra fica próximo do polo sul geográfico e o polo sul magnético fica próximo do polo norte geográfico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

O magnetismo terrestre somente existe porque a Terra está girando. O núcleo da Terra é composto por metal líquido, que ao girar produz o seu magnetismo. Esta conexão entre a estrutura interna e o magnetismo é muito importante para o estudo de qualquer planeta, pois medindo o campo magnético de um planeta podemos dizer muito sobre seu interior. O campo magnético da Terra desempenha um importante papel de proteção contra partículas carregadas e potencialmente destrutivas. Sem a magnetosfera, a atmosfera e talvez a superfície do planeta seriam bombardeadas por partículas nocivas, prejudiciais a muitas formas de vida. Alguns pesquisadores acreditam que sem a magnetosfera a vida não seria possível. A magnetosfera da Terra possui duas regiões onde se encontram partículas carregadas de alta energia. A primeira se encontra a 3.000 km de altitude e a segunda a 20.000 km de altitude. Estas duas regiões são

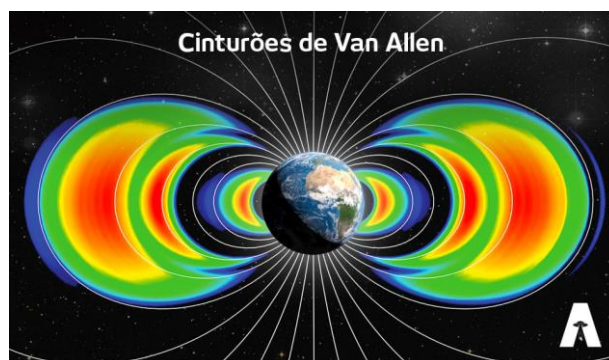
denominadas de cinto de radiação de Van Allen (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura 3.8 ilustra os cinturões de radiação de Van Allen.

Figura 3.7 – Ilustração do planeta Terra com seus eixos de rotação e magnético. As linhas de indução magnéticas representam o campo magnético terrestre.



Fonte: Siberian Art. Disponível em: <https://www.infoescola.com/eletromagnetismo/polos-magneticos-da-terra>. Acesso em: 31 jan. 2021.

Figura 3.8 – Ilustração do planeta Terra com suas linhas de campo magnético e as duas regiões de radiação de Van Allen, a interna a 3.000 km de altitude e a externa a 20.000 km de altitude.



Fonte: Space Between. Disponível em: <https://spacebetween.com.br/index.php/2020/07/27/o-que-e-o-cinturao-de-van-allen>. Acesso em: 31 jan. 2021.

A Lua é o satélite natural da Terra. É possível ver a olhos nus diversas crateras na Lua, causadas por impactos de corpos celestes com sua superfície. Na foto apresentada na figura 3.9 é possível identificar regiões escuras, que são grandes regiões preenchidas por lava solidificada, que chamamos de mares, e regiões claras, em que há formação de montanhas. A massa da Lua é 80 vezes menor que a da Terra e seu tamanho é $\frac{1}{4}$ do da Terra. Do ponto de vista físico poderíamos definir o conjunto Terra-Lua como um sistema binário (RODRIGUES, 2010).

Figura 3.9 – Imagem da Lua cheia obtida pela Apollo 11 (NSSDC).



Fonte: (RODRIGUES, 2010, p. 3-26).

As semelhanças e as diferenças entre a Lua e a Terra dificultam e até mesmo confundem os pesquisadores na tentativa de explicar a existência da Lua. Muitas teorias foram construídas ao longo dos anos. A primeira é a teoria irmã, que sugere que a Lua e a Terra formaram-se praticamente juntas e próximas, cada uma girando em torno de um centro de massa, independentemente. O problema dessa teoria é que a densidade e composição da Lua e da Terra são diferentes, assim sendo não poderiam ter se originado do mesmo material pré-planetário. A segunda é a teoria da captura, que afirma que a Lua se formou longe da Terra e foi capturada por esta. Devido à Lua ter se materializado longe da Terra, a densidade e a composição diferentes delas não eram mais um problema. Porém a captura da Lua pela Terra seria um evento muito difícil de acontecer devido à sua massa. A terceira é a teoria filha, que diz que a Lua se originou da própria Terra. Uma Terra jovem e derretida girando muito rápido jorrou matéria protolunar da bacia do oceano pacífico, pois existe uma semelhança química desta com o manto

externo da Lua. Entretanto, esta teoria não tem grande aceitação, porque simulações computacionais indicaram que seria impossível a Terra ejetar a Lua por efeito de rotação. A quarta e última teoria é a teoria do impacto. Muitos astrônomos dizem que esta é uma junção da teoria da captura com a teoria filha. Na teoria do impacto é proposto que um objeto grande do tamanho do planeta Marte colidiu com a Terra jovem e derretida e arrancou pedaços dela, os quais originaram a Lua. Simulações computacionais de tal catástrofe mostram que vários pedaços se juntaram em órbita em torno da Terra. A explicação de a Lua não ter um núcleo central denso é devido ao objeto de colisão ter deixado qualquer que seja seu núcleo para trás na Terra. O fato da composição da Lua não ser semelhante ao do manto da Terra é porque esta não tinha seu núcleo de ferro formado. A conclusão é que para entendermos a origem da Lua temos que fazer a interação entre teoria e observação e é assim que é feita a ciência moderna (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

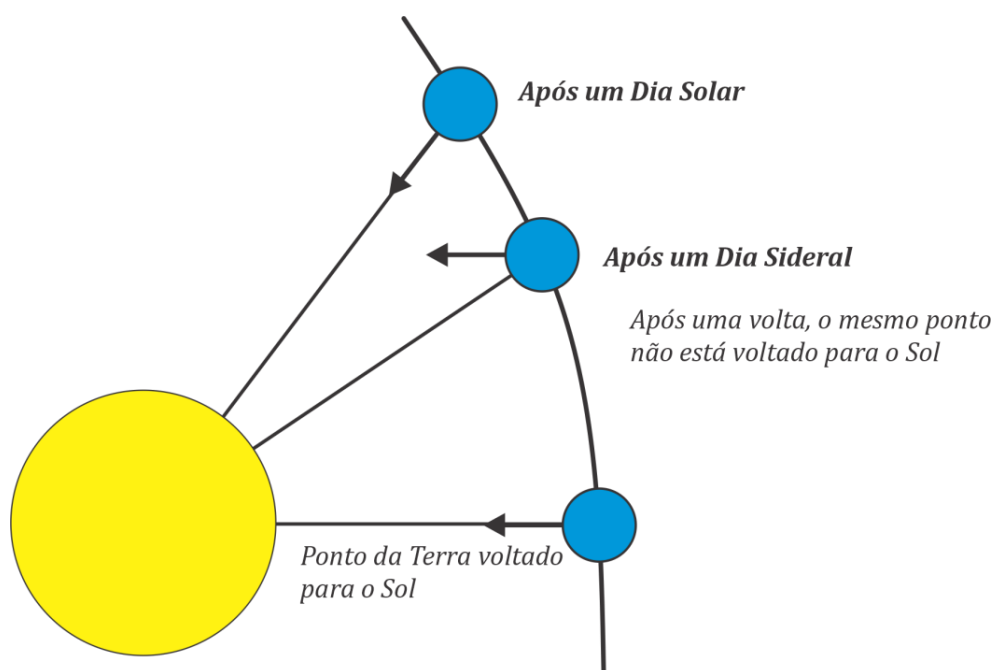
Não é possível observar variações moderadas de temperatura na Lua do dia para a noite, devido ao aquecimento solar, porque a atmosfera da mesma é rarefeita. Como resultado, são observadas grandes oscilações de temperatura. Ao meio-dia a temperatura atinge 400 K ou 127 °C e à noite 100 K ou -173 °C. Ela está geologicamente morta e dista aproximadamente 384.000 km da Terra. A distância real depende da posição da Lua, pois sua órbita em torno da Terra é ligeiramente elíptica. Sua densidade é de 3.300 kg/m³, sendo menor que a da Terra, cuja densidade média é de 5.500 kg/m³. Com isso concluímos que ela apresenta menos materiais pesados, como o ferro. Devido sua massa ser 80 vezes menor que a da Terra e seu raio ¼ do raio da Terra, seu campo gravitacional é menor, cerca de 1/6 do campo gravitacional da Terra. Se compararmos a velocidade que um objeto precisa ter para escapar do campo gravitacional da Lua, obtemos uma velocidade de escape de 2,4 km/s, enquanto que para a Terra esta velocidade é de 11,2 km/s (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

O período de rotação da Lua é precisamente igual ao período de revolução sobre a Terra, com duração de 27,3 dias. Sendo assim a Lua sempre apresenta a mesma face para a Terra. O fato da órbita da Lua ser síncrona é devido à interação gravitacional entre esses dois corpos. Assim, como a Lua provoca marés na Terra, esta também produz uma protuberância de maré na Lua. Como a Terra é mais massiva que a Lua, a força da maré na Lua é cerca de 20 vezes maior do que na Terra. Há muito tempo, a distância entre a Terra e a Lua era 2/3 do valor atual, ou seja, cerca de 250.000 km e as forças das marés da Terra na Lua eram 3 vezes maiores do que são hoje e isso pode ter sido o responsável pela forma alongada da Lua (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

3.4 DIAS, NOITES E ESTAÇÕES DO ANO

O dia e a noite são medidos com relação ao movimento aparente do Sol. Porém, é o movimento de rotação da Terra que nos fornece o período de um dia e uma noite. Quando esse movimento tem o Sol como referência chamamos de dia solar, com período de 24 h, considerando o meio-dia de um dia ao meio-dia do outro. Se tomarmos as estrelas distantes como referencial temos o dia sideral com período de 23h56min, equivalente ao período de rotação da Terra. Esta pequena diferença entre o dia solar e o dia sideral ocorre porque toda vez que a Terra rotaciona uma vez em torno de seu eixo, ela também percorre uma pequena distância ao longo de sua órbita em torno do Sol. Para o Sol retornar à mesma posição aparente no céu a Terra precisa rotacionar um pouco mais de 360° (aproximadamente 1°), veja figura 3.10 (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura 3.10 – Ilustração mostrando o dia sideral, cuja duração é o período de rotação da Terra e o dia solar, cuja duração é ligeiramente maior que o período do dia sideral, para que o Sol retorne à mesma posição aparente no céu.

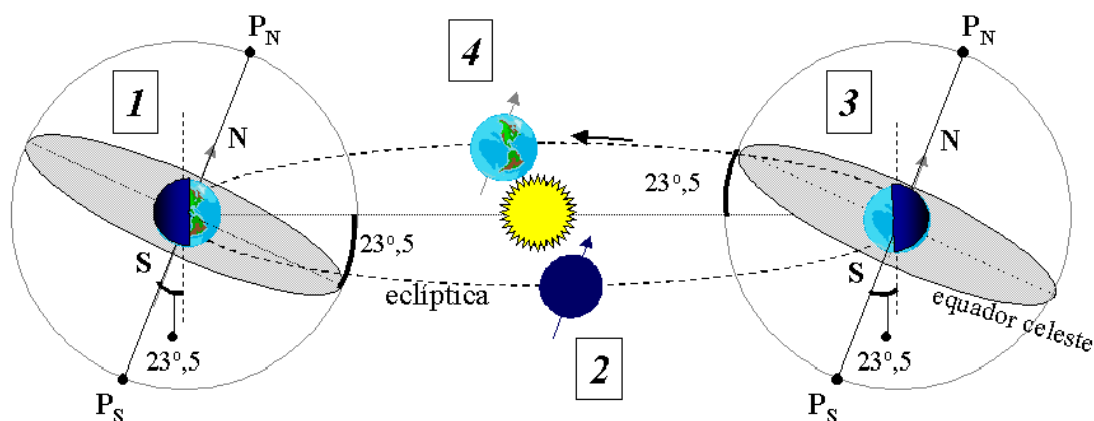


Fonte: Elaborado pelo autor.

A eclíptica é a trajetória que a Terra descreve em torno do Sol. A inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à eclíptica é de $23,5^\circ$ e essa inclinação é responsável pelas estações do ano, conforme mostrado na figura 3.11. Ao contrário do que é comum pensar, não é a

distância da Terra ao Sol que é relevante, mesmo porque a maior distância entre a Terra e o Sol é próxima da menor. O que é relevante é o tempo de exposição à luz do Sol e a concentração dessa luz. Nas posições de equinócios, onde começa a primavera em um hemisfério e o outono no outro, o dia e a noite têm a mesma duração. Nas posições de solstícios, onde começa o verão em um dos hemisférios e o inverno no outro, o dia e a noite não têm a mesma duração. No solstício de verão o dia tem duração maior do que a noite e no solstício de inverno a noite tem duração maior do que o dia (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura 3.11 representa as posições da Terra na eclíptica em relação ao Sol.

Figura 3.11 – Ilustração mostrando a influência da inclinação de $23,5^\circ$ do eixo de rotação da Terra, em relação à eclíptica (curva tracejada), nas estações do ano e nas posições dos solstícios (1 e 3) e equinócios (2 e 4).



Fonte: (MILONE, 2010, p. 1-30).

Além dos movimentos de translação, rotação e de se movimentar com o Sol através de nossa galáxia, a Terra tem um movimento de precessão. A causa da precessão da Terra é devido ao torque causado pelas forças da gravidade do Sol, da Lua e da sua própria gravidade. O tempo de um ciclo completo de precessão é de 26.000 anos e o eixo da Terra descreve a figura de um cone neste período. O tempo necessário para a Terra dar uma volta ao redor do Sol em relação às estrelas distantes é chamado de ano sideral e tem duração de 365,256 dias solares médios. O movimento de precessão da Terra faz com que o ano sideral seja 20 minutos maior que o ano tropical. A duração deste último é de 365,242 anos solares médios e tem como referencial o equinócio vernal, ou seja, o início das estações do ano (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

3.5 ECLIPSES LUNARES E SOLARES

O ciclo das fases da Lua tem duração de 29,5 dias para ser concluído. Este período é denominado de mês sinódico. O ciclo inicia a partir da Lua nova, que é pouco visível no céu. À medida que a mesma fica mais visível, se torna Lua crescente. A Lua continua crescendo durante a próxima semana e se torna Lua cheia (gibosa), ficando visível até duas semanas após a Lua nova. A partir daí a Lua começa a diminuir e se torna Lua minguante, continua decrescendo e volta a ser Lua nova completando assim o ciclo, veja figura 3.12. A posição da Lua em relação ao Sol, vista da Terra, depende da fase lunar. Por exemplo, a Lua cheia nasce no leste enquanto o Sol se põe no oeste. A Lua crescente nasce ao meio-dia, mas só começa a ser visível no final do dia. Quando o Sol se põe, a Lua já está alta no céu (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura 3.12 – Imagem mostra as fases da Lua vista por um observador no hemisfério sul da Terra.

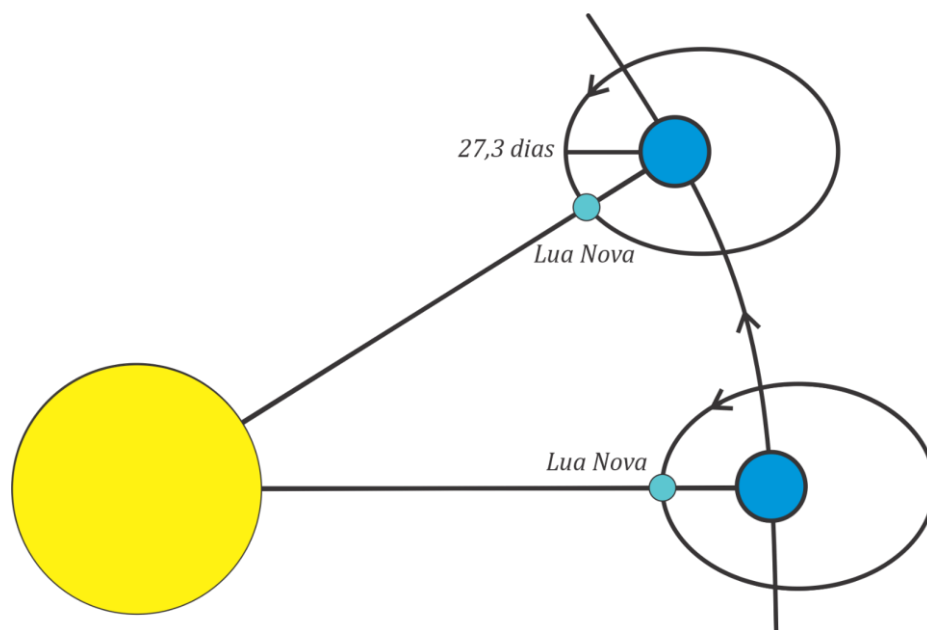


Fonte: [Pinterest](https://br.pinterest.com/pin/709879959990789816). Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/709879959990789816>. Acesso em: 1 maio 2021.

O período para a Lua efetuar uma revolução completa em torno do seu eixo e ao mesmo tempo dar uma volta em torno da Terra é chamado de mês sideral e tem duração de 27,3 dias. Este é um pouco menor do que o mês sinódico, porque o dia solar é ligeiramente maior do que

o dia sideral. A figura 3.13 ilustra o mês sideral e o mês sinódico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura 3.13 – Imagem mostra o ciclo das fases da Lua, sua rotação e translação.

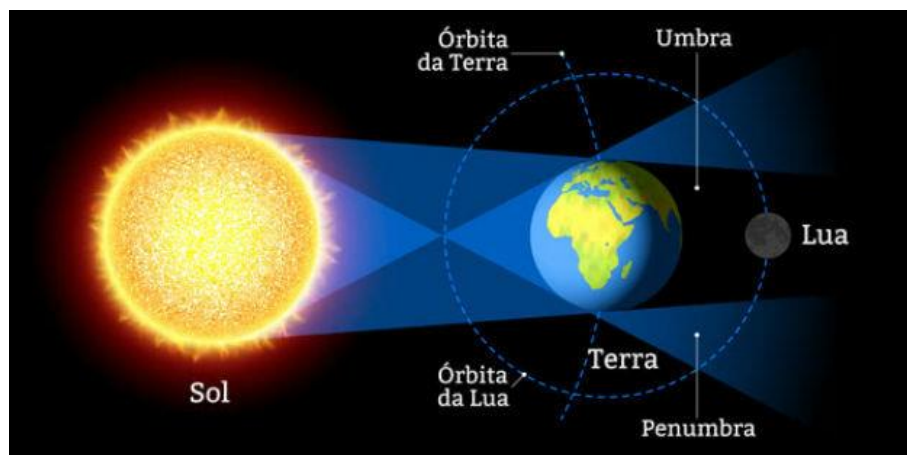


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando o Sol, a Terra e a Lua se alinham ocorre um fenômeno chamado eclipse. Porém, este fenômeno somente ocorre quando a Lua se encontra na fase de Lua nova ou cheia. Quando o Sol e a Lua estão em direções opostas, visto da Terra, a sombra da Terra escurece a Lua em um eclipse lunar, veja figura 3.14 (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

O eclipse lunar total ocorre quando a Lua se encontra na fase de Lua cheia. Porém, normalmente o alinhamento dos astros não é perfeito e a região central da sombra da Terra, chamada umbra (ausência total de luz solar), não cobre totalmente a Lua cheia. Tal ocorrência é conhecida como eclipse lunar parcial, em que pelo menos parte da superfície da Lua se encontra na região de penumbra (ausência parcial de luz solar). Eclipses totais lunares duram o tempo necessário para a Lua cheia sair da região de sombra (umbra) da Terra. Este intervalo de tempo não é mais que cerca de 100 minutos. Durante este tempo a Lua adquire uma coloração vermelha escura e misteriosa, a qual tem origem da luz solar que é desviada (avermelhada) pela atmosfera da Terra e é refratada na superfície lunar evitando que a sombra da Terra fique completamente preta (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

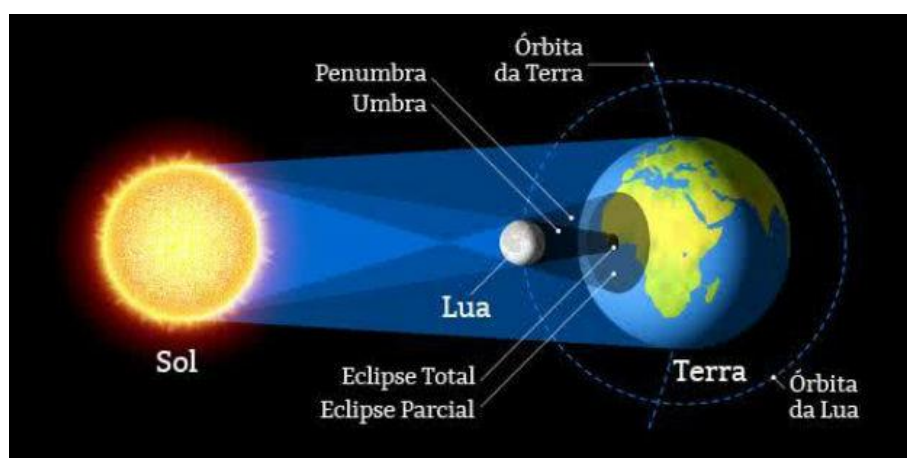
Figura 3.14 – Ilustração de um eclipse total da Lua. O Sol, a Terra e a Lua se alinham, com a Lua se encontrando na região central de sombra (umbra) da Terra.



Fonte: GOUVEIA, R. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eclipse-lunar>. Acesso em: 2 fev. 2021.

Quando a Lua e o Sol estão exatamente na mesma direção, visto da Terra, ocorre um fenômeno ainda mais inspirador. A Lua passa entre o Sol e a Terra, se o alinhamento dos astros for perfeito, observa-se o eclipse total solar e o dia brevemente se torna noite em algumas regiões, veja ilustração na figura 3.15. A luz do Sol é reduzida significativamente, algumas estrelas e planetas tornam-se visíveis durante o dia (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura 3.15 – Ilustração de um eclipse solar. Na região de umbra na Terra ocorre o eclipse solar total e na região de penumbra ocorre o eclipse solar parcial.



Fonte: GOUVEIA, R. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eclipse-solar>. Acesso em: 2 fev. 2021.

A sombra da Lua na superfície da Terra tem um diâmetro de cerca de 7.000 km, que é praticamente o dobro do seu próprio diâmetro. Na região externa à essa sombra nenhum eclipse

é visto. Na região central da mesma, chamada de umbra, observa-se o eclipse total do Sol. Na região de sombra, chamada de penumbra, observa-se o eclipse parcial do Sol, veja figura 3.15. A região de umbra não excede 270 km e a superfície da Terra viaja a mais de 1.700 km/h, portanto a duração de um eclipse total solar não deve exceder 7,5 minutos (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Em um eclipse solar parcial a Lua está ligeiramente deslocada em relação ao alinhamento dos astros e apenas uma parte do Sol é coberta. O eclipse solar total, ao contrário do eclipse lunar, que é visível simultaneamente por todos os locais do lado noturno da Terra, somente pode ser visto de uma pequena parte do lado diurno da Terra. Mesmo assim, é possível estudar a coroa solar que é uma parte difícil de ver do nosso Sol (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Como já discutido, a órbita da Lua em torno da Terra não é exatamente circular. Se durante um eclipse a Lua estiver longe o suficiente da Terra, o seu disco não consegue cobrir totalmente o disco do Sol, mesmo que seus centros estejam alinhados. Quando isso ocorre a sombra da Lua na Terra não apresenta uma região de umbra, de maneira que um fino anel de luz solar envolve a Lua. A coroa solar não é vista, pois a pequena quantidade de Sol que ainda é visível impede completamente que o brilho fraco da coroa seja visto. Este eclipse é chamado de eclipse anular do Sol, veja figura 3.16. De todos os eclipses solares observados, aproximadamente metade são eclipses anulares (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

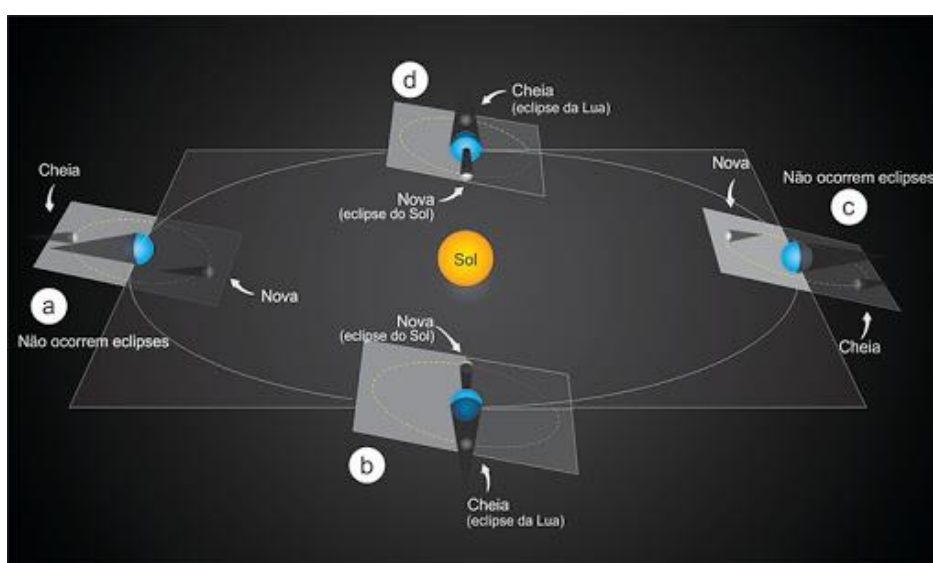
Figura 3.16 – Eclipse anular do Sol. Um fino anel de luz solar envolve o disco lunar. Nesta situação a coroa solar não é visível.



Fonte: Olhar Digital. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2020/06/18/ciencia-e-espaco/eclipse-vai-criar-anel-de-fogo-no-ceu-neste-domingo-assista>. Acesso em: 3 fev. 2021.

Diante de toda essa descrição os alunos podem perguntar: Por que não há um eclipse solar em cada Lua nova e um eclipse lunar em cada Lua cheia? A resposta é, porque a órbita da Lua é ligeiramente inclinada de um ângulo de $5,2^\circ$ em relação à eclíptica (órbita da Terra em torno do Sol). A probabilidade de ocorrer um alinhamento perfeito entre o Sol, a Terra e a Lua é muito pequena, de maneira que os eclipses são eventos relativamente raros (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura 3.17 ilustra a órbita da Lua inclinada em relação à eclíptica.

Figura 3.17 – Ilustração mostrando quatro lunações diferentes. Em (a) e (c) não há eclipse, pois os astros não estão alinhados. Em (b) e (d) pode haver eclipses solar e lunar, pois os astros estão alinhados.



Fonte: Linha dos Nós. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/eclipses/eclipse.htm>. Acesso em: 3 fev. 2021.

Os nós da órbita da Lua se encontram nas intersecções da órbita com o plano da eclíptica. Quando a Lua se encontra nesses nós pode ocorrer eclipse ou não, dependendo se a linha de nós (linha imaginária que liga os nós) está ou não direcionada para o Sol. A figura 3.17 ilustra os dois casos. Em (b) e (d) são apresentados os dois períodos conhecidos como estações de eclipses, que podem ocorrer tanto o eclipse solar quanto o lunar, dependendo do alinhamento entre os astros. Se a Lua estiver acima ou abaixo do plano da eclíptica, casos (a) e (c) da figura 3.17, não ocorre eclipse. Esses casos são chamados de desfavoráveis e são mais comuns. Portanto, pode-se concluir que os eclipses ocorrem somente quando a Lua está na fase de Lua nova ou cheia e a linha de nós estiver passando pelos centros dos astros (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

3.6 LEIS DE KEPLER

Johannes Kepler (1571-1630) foi um matemático e astrônomo alemão, contemporâneo do primeiro observador “moderno” Galileu Galilei. Diferente de Galileu, Kepler era um teórico puro. Seu trabalho sobre o movimento planetário, que tanto esclareceu nosso conhecimento, foi baseado em observações de outros, em especial na extensa coleção de dados compilados por Tycho Brahe (1546-1601). A maioria das observações de Tycho foram feitas antes da invenção do telescópio em seu próprio observatório, chamado Uraniborg, na Dinamarca. Seus instrumentos de observação foram feitos por ele mesmo, os quais permitiram que ele conseguisse registros precisos das estrelas, planetas e outros eventos celestiais, como um cometa e uma supernova. Depois de sua morte, Kepler herdou todos os dados das observações dos planetas feitas por ele em várias décadas. A partir daí começou a elaborar uma teoria do movimento dos planetas que não precisasse utilizar os epiciclos. O heliocentrismo de Copérnico foi adotado por ele, porém as órbitas dos planetas não deveriam ser circulares. A sua teoria deveria conciliar os dados observacionais de Tycho e o sistema heliocêntrico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Depois de muitos estudos Kepler conseguiu, a partir dos dados planetários de Brahe, desenvolver três leis do movimento planetário que levam seu nome. Usando observações de diferentes épocas do ano e triangulação de diferentes pontos da órbita da Terra, ele determinou a forma da órbita de cada planeta e encontrou as velocidades em que os planetas se movem através da observação da posição dos planetas em noites sucessivas. Ele relacionou o tamanho da órbita de um planeta ao seu período orbital sideral, ou seja, quanto mais distante estiver um planeta do Sol, maior será o tempo de revolução em torno dele (CHAISSON; MCMILLAN, 2013).

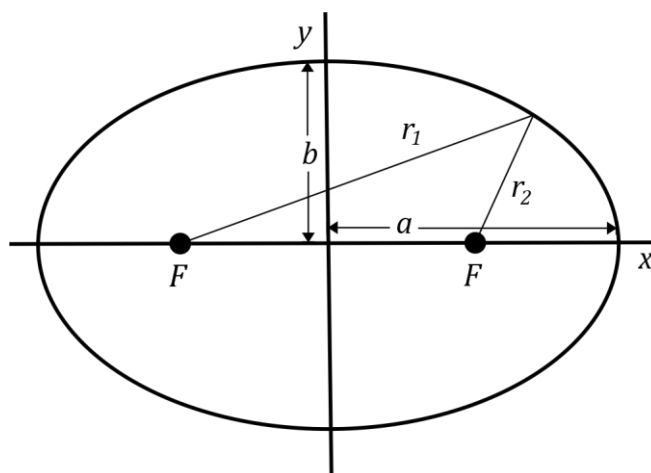
Kepler expôs estes resultados nas suas três leis empíricas do movimento planetário. Estas leis são consistentes com a lei da gravitação universal de Newton (TIPLER; MOSCA, 2013). A primeira lei de Kepler, também conhecida como lei das órbitas, diz que as órbitas dos planetas são elípticas com o Sol ocupando um de seus focos, ver ilustração na figura 3.18. Uma elipse é o lugar geométrico dos pontos para os quais a soma das distâncias a dois pontos fixos, chamados focos F , é constante, como ilustrado na figura 3.19.

A segunda lei de Kepler diz que o segmento de reta imaginário que liga qualquer planeta ao Sol, varre áreas iguais em tempos iguais (TIPLER; MOSCA, 2013). Esta lei é conhecida como lei das áreas e é uma consequência da conservação do momento angular, ver ilustração

na figura 3.20. A terceira é a lei dos períodos, que diz que o quadrado do período de revolução de qualquer planeta ao redor do Sol é proporcional ao cubo da distância do mesmo.

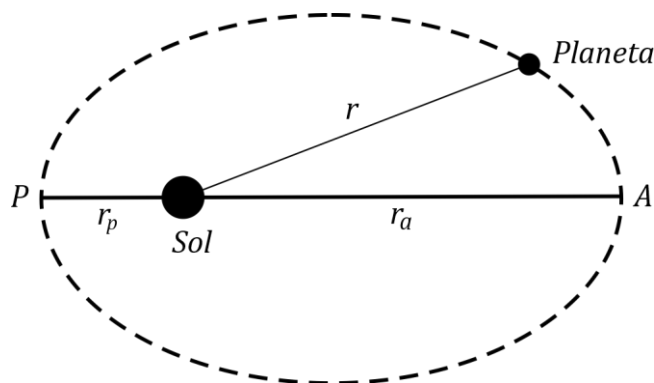
As leis de Kepler deram um forte suporte às ideias de Copérnico, pois o movimento dos planetas podia ser descrito com grande simplicidade se o Sol fosse adotado como sistema de referência. Tais leis eram empíricas, sem nenhuma interpretação teórica, pois Kepler não fornecia o conceito de força como causa das regularidades observadas. O conceito de força é melhor formulado por Newton, que deduz as leis de Kepler a partir de suas leis de movimento e da sua lei da gravitação universal.

Figura 3.18 – Ilustração mostrando uma elipse cujo lugar geométrico dos pontos para os quais $r_1 + r_2 = constante$. A distância a é chamada de semieixo maior, e b é o semieixo menor. As circunferências são casos especiais onde os focos coincidem.



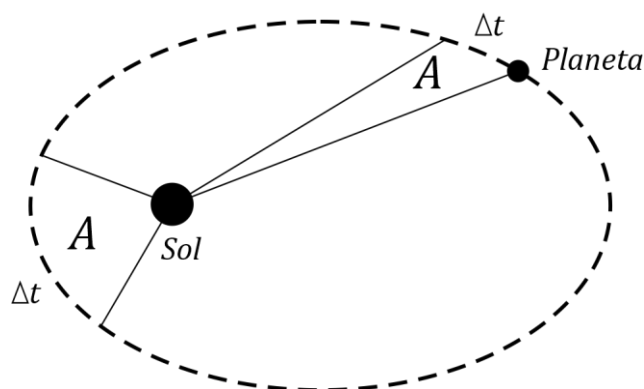
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.19 – Ilustração mostrando a trajetória elíptica de um planeta com o Sol ocupando um de seus focos. O ponto P, onde o planeta se encontra mais próximo do Sol, é chamado de Periélio. O ponto A, onde o planeta se encontra mais afastado do Sol, é chamado de Afélio. A distância média entre um planeta e o Sol é igual a $(r_p + r_a)/2$ e é igual ao semieixo maior. Os planetas conhecidos descrevem órbitas mais circulares do que a órbita aqui mostrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.20 – Ilustração mostrando a lei das áreas. As áreas varridas pelo segmento de reta imaginário Sol-Planeta, durante um dado intervalo de tempo Δt , são iguais. O planeta se move mais rapidamente quando está próximo do Sol do que quando está mais afastado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vamos utilizar o conceito de momento angular para derivar a segunda lei de Kepler, a lei das áreas. A figura 3.21 (a) mostra um planeta em órbita elíptica em torno do Sol. No tempo dt , o planeta se desloca de uma distância vdt ¹, e o vetor raio \mathbf{r} varre a área sombreada da figura. Esta vale a metade da área do paralelogramo formado pelos vetores \mathbf{r} e vdt . Esta pode ser descrita através do módulo do produto vetorial $|\mathbf{r} \times vdt|$ (TIPLER e MOSCA, 2013). Dessa forma, a área varrida dA , dada pela região sombreada na figura 3.21 (a), pelo raio \mathbf{r} no tempo dt é descrita por

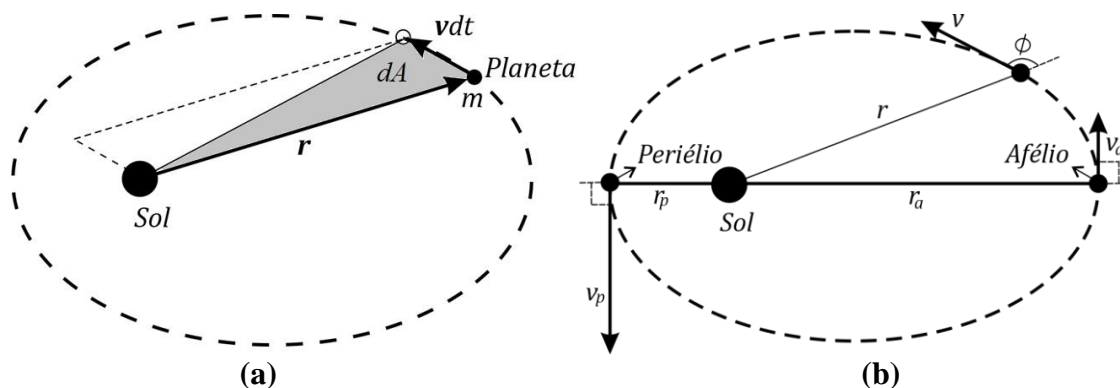
$$dA = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times vdt| = \frac{|\mathbf{r} \times m\mathbf{v}|}{2m} dt \Rightarrow \frac{dA}{dt} = \frac{L}{2m}, \quad (3.1)$$

sendo $L = |\mathbf{r} \times m\mathbf{v}|$ a magnitude do momento angular orbital do planeta em torno do Sol, ou seja, esta é proporcional à magnitude do momento angular orbital L .

Como a força sobre o planeta está no segmento de reta imaginário Sol-Planeta, ela não exerce um torque τ em relação ao Sol. Consequentemente, $\tau = \frac{dL}{dt} = 0$ de maneira que L é constante. Logo, a taxa na qual a área é varrida é a mesma para todas as partes da órbita, que é o que diz a segunda lei de Kepler (TIPLER e MOSCA, 2013). Se L é constante, tem-se que $|\mathbf{r} \times m\mathbf{v}| = r v \sin(\phi)$ é constante. O ângulo ϕ é ilustrado na figura 3.21(b). Note que no periélio (p) e no afélio (a) $\phi = 90^\circ$, de forma que $r_a v_a = r_p v_p$, de maneira que no periélio, distância r menor ao Sol, o planeta se move com velocidade maior e no afélio, distância maior, o planeta se move com menor velocidade.

¹ Neste trabalho adotaremos a notação vetorial através de letras em negrito, como o vetor velocidade \mathbf{v} , por exemplo.

Figura 3.21 - (a) Se o momento angular $L = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ é constante a área sobreada $dA = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{v} dt| = \frac{1}{2m} L dt$, varrida no tempo dt também é constante, ou seja, $\frac{dA}{dt} = cte$. **(b)** Mostra que a magnitude do momento angular, dada por $L = m v r \text{sen}(\phi)$, permanece constante, e portanto, $r v \text{sen}(\phi)$ permanece constante. Para $\phi = 90^\circ$ no periélio (p) e no afélio (a) tem-se que $r_a v_a = r_p v_p$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já descrito, a terceira lei de Kepler diz que o quadrado do período de qualquer planeta é proporcional ao cubo do semieixo maior de sua órbita, ou seja,

$$T^2 = Cr^3, \tag{3.2}$$

sendo T o período de revolução, r o raio orbital médio e C uma constante que tem o mesmo valor para todos os planetas de um mesmo sistema solar.

Esta lei é consequência do fato de que a força exercida pelo Sol sobre um planeta, varia com o inverso do quadrado da distância do Sol ao planeta (TIPLER e MOSCA, 2013). Para demonstrarmos essa lei vamos utilizar a lei da gravitação universal de Newton, que diz que cada planeta deve ser atraído para o Sol com uma força proporcional à massa M_p do planeta e inversamente proporcional ao quadrado de sua distância ao Sol. Esta será apresentada formalmente na próxima seção. Considerando o caso especial de um planeta movendo-se com velocidade v em uma órbita circular de raio r em torno do Sol tem-se que $F = \frac{GM_s M_p}{r^2}$, sendo G a constante gravitacional universal e M_s a massa do Sol. A força gravitacional do Sol produz no planeta uma aceleração centrípeta dada por $a_c = \frac{v^2}{r}$. Considerando a segunda lei de Newton para massa constante ($F = M_p a_c$) tem-se que:

$$\frac{GM_s M_p}{r^2} = M_p \frac{v^2}{r}. \tag{3.3}$$

Explicitando v^2 , obtemos,

$$v^2 = \frac{GM_s}{r}. \tag{3.4}$$

Para um intervalo de tempo correspondente ao período de revolução do planeta em torno do Sol, este percorre uma distância $2\pi r$, de maneira que sua velocidade pode ser escrita como:

$$v = \frac{2\pi r}{T} . \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (3.5) na equação (3.4) obtemos,

$$\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM_s}{r} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_s} r^3 . \quad (3.6)$$

Comparando este resultado com a equação (3.2) tem-se que $C = \frac{4\pi^2}{GM_s}$.

Se substituirmos a massa do Sol M_s pela massa de um planeta M_p , a equação (3.6) se aplica para as órbitas dos satélites naturais de qualquer planeta, como a Lua em torno da Terra.

3.7 LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE NEWTON

As teses de Aritóteles (385-323 a.C.) acerca da atração gravitacional perduraram por aproximadamente dois mil anos. Galileu Galilei (1564-1642) foi quem contrastou a metodologia abstrata do raciocínio aristotélico com o método empírico. Outros grandes cientistas da época compartilhavam deste método empírico, entre eles, Francis Bacon (1561-1626), Johannes Kepler (1571-1630) e René Descartes (1596-1650). Contudo, quem elaborou a primeira teoria da gravitação com sistematização matemática e fundamentada no método científico foi Isaac Newton (TONIATO, 2020).

Isaac Newton nasceu em 1642 no dia de Natal, ano em que morreu Galileu Galilei, na cidade de Lincolnshire na Inglaterra. Quando a peste bubônica chegou a Cambridge em 1665, Newton, que estudava em Trinity College da Universidade de Cambridge, se refugiou na sua casa durante 2 anos. Neste período ele fez a descoberta da lei da gravidade, mas guardou segredo por 20 anos por achar que estava incompleta e para evitar críticas e plágio dos colegas (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Newton, ao refletir acerca da queda de um corpo, hipotetizou que qualquer objeto que possui uma certa massa sempre exerce uma força gravitacional atrativa em todos os outros objetos massivos e quanto maior a massa do objeto, mais intensa é essa força. Por exemplo, na queda de uma bola, a Terra aplica uma força gravitacional de atração na bola e essa também aplica uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos na Terra (terceira lei

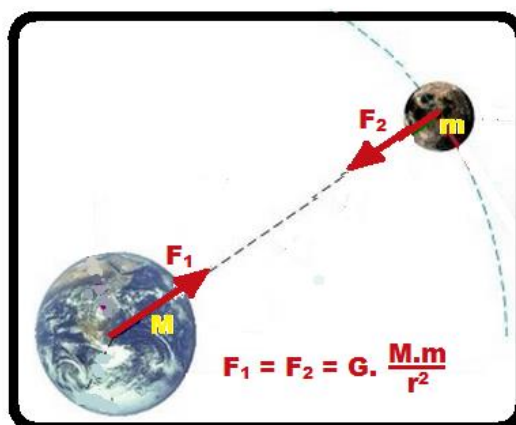
de Newton). Devido à Terra ser muito mais massiva, esta adquire uma aceleração muito menor do que a bola (segunda lei de Newton) (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Um outro aspecto da força gravitacional veio do estudo das acelerações dos planetas que orbitavam o Sol. Quanto maior a distância r do planeta ao Sol, menor seria a atração que receberia, ou seja, a força gravitacional atrativa diminuiria em proporção ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Em outras palavras, a força gravitacional atrativa é diretamente proporcional ao produto das massas m_1 e m_2 dos corpos 1 e 2, respectivamente, e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros dos corpos (CHAISSON e MCMILLAN, 2013), ou seja,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3.7)$$

sendo $G \approx 6,674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ uma constante universal que tem o mesmo valor para todos os pares de pontos materiais, chamada de constante gravitacional. A figura 3.22 ilustra a atração gravitacional entre a Terra e a Lua.

Figura 3.22 – Ilustração mostrando a Terra atraindo a Lua e simultaneamente a Lua atraindo a Terra, com uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. A massa da Terra é M e a da Lua é m . A distância entre os centros dos astros é dada por r e G é a constante gravitacional.



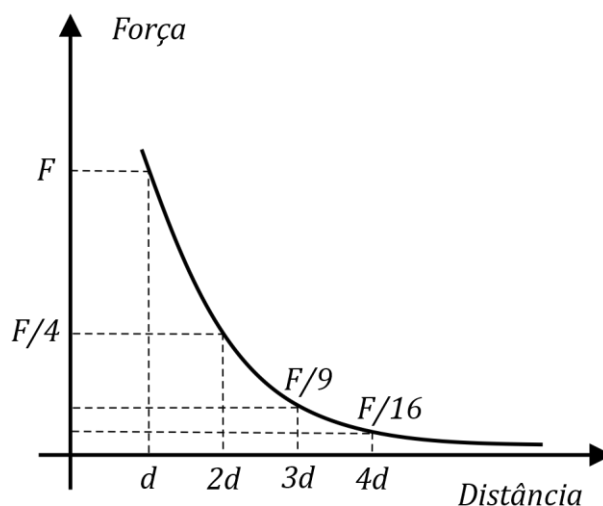
Fonte: Lei da Gravitação Universal de Newton. Disponível em: http://fisicaevestibular.com.br/novo/wp-content/uploads/migracao/leis-gravitacao/o_283d11e3487e4ebc.html. Acesso em: 11 fev. 2021.

Como $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, quando diminuirmos a distância r entre os dois corpos pela metade da inicial ($r/2$), por exemplo, a força gravitacional de atração entre eles F' se torna quatro vezes maior, pois

$$F' = G \frac{m_1 m_2}{\left(\frac{r}{2}\right)^2} = 4 G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 4F.$$

Na figura 3.23 ilustra o gráfico da força gravitacional atrativa em função da distância entre os centros de massa de dois corpos.

Figura 3.23 – Gráfico da força gravitacional em função da distância entre dois corpos que estão interagindo entre si. A força varia de maneira inversamente proporcional com o quadrado da distância entre o centro dos corpos e o gráfico é uma hipérbole cúbica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Newton publicou sua teoria da gravitação em 1686, mas foi só um século depois que uma determinação experimental precisa da constante gravitacional G foi feita por Henry Cavendish em 1797 através de seus experimentos com a balança de torção (TIPLER e MOSCA, 2013).

Esta lei de força estende-se da gravitação na superfície da Terra até os corpos celestes, sendo por isso chamada de lei da gravitação universal de Newton. Com esta lei é possível reproduzir as leis do movimento planetário de Kepler e explicar que a origem dos movimentos orbitais dos planetas está na força gravitacional. A observação de que os corpos são acelerados igualmente por um campo gravitacional uniforme feita por Galileu é explicada por Newton como sendo o que ocorre nas proximidades da superfície da Terra, em que M e r são a massa e o raio da Terra. Se desprezarmos a rotação da Terra, considerarmos que a mesma é esférica e negligenciarmos suas variações de densidade, devido a existência de depósitos de minérios e outras substâncias cuja densidade é maior ou menor que a densidade média da Terra, a força gravitacional torna-se constante e passa a ser a própria força peso de um corpo próximo da superfície da Terra (TONIATO, 2020). A figura 3.24 ilustra um corpo de massa m próximo da superfície da Terra e sob a influência de seu campo gravitacional de maneira que a força peso $P = mg$ é igual à força gravitacional F , ou seja,

$$mg = \frac{GMm}{r^2}.$$

Dividindo ambos os lados da igualdade acima por m , tem-se:

$$g = \frac{GM}{r^2}. \quad (3.8)$$

Substituindo $r = R + h$, conforme a figura 3.24,

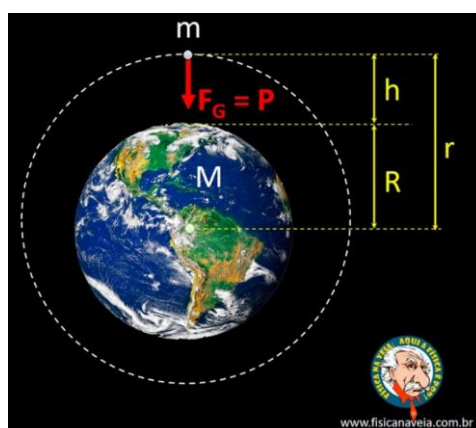
$$g = \frac{GM}{(R + h)^2}. \quad (3.9)$$

Na superfície da Terra tem-se $h = 0$, de maneira que,

$$g_0 = \frac{GM}{R^2}. \quad (3.10)$$

sendo g_0 o campo gravitacional na superfície da Terra.

Figura 3.24 – Ilustração mostrando um corpo de massa m próximo da superfície da Terra a uma altitude h . A Terra possui massa M e raio R . A distância do centro da Terra até o centro do corpo é r . A força gravitacional é o próprio peso do corpo.



Fonte: FÍSICA NA VEIA. Disponível em: <https://fisicanaveia.blogosfera.uol.com.br/2020/06/11/a-gravidade-e-zero-no-espaco-quanto-vale-a-gravidade-na-iss>. Acesso em: 11 fev. 2021.

O campo gravitacional no exterior do planeta ($r \geq R$) pode ser calculado como se toda a massa M do planeta estivesse confinada em seu centro, ou seja, se tivéssemos uma massa pontual. Mas como é o campo gravitacional no interior de um planeta? Este obedece a mesma lei de força?

A resposta para esta última pergunta é não. Para calcular a aceleração da gravidade no interior do planeta é necessário saber a distribuição da densidade de massa da Terra. Como uma primeira aproximação, pode-se assumir que a Terra possui simetria esférica e densidade dependente apenas com a distância r a partir do centro do planeta. Sob estas condições é possível obter a distribuição de densidade a partir da equação de Adams-Williamson (LAY and

WALLACE, 1995), a qual relaciona o gradiente de densidade radial com as propriedades elásticas de um planeta com simetria esférica sob condições hidrostáticas. A solução desta equação requer o conhecimento das velocidades de ondas sísmicas como função de r , as quais podem ser obtidas de dados sismométricos.

A gravidade no interior da Terra é aproximadamente constante e igual ao valor observado na superfície em todo o manto terrestre. Este possui uma espessura de aproximadamente 3.000 quilômetros e representa 84% do volume total da Terra. Este resultado pode ser explicado pelo modelo terrestre de duas camadas (SNYDER, 1986), o qual mostra que a constância da aceleração da gravidade é uma consequência do tamanho particular e da densidade do núcleo terrestre com relação ao tamanho e densidade de todo o planeta Terra. Em outros planetas com diferentes distribuições de massa, a dependência da aceleração da gravidade pode ser muito diferente (DRAGONI, 2020).

Conhecer o campo gravitacional no interior da Terra é muito importante, porque a gravidade é uma das principais forças que controlam os movimentos internos da Terra, como os movimentos de convecção que ocorrem no núcleo e no manto. Tais movimentos dão origem a manifestações fundamentais da atividade do planeta, como o seu campo magnético e a dinâmica de sua superfície através das placas tectônicas, vulcões e terremotos (DRAGONI, 2020).

3.8 MARÉS

As marés são os movimentos periódicos de subida e descida do nível médio do mar que ocorrem em todo o oceano. À medida que o nível do mar sobe e desce, a borda do mar lentamente se desloca em direção à terra e ao mar diariamente. O conhecimento da periodicidade das marés é muito importante para várias atividades costeiras, como surf, pesca, navegação e até mesmo para se preparar para tempestades.

As marés são causadas pela variação das forças gravitacionais que a Lua e o Sol exercem sobre a Terra e seus oceanos. Isto ocorre porque o campo gravitacional tanto da Lua quanto do Sol não é homogêneo em todo o globo. A força gravitacional que a Lua exerce em qualquer corpo na superfície da Terra é cerca de cem vezes menor do que a força gravitacional que o Sol exerce. Entretanto, pelo fato da Lua estar mais próxima da Terra do que o Sol, a não homogeneidade do campo gravitacional lunar em toda a Terra é consideravelmente maior do

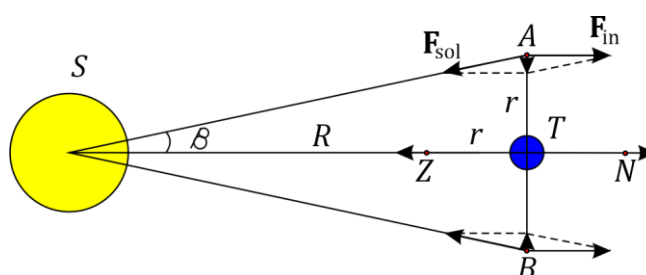
que a do campo solar. Como consequência disso as marés induzidas pela Lua são aproximadamente o dobro das marés induzidas pelo Sol (BUTIKOV, 2002).

Devido ao centro de massa do sistema Sol-Terra quase coincidir com o centro do Sol, as forças geradoras de maré podem ser melhor entendidas se começarmos analisando as marés induzidas pelo Sol. A Terra como um todo se move com uma aceleração relativa a um referencial inercial. Essa aceleração é consequência das forças gravitacionais dos corpos celestes. Ela se move em uma trajetória quase circular em torno do Sol com uma aceleração centrípeta \mathbf{a}_0 . Essa aceleração é produzida pela força gravitacional solar, como se a Terra estivesse “caindo” no campo gravitacional do Sol, e não depende de sua velocidade orbital (BUTIKOV, 2002).

Para entendermos melhor as marés vamos considerar um referencial geocêntrico não giratório que realiza um movimento translacional circular em torno do Sol, ou seja, é um movimento de revolução sem rotação. Com relação ao espaço inercial, relacionado às estrelas distantes, todos os pontos desse referencial movem-se com aceleração \mathbf{a}_0 , cuja magnitude e direção são as mesmas para todos os pontos. Qualquer corpo de massa m neste referencial não inercial geocêntrico está sujeito a uma pseudoforça de inércia $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_0$, que é independente da posição do corpo em relação a Terra. Se o corpo fosse colocado no centro da Terra, essa pseudoforça equilibraria exatamente a força gravitacional que o corpo recebe do Sol (BUTIKOV, 2002).

Diferente da pseudoforça de inércia, a força gravitacional do Sol, \mathbf{F}_{sol} , experimentada pelo corpo diminui com a sua distância do Sol, sendo sua magnitude e direção dependentes da posição do corpo na Terra. A *força de maré* é resultado da ação combinada da pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a força \mathbf{F}_{sol} , que somente possuiriam a mesma magnitude e direção se o corpo estivesse no centro da Terra (BUTIKOV, 2002). A figura 3.25 ilustra a influência solar nas marés.

Figura 3.25 – Ilustração das forças geradoras de maré induzidas pelo Sol (S) em diferentes pontos A, B, Z e N. Somente no centro da Terra (T) que a força geradora de maré é nula, pois a soma vetorial entre a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a força \mathbf{F}_{sol} é um vetor nulo. Então, \mathbf{F}_{in} e \mathbf{F}_{sol} passam a ter mesma magnitude e direção, com sentidos opostos. $\beta \approx r/R$ é o ângulo entre o corpo e o centro da Terra vista do Sol.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A magnitude da aceleração \mathbf{a}_0 de queda livre da Terra T no campo gravitacional do Sol S possui a mesma expressão da equação (3.10), ou seja,

$$a_0 = \frac{GM_{sol}}{R^2}, \quad (3.11)$$

mas neste caso M_{sol} é a massa do Sol e R é a distância Sol-Terra.

Ainda utilizando a figura 3.25 vamos verificar as forças de maré nos pontos ao redor da Terra T . No ponto A a força \mathbf{F}_{sol} não tem a mesma direção da pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a soma vetorial entre elas resulta na força de maré \mathbf{F}_A direcionada verticalmente para a Terra, de maneira que,

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_{sol} \text{sen}(\beta) \approx \mathbf{F}_{sol} \beta,$$

uma vez que $\beta = \frac{r}{R} \ll 1$ é o ângulo entre o corpo e o centro da Terra visto do Sol, fazendo com que seja válida a aproximação $\text{sen}(\beta) \approx \beta$. Como $F_{sol} = ma_0$, pela equação (3.11) tem-se para a magnitude de F_A ,

$$F_A = ma_0\beta = ma_0 \left(\frac{r}{R}\right) = \left(\frac{GmM_{sol}}{R^2}\right) \left(\frac{r}{R}\right) = \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3}\right) r. \quad (3.12)$$

A força de maré \mathbf{F}_B no ponto B tem a mesma magnitude de \mathbf{F}_A e também é direcionada verticalmente para a Terra. Nestes dois pontos A e B ao redor da Terra a força de maré é sempre vertical para baixo e o Sol está no horizonte, ou seja, $R \perp r$ como mostrado na figura 3.25 (BUTIKOV, 2002).

Quando o corpo se encontra no ponto Z , o Sol encontra-se no zênite². A distância do Sol ao corpo é menor do que a distância do Sol a Terra, de maneira que a força \mathbf{F}_{sol} é mais intensa do que a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e ambas apresentam a mesma direção. Por isso a força de maré \mathbf{F}_Z no ponto Z é vertical para cima em relação a Terra e direcionada para o Sol. Sua magnitude é dada por $F_Z = F_{sol} - F_{in}$, ou seja,

$$F_Z = G \frac{mM_{sol}}{(R-r)^2} - ma_0 = \frac{ma_0 R^2}{(R-r)^2} - ma_0 = ma_0 \left[\frac{R^2}{(R-r)^2} - 1 \right]. \quad (3.13)$$

em que utilizamos a equação (3.11). O primeiro termo entre parênteses pode ser escrito como:

$$\frac{R^2}{(R-r)^2} = \frac{R^2}{R^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2} = \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{R}\right)^2}.$$

Note que o mesmo é descrito como uma função do tipo $f(x) = \frac{1}{(1-x)^2}$, sendo $x = \frac{r}{R}$. Como

$\left|\frac{r}{R}\right| < 1$, esta função pode ser expressa como uma série de potências, em que:

² O zênite é o ponto da esfera celeste que se situa na vertical do observador, sobre a sua cabeça.

$$f(x) = \frac{1}{(1-x)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} nx^{n-1} = 1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + \dots .$$

Sendo $\frac{r}{R} \ll 1$ podemos desprezar os termos de ordem maior do que 2, nos fornecendo aproximadamente,

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{r}{R}\right)^2} \approx 1 + \frac{2r}{R} ,$$

de maneira que a equação (3.13) pode ser escrita como:

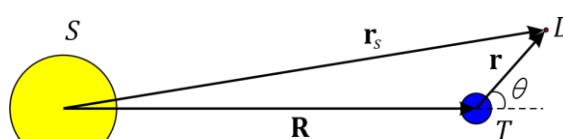
$$F_Z = ma_0 \left[\frac{R^2}{(R-r)^2} - 1 \right] \approx 2 \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r, \tag{3.14}$$

ou seja, $F_Z \approx 2F_A$, e portanto F_Z é aproximadamente o dobro da magnitude das forças de maré nos pontos A e B , uma vez que $F_A = F_B$.

No ponto N , a força de maré \mathbf{F}_N tem aproximadamente a mesma magnitude de \mathbf{F}_Z e é vertical para cima vista da Terra e do Sol e este se encontra no nadir³. Neste caso, a força \mathbf{F}_{sol} é menos intensa do que a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e apresenta a mesma direção. O raciocínio utilizado para as forças de maré induzidas pelo Sol na Terra são válidas também para as forças de maré induzidas pela Lua na Terra, bastando substituir M_{sol} pela massa da Lua e R pela distância Terra-Lua. O fator que realmente importa é a aceleração adquirida pela Terra devido a atração gravitacional do corpo celeste que causa as marés na Terra e não das velocidades orbitais de ambos os corpos acoplados gravitacionalmente. Como a Lua está mais perto da Terra, as forças geradoras de maré lunar são aproximadamente 2,2 vezes maior do que as solares (BUTIKOV, 2002).

Para obter uma expressão matemática geral para as forças geradoras de marés induzidas pelo Sol vamos considerar um ponto D arbitrário perto da Terra, como mostrado na figura 3.26. Continuaremos considerando a estrutura geocêntrica não inercial e não rotativa para analisarmos a força de maré \mathbf{F}_D sobre um corpo de massa m colocado neste ponto.

Figura 3.26 – Ilustração mostrando o Sol S , a Terra T e um ponto arbitrário D . O vetor \mathbf{r} é medido do centro da Terra até o ponto D , \mathbf{R} é o vetor do centro do Sol até o centro da Terra e $\mathbf{r}_s = \mathbf{R} + \mathbf{r}$ é o vetor medido do centro do Sol até o ponto D . O ângulo θ situa-se entre \mathbf{r} e a linha Sol-Terra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

³ O nadir é o ponto da esfera celeste diretamente oposto ao zênite, situado na vertical do observador sob seus pés.

A força de maré \mathbf{F}_D é o resultado da soma vetorial da força $\mathbf{F}_{sol} = G \frac{mM_{sol}}{r_s^2} (-\hat{\mathbf{r}}_s)$ com a pseudoforça $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_0 = -G \frac{mM_{sol}}{R^2} (-\hat{\mathbf{R}})$ no ponto D , sendo $\hat{\mathbf{r}}_s = \mathbf{r}_s/r_s$ e $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R}/R$ os versores das direções de \mathbf{r}_s e \mathbf{R} , respectivamente. Logo,

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_{sol} + \mathbf{F}_{in} = -GmM_{sol} \left(\frac{\mathbf{r}_s}{r_s^3} - \frac{\mathbf{R}}{R^3} \right). \quad (3.15)$$

Sendo $r \ll R$ podemos escrever,

$$r_s^2 = (\mathbf{R} + \mathbf{r})^2 = R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r}) + r^2 \approx R^2 \left[1 + 2 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (3.16)$$

Para encontrarmos uma expressão aproximada para $1/r_s^3$, elevamos ambos os lados da equação (3.16) por $(-3/2)$, o que nos fornece:

$$(r_s^2)^{-\frac{3}{2}} \approx (R^2)^{-\frac{3}{2}} \left[1 + 2 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]^{-\frac{3}{2}} \rightarrow \frac{1}{r_s^3} \approx \frac{1}{R^3} \left[\frac{R^2}{R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})} \right]^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{[R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})]^{\frac{3}{2}}}.$$

Essa expressão ainda pode ser escrita como,

$$\frac{1}{r_s^3} = \frac{1}{R^3 \left[1 + \frac{2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{1}{R^3} \left[1 - 3 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (3.17)$$

Esta última aproximação foi obtida pela expansão do termo $\left[1 + \frac{2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]^{-\frac{3}{2}}$ em uma série binomial $(1+x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} x^2 + \dots$, sendo $x = \frac{2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2}$ e $\alpha = -3/2$. Substituindo o resultado (3.17) em (3.15) e sendo $\mathbf{r}_s = \mathbf{R} + \mathbf{r}$ tem-se,

$$\mathbf{F}_D \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[(\mathbf{R} + \mathbf{r}) \left(1 - \frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right) - \mathbf{R} \right] \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[\mathbf{r} - 3\mathbf{R} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right],$$

em que desprezamos o termo $-3\mathbf{r} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2}$ uma vez que $r \ll R$. Dessa forma a expressão geral para a força de maré em um ponto arbitrário D próximo da Terra fica:

$$\mathbf{F}_D \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[\mathbf{r} - 3\mathbf{R} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (3.18)$$

Se esta expressão for realmente geral, precisamos obter a partir desta os resultados (3.12) e (3.14). Considerando os pontos A , B e Z , N da figura 3.25, tem-se que nos pontos A e B , \mathbf{r} é perpendicular a \mathbf{R} e, portanto, o produto escalar $\mathbf{R} \cdot \mathbf{r}$ é zero na expressão (3.18). Nesses dois pontos a força de maré é oposta a \mathbf{r} , ou seja, verticalmente para baixo e sua magnitude é igual a $\left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r$, como em (3.12). Nos pontos Z e N , a força de maré é dirigida ao longo de \mathbf{r} , isto é, verticalmente para cima e sua magnitude é dada por $2 \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r$, ou seja, o dobro da

força nos pontos A e B como mostrado em (3.14). Portanto, vemos que para os quatro pontos citados a expressão geral (3.18) está de acordo com os resultados obtidos anteriormente (BUTIKOV, 2002).

Para saber mais sobre as forças de maré induzidas pelo Sol e pela Lua e a influência do movimento de rotação da Terra nas mesmas recomendamos a leitura de Arons (1979), Butikov (2002) e Galili e Lehavi (2003).

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

“A Natureza usa o mínimo possível de tudo.”

Johannes Kepler

4.1 ENCENAÇÕES TEATRAIS ACERCA DOS MOVIMENTOS DO SOL, DA TERRA E DA LUA

Neste trabalho apresentamos a peça de teatro “Sistema Maluco” que são encenações teatrais acerca dos movimentos do Sol, da Terra e da Lua. Dentre as encenações, os estudantes representaram os movimentos de rotação e translação da Terra e da Lua, fizeram a Terra ser o centro do universo, para representar o sistema geocêntrico, e também o Sol ser o centro do universo para representar o sistema heliocêntrico. No decorrer das encenações eles entenderam que o Sol ocupa um dos focos da trajetória elíptica que a Terra descreve ao seu redor. Os alunos explicaram os pontos afélio e periélio, os solstícios e equinócios de inverno e verão. As encenações também foram conduzidas com a finalidade de responder perguntas como o porquê de não se ver o Sol e as estrelas ao mesmo tempo, o porquê de a Lua mostrar sempre a mesma face para a Terra, as fases da Lua, os eclipses solares e lunares e o porquê de não ocorrerem eclipses em todas as Luas novas e cheias. Tudo isso e muito mais fizeram um público bastante diversificado aplaudirem de pé a peça de teatro realizada pelos alunos em duas apresentações.

4.2 METODOLOGIA

A nossa peça de teatro, chamada de “Sistema Maluco”, foi realizada na feira de Ciências de uma escola particular do interior de São Paulo no dia 5 de outubro de 2019. Foram feitas duas apresentações: a primeira às 12 h e a segunda às 13h15, ambas com duração de 30 minutos. O panfleto de propaganda da peça está apresentado na figura 4.1.

Figura 4.1 – Panfleto mostrando o horário e o local da peça de teatro Sistema Maluco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios da peça foram realizados às quartas-feiras que antecederam o dia da apresentação, das 13h30 às 15h00 na própria escola, totalizando 9 ensaios e 2 espetáculos.

O teatro foi realizado através de peças de curta duração, comumente chamadas de esquetes. Para a apresentação do modelo cosmológico de Ptolomeu, em que o movimento dos corpos celestes é considerado em torno da Terra, o sistema heliocêntrico de Copérnico, em que é considerado o Sol como o centro do Universo com a Terra e os outros planetas se movendo em torno do mesmo, foram necessárias um total de 9 esquetes.

Nos ensaios nós desenhávamos no chão, com giz de cera, uma elipse para representar a eclíptica. Cada esquete foi ensaiado independentemente, sendo anunciada pelo apresentador antes dos estudantes-atores entrarem em cena. O estudante que representou o Sol entrava e se posicionava em um dos focos da elipse desenhada no chão, enquanto o estudante que representou a Terra, entrava sempre seguindo o traçado da elipse. O estudante que representou a Lua girava ao redor da Terra e o estudante que representou os planetas girava ao redor do Sol.

Apesar da pouca experiência com teatro do professor e dos alunos que estavam atuando na peça, foi possível realizar um bom trabalho. Os alunos interagiram com muita motivação, apresentando o tema através de uma linguagem corporal muito interessante e até improvisaram em suas falas, mas sem cometer erros conceituais em relação ao assunto que estava sendo abordado, ou seja, os alunos estavam aprendendo enquanto se divertiam.

A partir de gravações dos ensaios foram feitas algumas análises do empenho da equipe para a realização de melhorias na peça. As cenas foram melhoradas à medida que mais ensaios eram conduzidos. Foi possível perceber que temas da Física, como o considerado, podem ser abordados através do teatro de maneira bastante efetiva com participação e motivação até dos alunos que não estavam atuando.

Para explicar que a Terra aumentava de velocidade ao se aproximar do Sol e diminuía de velocidade ao se afastar dele, questão que o físico Kepler não conseguiu responder, usamos a gravitação de Newton, a qual diz que massa atrai massa através de uma força. A personagem Terra saía do ponto afélio, mais afastado do Sol, caminhando cada vez mais rápido em sua órbita elíptica à medida que chegava próximo ao Sol. Em seguida ela dava as mãos para ele e passava pelo ponto periélio, mais próximo do Sol, o mais rápido possível. Os estudantes ficaram tão empolgadas com esta cena que, durante o espetáculo, repetiram esta explicação duas vezes.

Outro momento interessante se deu quando entraram quatro alunos representando a Terra e um aluno o Sol na mesma cena. As Terras traziam um bastão na mão para representar a inclinação delas em relação ao eixo perpendicular à sua trajetória. Cada uma delas se posicionou em um ponto específico da elipse para representar os pontos de solstícios e equinócios. Enquanto a Terra protagonista explicava a inclinação e sua implicação na formação das estações do ano, as demais saíram de cena. Adicionalmente, a personagem Terra começou a andar sobre a elipse para explicar a duração dos dias e das noites. Nosso objetivo foi mostrar ao público como acontecimentos do nosso cotidiano, que a princípio não sabemos explicar mas que aceitamos como verdadeiros, passam a ter mais sentido com uma abordagem mais acessível ao público geral, como o teatro.

The Dark Side of the Moon (O lado escuro da Lua) é o oitavo álbum de estúdio da banda britânica de rock progressivo Pink Floyd. Nós escolhemos a música que dá o nome a este álbum para a cena a qual a personagem Lua fica girando em torno dela mesma e da Terra, mostrando sempre a mesma face para a Terra. No diálogo entre a Terra e a Lua foi explicado que o período de rotação e translação da Lua é coincidente e por isso que vemos sempre a mesma face da Lua, com a Lua tendo um lado escuro, ou seja, que não vemos.

Na cena em que explicamos as fases da Lua e as marés, foi um momento em que todas as personagens participaram. No início da cena o Sol, a Terra e a Lua nova se posicionam. A Lua nova, que sempre fica entre a Terra e o Sol, disse que era responsável, junto a eles, pelas maiores marés, chamadas marés de sizígia. Na sequência entra em cena a Lua cheia e se posiciona do lado oposto da Lua nova e também diz que junto com a Terra e o Sol são responsáveis pelas maiores marés. Por fim, entram a Lua crescente e depois a Lua minguante que dizem que junto à Terra e ao Sol são responsáveis pelas menores marés. Com esta cena representamos de maneira animada as figuras da Terra, do Sol e as fases da Lua que usualmente são apresentadas nos livros didáticos. Os Eclipses tiveram que ser bastante ensaiados, para representar os alinhamentos possíveis entre o Sol, a Terra e a Lua, os quais não ocorrem em todas as Luas cheias e novas. Nós preparamos uma espécie de colar de isopor (disco) que a personagem Terra usou para evidenciar a inclinação do plano orbital da Lua. A personagem Terra colocando o seu colar de isopor é apresentada na figura 4.2.

Figura 4.2 – Personagem Terra colocando seu colar de isopor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fizemos o eclipse solar quando a personagem Lua nova ficou alinhada entre o Sol e a Terra e depois o eclipse lunar, que ocorreu quando a Terra ficou alinhada entre o Sol e a Lua cheia. Nos ensaios os estudantes ficaram bastante surpresos em saber da inclinação do plano da Lua, pois não imaginavam que houvesse esta inclinação e que por isso não ocorria eclipses em toda Lua nova e cheia. Ao encenarem puderam entender com clareza o funcionamento dos eclipses.

Os próprios estudantes fizeram todo figurino e cenário. Foram usados tecidos das cores amarelo para o Sol, azul para a Terra, branca para as Luas e vermelho para os Planetas. O firmamento foi feito com uma cortina de elanquinha preta, bastante grande, na qual foram

coladas, com fita adesiva, estrelas de cartolina de diferentes cores. O plano orbital da Lua foi feito de isopor pintado com tinta de cor verde. A imagem da figura 4.3 mostra a estudante que representou a Lua nova pintando uma placa de isopor.

Figura 4.3 – Personagem Lua pintando uma parte do colar de isopor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nosso teatro ocorreu em uma feira de Ciência aberta para a comunidade. Além dos estudantes da escola, haviam estudantes de outras escolas, pais e responsáveis, autoridades escolares, entre outros. Isso nos permitiu alcançar um público bastante diversificado para mostrar que a Ciência, no caso a Astronomia, está totalmente ligada com o nosso dia a dia e que devido ao modo de viver de algumas pessoas, acaba passando despercebido. Com o teatro conseguimos apresentar os conceitos de Física propostos de uma maneira mais acessível para o público geral, contribuindo também para desmistificar e minimizar a má fama que esta disciplina transparece para muitas pessoas.

A seguir apresentamos fotos de alguns momentos da nossa peça de teatro.

4.3 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL: A PEÇA DE TEATRO

4.3.1 Esquete 1: Apresentando o “Sistema Maluco” e o Modelo Geocêntrico

No início da peça o narrador cumprimenta o público e apresenta o “Sistema Maluco”, Terra, Lua, Sol e os planetas do sistemas solar, tendo como primeira abordagem o modelo geocêntrico de Ptolomeu. As falas das personagens são apresentadas abaixo com fotos dos momentos em que alguns destas foram executadas.

Narrador: Bom dia senhoras e senhores, sejam todos muito bem vindos ao nosso teatro. Através de uma maneira lúdica iremos encantá-los com nossas encenações acerca da Física, em particular sobre tópicos de Astronomia. Gostaria de deixar claro a todos que nosso referencial é um observador no hemisfério sul da Terra. A observação do firmamento foi talvez a atividade mais prazerosa das civilizações de eras passadas. O primeiro sistema planetário foi o sistema geocêntrico proposto pelo astrônomo e geógrafo grego Cláudio Ptolomeu, que viveu no início da era cristã (século II).

Terra: (entra e se posiciona no centro do palco) Eu sou a Terra e ocupo o centro do Universo.

Lua: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou a Lua e giro em torno da Terra.

Sol: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou o Sol e giro em torno da Terra.

Planetas: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou os Planetas e giramos em torno da Terra.

Terra: (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas.

Saem do palco os Planetas, o Sol e a Lua nesta ordem, girando no sentido horário em torno da Terra e por último sai a Terra.

Na figura 4.4 apresentamos o narrador apresentando o início da peça ao público.

Figura 4.4 – Início da peça com o narrador cumprimentando o público e introduzindo o espetáculo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Esquete 2: O Modelo Heliocêntrico

Narrador: Depois de quatorze séculos, ou seja, século XVI o astrônomo e matemático polonês Nicolau Copérnico propôs o sistema heliocêntrico, ideia já proposta na Grécia antiga por Aristarco de Samos (século III a.C.), porém rejeitada por outros astrônomos gregos.

Sol: (entra e se posiciona no centro do palco) Eu sou o Sol e ocupo o centro do Universo.

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou a Terra e giro em torno do Sol.

Lua: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra, e esta gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou a Lua e giro em torno da Terra, que gira em torno do Sol.

Planetas: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou os Planetas e giramos em torno do Sol.

Sol: (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas. Veja figura 4.5.

Saem do palco os Planetas, a Lua e a Terra nesta ordem, girando no sentido horário em torno do Sol e por último sai o Sol.

Figura 4.5 – Sol: (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Esquete 3: A Órbita da Terra

Narrador: No século XVII, Johannes Kepler, astrônomo, astrólogo e matemático alemão analisando os dados compilados por Tycho Brahe, astrônomo dinamarquês, percebeu que as órbitas dos planetas em torno do Sol não eram circulares e o Sol não ocupava o centro do Universo.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica) Eu sou o Sol e ocupo um dos focos da eclíptica.

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Periélio) Eu sou a Terra e giro em torno do Sol descrevendo uma órbita elíptica.

Terra: Sol, você sabia que esta é a menor distância entre mim e você?

Sol: Não, como você sabe?

Terra: É simples, esta posição se chama Periélio. (Terra se move no sentido horário para o Afélio e pergunta para o Sol) E agora você sabe qual é esta posição?

Sol: O nome eu não sei, mas sei que é a maior distância entre mim e você.

Terra: Muito bem, esta posição se chama Afélio. Veja figura 4.6.

Figura 4.6 – Terra: Muito bem, esta posição se chama Afélio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Terra: (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Periélio e diz ao Sol) Sol, minha velocidade aqui é de 30,2 km/s.

Terra: (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Afélio e diz ao Sol) Agora estou com uma velocidade de 29,3 km/s.

Sol: Nossa! que loucura! Eu pensei que sua velocidade era constante e seu movimento uniforme.

Terra: Não, não, não, meu movimento é variado. Ao aproximar de ti, minha velocidade aumenta e ao afastar de ti, minha velocidade diminui.

Sol: (O Sol encabulado pergunta para a Terra) Mas por que que isso acontece?

Terra: Porque você me atrai e eu te atraio com uma força de mesma intensidade e sentidos opostos, chamada força gravitacional. (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol com os braços esticados em direção aos braços esticados do Sol, quando a Terra passar pelo Periélio estará de mãos dadas com o Sol e passará mais rápido). Veja figura 4.7.

Terra e Sol saem do palco.

Figura 4.7 – Terra: Porque você me atrai e eu te atraio com uma força de mesma intensidade e sentidos opostos, chamada força gravitacional. (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol com os braços esticados em direção aos braços esticados do Sol, quando a Terra passar pelo Periélio estará de mãos dadas com o Sol e passará mais rápido).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Esquete 4: Os Dias e as Noites

Narrador: Por que existem os dias e as noites? Por que não vemos as estrelas durante o dia? Questões interessantes, não é!?

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol e de si mesma).

Sol: Está louca, Terra!? Por que está girando?

Terra: Sol você sabe por que existem os dias e as noites?

Sol: Não, nunca pensei nisso!

Terra: Se você reparar sempre tem um lado meu que você está iluminando e outro não. O lado iluminado é o dia e o outro a noite.

Sol: E como isso acontece?

Terra: Enquanto eu giro em torno de você, giro em torno do meu próprio eixo. Este é chamado de movimento de rotação.

Sol: E qual é o período deste movimento?

Terra: O período é de 24 h, ou seja, tempo para eu te ver novamente.

Sol: Ah! Agora eu entendi! É o famoso dia solar. Mas espera aí! O que é mesmo um dia solar? E qual é a diferença do dia sideral?

Terra: O dia solar é em relação a você e o dia sideral em relação às estrelas do firmamento.

Sol: Terra, por gentileza, você pode encenar para eu entender melhor?

Terra: Sim, claro! Está vendo aquela estrela vermelha (aponta para a estrela), (A Terra gira entorno do seu próprio eixo) o tempo que eu demorar para vê-la novamente é a duração do dia sideral.

Sol: E qual é esta duração?

Terra: O dia sideral é de 23h56min4s, ou seja, é um pouco menor que o dia solar.

Terra: Sol, agora sou eu que tenho uma dúvida?

Sol: Fala, minha querida Terra!

Terra: Por que não vemos as estrelas do firmamento durante o dia?

Sol: Muito simples, sendo eu uma estrela tão bela, tão intensa e estando mais próxima de você do que das outras, meu brilho ofusca as demais estrelas.

Terra: Deixa me ver se eu entendi! (A Terra gira entorno do seu próprio eixo) Quando eu estou girando em torno do meu eixo, vejo você nascer, passo o dia contigo e depois você se põe e eu começo a enxergar as estrelas.

Sol: Isso mesmo, Terra, você é linda e muito inteligente. Vamos tomar um cafezinho? (Terra e Sol saem do palco).

4.3.5 Esquete 5: As Estações do Ano

Narrador: Em nosso país temos as quatro estações do ano bem definidas, mas o que define essas estações? Dia e noite sempre têm a mesma duração?

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica). Veja figura 4.8.

Figura 4.8 – Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Terras: (entram e se posicionam nos solstícios e equinócios. Cada uma das quatro Terras com um cabo de vassoura perpendicular a eclíptica e formando um ângulo de $23,5^\circ$ com este cabos). Veja figura 4.9.

Figura 4.9 – Terras: (entram e se posicionam nos solstícios e equinócios. Cada uma das quatro Terras com um cabo de vassoura perpendicular a eclíptica e formando um ângulo de $23,5^\circ$ com esses cabos).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sol: Por que vocês estão inclinadas?

Terra: Se eu não estivesse inclinada de $23,5^\circ$ em relação à vertical que passa pela minha órbita, não existiriam as estações do ano.

Sol: Nossa! Que máximo!

Terra: Não é!? Vou explicar. Nesta posição que me encontro é 21 de março.

Terra 1: Nesta posição em que me encontro é 22 de junho.

Terra 2: Nesta posição em que me encontro é 23 de setembro.

Terra 3: Nesta posição em que me encontro é 22 de dezembro.

Sol: Para, para, para tudo! Não estou entendendo mais nada, o que que tem a ver essas posições com as estações do ano?

Terra: Calma, relaxa, eu vou explicar!

Terra: (fala para o público) Pessoal vocês já sabem que eu sou inclinada, não vou ficar assim o tempo todo, ok!?! (Terras 1, 2 e 3 saem de cena).

Terra: Vamos lá, aqui em 21 de março ocorre o equinócio, o dia e a noite têm mesma duração, e é o início do outono.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de solstício de inverno) Aqui em 22 de junho ocorre o solstício de inverno, a noite é mais longa do que o dia, e é o início do inverno.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de equinócio) Aqui em 23 de setembro ocorre o equinócio, o dia e a noite têm mesma duração, e é o início da primavera.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de solstício de verão) Aqui em 22 de dezembro ocorre o solstício de verão, o dia é mais longo do que a noite, e é o início do verão.

Sol: (Sol bate palmas para a Terra) Você é o meu planeta favorito adoro te aquecer! Agora vem comigo, vamos passear pela nossa galáxia, a maravilhosa Via Láctea. Veja figura 4.10. Sol e Terra saem do palco.

Figura 4.10 – Sol: (Sol bate palmas para a Terra) Você é o meu planeta favorito adoro te aquecer! Agora vem comigo, vamos passear pela nossa galáxia, a maravilhosa Via Láctea. (Sol e Terra saem do palco)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.6 Esquete 6: O Lado Escuro da Lua

Narrador: *The Dark Side of the Moon* (O lado escuro da Lua) é o oitavo álbum de estúdio da banda britânica de rock progressivo Pink Floyd, lançado em 1 de março de 1973. Que conceito físico está implícito no nome desse álbum?

Terra: (entra e se posiciona no centro do palco)

Lua: (entra e gira no sentido horário em torno da Terra e dela mesma sempre mostrando a mesma face para a Terra). Veja figura 4.11.

Figura 4.11 – Lua: (entra e gira no sentido horário em torno da Terra e dela mesma sempre mostrando a mesma face para a Terra).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Terra: (faz cara de estranheza) Que bicho te mordeu!? Por que você não para de me olhar?

Lua: Não sei por que está me perguntando isso! Lembra de Theia? Aquele planeta com o tamanho aproximadamente igual ao de Marte, que chocou-se contra você e me afastou de ti. Desde então, giro em torno de ti.

Terra: Nossa! É verdade! Já faz tanto tempo que eu nem me lembrava.

Lua: Se não me falha a memória eu nasci 100 milhões de anos depois de seu nascimento. Lembrando que você nasceu aproximadamente a 4,6 bilhões de anos atrás.

Terra: Que memória de elefante, hein menina Lua! Veja figura 4.12.

Figura 4.12 – Terra: Que memória de elefante, hein menina Lua!

Fonte: Elaborado pelo autor.

Lua: Mamãe, eu não acredito que você nunca reparou que eu sempre mostro a mesma face para você.

Terra: Filhinha querida! Mamãe já está na meia idade, não me lembrava desse detalhe.

Lua: Tudo bem, mamãe, relaxa! Vou explicar para você: - o tempo que eu gasto para dar uma volta em torno de ti é o mesmo que eu gasto para dar uma volta em torno do meu próprio eixo.

Terra: Em outras palavras, os seus períodos de translação e rotação são coincidentes e têm duração de aproximadamente 28 dias.

Lua: (bate palmas) Isso mesmo, mamãe querida! Agora vamos aproveitar e ensinar tudo isso para o Sol.

Lua e Terra saem do palco dançando e cantando.

4.3.7 Esquete 7: As Fases da Lua e as Marés

Narrador: As fases da Lua referem-se à mudança aparente da porção visível iluminada do satélite devido a sua variação da posição em relação à Terra e ao Sol.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e se posiciona no Periélio)

Lua Nova: (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Nova e só apareço durante o dia, pois estou entre o Sol e a Terra. Sou responsável pelas maiores marés. Veja figura 4.13.

Figura 4.13 – Lua Nova: (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Nova e só apareço durante o dia, pois estou entre o Sol e a Terra. Sou responsável pelas maiores marés.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Lua Cheia: (entra e se posiciona em cima de um banquinho na órbita lunar, a Terra fica entre Lua Cheia e o Sol) Olá, muito prazer eu sou a Lua Cheia e clareio as noites escuras. E também sou responsável pelas maiores marés. Veja figura 4.14.

Figura 4.14 – Lua Cheia: (entra e se posiciona em cima de um banquinho na órbita lunar, a Terra fica entre Lua Cheia e o Sol) Olá, muito prazer eu sou a Lua Cheia e clareio as noites escuras. E também sou responsável pelas maiores marés.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sol: Muito bem! Eu gostaria de saber por que que vocês são responsáveis pelas maiores marés?

Lua Nova: Pense comigo, se eu me encontro entre você e a Terra, unimos nossas forças e o resultado são as maiores marés altas e as menores marés baixas. Essas marés são denominadas marés vivas ou de sizígia.

Sol: O que é Sizígia?

Lua Cheia: É uma palavra grega que significa ficar na mesma linha, ou seja, Sol, Terra e Lua alinhados.

Lua Cheia: Como estamos alinhados, eu e você Sol, unimos também nossas forças e o resultado são as marés de sizígia.

Sol: Interessante essa tal de Sizígia, hein!

Lua Crescente: (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à direção da reta que une o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Crescente e tenho a forma da letra C. Sou a melhor fase para ser observada e sou responsável pelas marés de quadratura. Veja figura 4.15.

Figura 4.15 – Lua Crescente: (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à direção da reta que une o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Crescente e tenho a forma da letra C. Sou a melhor fase para ser observada e sou responsável pelas marés de quadratura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Lua Minguante: (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à reta que une o Sol e a Terra, oposta a posição da Lua Crescente) Olá, muito prazer eu sou a Lua Minguante e tenho a forma da letra D. E também sou responsável pelas marés de quadratura.

Sol: Ok! Agora eu gostaria de saber o que são as marés de quadratura e por que vocês são responsáveis?

Lua Crescente: São as menores marés altas, que são um pouco maiores que as marés baixas, ou seja, pequena diferença entre elas.

Lua Minguante: E tem mais, devido ao fato de não estarmos alinhadas, não somamos forças, com isso resulta-se as marés mortas ou de quadratura.

Sol: Suspeitei desde o princípio!

Saem do palco girando em sentido horário a Lua Nova, a Lua Minguante, a Lua Cheia, a Lua Crescente, a Terra e o Sol, nesta ordem.

4.3.8 Esquete 8: Eclipse Lunar

Narrador: Eclipse é uma palavra do grego antigo que quer dizer deixar para trás. Os eclipses assombravam muitas pessoas no passado, por elas ignorarem suas causas. Hoje sabemos que os eclipses ocorrem quando Sol, Terra e Lua se alinham.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e se posiciona no Periélio).

Lua Nova: (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra).

Terra: (pergunta para o Sol) Sol, não deveria estar ocorrendo um eclipse solar?

Sol: É mesmo! Pois a Lua Nova está entre mim e você.

Lua Nova: (explica para o Sol e para a Terra) Pois bem, embora eu esteja entre vocês, não estamos alinhadas.

Sol: Como assim?

Lua Nova: Vou explicar, dei-me licença. (sai e volta com o colar de isopor) Na verdade o plano da minha órbita é inclinado de $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra. Veja figura 4.16.

Figura 4.16 – Lua Nova: Vou explicar, dei-me licença. (sai e volta com o colar de isopor) Na verdade o plano da minha órbita é inclinado de $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sol: Então quer dizer que não vão mais ocorrer eclipses?

Terra: Não é isso Sol! O que a Lua Nova quis dizer é que precisamos estar alinhadas para ocorrer o eclipse.

Lua Nova: Isso mesmo Terra!

Sol: E quando vamos estar alinhadas?

Terra gira no sentido horário, Lua Nova sai, entra Lua Crescente e depois sai, entra Lua Cheia e se alinha com o Sol e a Terra, veja figura 4.17.

Figura 4.17 – Terra gira no sentido horário, Lua Nova sai, entra Lua Crescente e depois sai, entra Lua Cheia e se alinha com o Sol e a Terra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Terra: Sol, sei que hoje eu, você e a Lua Cheia estamos alinhadas, mas não estou vendo a Lua Cheia. (Terra gira em torno do seu eixo no sentido horário procurando a Lua Cheia, veja figura 4.18.)

Figura 4.18 – **Terra:** Sol, sei que hoje eu, você e a Lua Cheia estamos alinhadas, mas não estou vendo a Lua Cheia. (Terra gira em torno do seu eixo no sentido horário procurando a Lua Cheia)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sol: É claro que não está vendo, ela está eclipsada! E tem mais, este eclipse é total para todo observador situado no seu lado não iluminado.

Terra: Entendi! Este é o eclipse lunar, agora só falta o eclipse solar.

Saem do palco a Lua Cheia, a Terra e o Sol.

4.3.9 Esquete 9: Eclipse Solar

Narrador: Devido à inclinação de $5,2^\circ$ da órbita da Lua em relação à órbita da Terra, os eclipses não ocorrem em todas as Luas Novas e Cheias.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra com o colar de isopor e se posiciona no Periélio).

Lua Nova: (entra e se posiciona próximo ao colar de isopor da Terra entre o Sol e a Terra). Veja figura 4.19.

Figura 4.19 – Lua Nova: (entra e se posiciona próximo ao colar de isopor da Terra entre o Sol e a Terra).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Terra: Nossa! Que máximo! O Sol sumiu totalmente, o dia virou noite e as galinhas foram para o galinheiro dormir.

Sol: Não sumi não! É a Lua Nova que está me escondendo, pois estamos alinhadas, eu, você e a Lua Nova.

Lua Nova: Acho que agora vocês entenderam o porquê dos eclipses não ocorrerem em todas as Luas Novas e Cheias.

Terra: Sim, minha filhinha! Agora está tudo esclarecido.

Sol: Que bom é estar, ficar e brincar com vocês, o universo é do tamanho do nosso conhecimento!

Saem do palco a Lua Nova, a Terra e o Sol.

Entram todos e agradecem.

O espetáculo é finalizado com o elenco agradecendo ao público dizendo: “*Obrigado por vocês existirem!!!*”, como mostrado na figura 4.20.

Figura 4.20 – Elenco agradecendo ao público logo após a finalização do espetáculo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma foto do professor que elaborou a peça, autor deste trabalho, junto com os estudantes-atores que atuaram diretamente na apresentação do espetáculo é apresentada na figura 4.21.

Figura 4.21 – Estudantes-Atores e Professor-Diretor após o espetáculo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 COLETA DE DADOS

A obtenção de dados ocorreu através do emprego de anotações em diário de campo, fornecendo dados qualitativos para a verificação da atividade. A coleta e análise dos dados, obtidos a partir dessas esquetes teatrais, apoiou-se nas ideias propostas por Godoy (1995), que descreve a pesquisa qualitativa em ambiente escolar e as relações pessoais como:

O ambiente é uma fonte direta dos dados e o pesquisador, como instrumento chave; possui caráter descritivo; o processo é o foco principal de abordagem e não o resultado ou o produto; a análise dos dados foi realizada de forma intuitiva e indutivamente pelo pesquisador; não requereu o uso de técnicas e métodos estatísticos; e, por fim, teve como preocupação maior a interpretação de fenômenos e a atribuição de resultados (GODOY, 1995, p. 58).

As observações comportamentais relacionadas aos alunos, durante a atividade, também foram registradas através de diário de campo pelo docente e receberam um complemento de análise sob a abordagem qualitativa conforme as recomendações discutidas por Bogdan e Biklen (2013). Para complementar o uso desta metodologia de coleta qualitativa de dados, seguimos as instruções recomendadas por Paiva Júnior, Leão e Mello (2011) para tais observações:

Na pesquisa qualitativa, os critérios de validade e de confiabilidade assumem aspectos particulares. Isso se deve a algumas de suas características. Uma delas diz respeito ao fato de que a pesquisa qualitativa é sempre, em alguma instância, de caráter interpretativo. Com isso, a subjetividade do pesquisador está presente em todo o desenvolvimento da pesquisa (PAIVA JÚNIOR; LEÃO e MELLO, 2011, p. 194).

Todas as observações e registros foram posteriormente analisados para expressar o comportamento e as implicações que a atividade apresentou aos alunos, suas evoluções em relação ao tema, interesse, descontração e a interdisciplinaridade com as artes.

4.4.1 Diário de Campo do Pesquisador

Para realização das encenações da peça trabalhamos com 5 alunos-atores, como descrito na seção 4.3. Contudo, não houve nenhum processo de seleção para escolha destes alunos. Todos os alunos de duas turmas do 1º ano da escola foram convidados para participarem da peça teatral. No primeiro encontro apareceram 15 alunos. Este foi realizado na própria escola,

no período contrário das aulas, tendo como foco o planejamento para a organização da peça teatral e como os alunos poderiam contribuir e participar da mesma. Como outros professores da escola estavam preparando os alunos para apresentações de trabalhos na feira de ciências, alguns alunos que apareceram no nosso primeiro encontro optaram por outras atividades.

O segundo encontro foi realizado para iniciar os ensaios da peça e para a escolha das personagens. Devido à necessidade de dedicação nos ensaios, de discussão e entendimento dos roteiros, alguns alunos desistiram, restando apenas os 5 alunos-atores que permitiram a realização deste trabalho.

À medida que avançamos nos ensaios outras esquetes iam sendo escritas. No início das atividades os alunos estavam bastante curiosos para saber como iriam representar os fenômenos físicos propostos. As dificuldades apareceram e sentimentos de raiva, medo, ansiedade e até autopiedade surgiram. Os erros e as repetições das cenas foram frequentes, mas foi possível notar a evolução dos alunos com relação ao tema e a forma de atuarem. O apresentador, por exemplo, que no início gaguejava durante a leitura começou a apresentar mais desenvoltura e segurança.

É importante salientar que o problema não era apenas atuar na peça, os alunos precisavam, simultaneamente, aprender os conceitos de Astronomia. O aprendizado e a motivação em explorar o tema cada vez mais surgiram através de muita diversão, brincadeiras e improvisações. Os estudantes estavam se tornando independentes, eles mesmos viam a necessidade de fazer melhor, expondo os conceitos de maneira correta com suas próprias palavras. Um dos estudantes-atores, que não gostava de Física e conseqüentemente, não conseguia tirar boas notas nesta disciplina, chegou a dizer que estava aprendendo e que gostaria de atuar em outros teatros para explorar outros conceitos e fenômenos físicos.

Nosso esforço foi direcionado para que não houvesse memorização dos conceitos durante as falas, mas sim o entendimento daquilo que estava sendo discutido. Isso ficou visível pelos improvisos e diferentes formas de descrever o mesmo fenômeno físico pelos estudantes. O movimento corporal dos alunos foi muito significativo, ajudando a transmitir para o público o assunto abordado nas cenas. Foi possível notar a partir disso, a importância da linguagem corporal na transmissão de conhecimentos e conceitos científicos.

Com o domínio do assunto e a frequência dos ensaios tivemos alguns problemas com relação à manter o grupo unido. Um dos alunos começou a querer controlar as atividades de maneira impositiva, trazendo certo desconforto para os outros integrantes da equipe. Ao perceber tal situação foi necessário intervir, conversando com este aluno para que o respeito e o trabalho em equipe fossem retomados.

Houve momentos de grande divergência entre as opiniões dos alunos sobre a atuação e a abordagem dos conceitos trabalhados, mas isso foi muito produtivo, pois foi possível trabalhar a argumentação científica, em que todos argumentaram e expressaram suas opiniões enquanto os outros ouviam. Esse procedimento permitiu que os problemas que surgiram fossem solucionados de maneira otimizada. À medida que os conceitos e a forma de encená-los na peça foram ficando mais claros, os alunos ficavam muito felizes, mais motivados e novas ideias iam surgindo para as cenas subsequentes.

Além de serem questionadores, curiosos, criativos, eles demonstraram muito talento com o trabalho manual e artístico ao desenharem e cortarem as estrelas de cartolina coloridas e construírem o colar de isopor, que representou o plano orbital da Lua. Este colar foi feito de placas retangulares de isopor pintadas com tinta verde. Apesar do auxílio profissional para cortar os isopores em formato circular, foram os alunos quem pintaram e colaram todas as placas.

No dia do primeiro espetáculo os alunos estavam com medo e esse sentimento ficou um pouco mais intenso quando o estudante-ator, citado anteriormente, que tentou controlar as atividades em alguns momentos, determinou que a apresentação seria feita com as luzes apagadas. Novamente foi necessário intervir e explicar que isso não poderia ser feito, pois seria difícil para o público visualizar as cenas e não daria para fazer a gravação do espetáculo. Para controlar o nervosismo dos alunos foi necessário muito diálogo e até alguns treinos de respiração para que a peça pudesse acontecer sem maiores problemas.

Não foi possível registrar o motivo ou mesmo descobrir a causa, mas no segundo espetáculo houve uma confusão entre dois estudantes-atores que iniciaram uma forte discussão minutos antes da apresentação. Neste episódio foi necessária uma intervenção mais enérgica por parte do professor para que os alunos se concentrassem e se preparassem imediatamente para o início da apresentação da peça. Isso mostra que, apesar da metodologia do teatro ter se mostrado eficiente para a abordagem, discussão e transmissão de conceitos científicos, o professor deve estar preparado para lidar com o emocional dos alunos, que pode ser um complicador para a execução das atividades.

Apesar das dificuldades, o uso do teatro para abordar conceitos de Física nos proporcionou uma oportunidade para trabalhar e até desenvolver o emocional dos estudantes, sua postura corporal, sua eloquência, a relação com o outro e consigo mesmo, sua lógica, sua racionalidade, de maneira que os conceitos de Astronomia pudessem ser discutidos significativamente de uma forma lúdica e divertida.

4.4 RELATOS DOS ESTUDANTES-ATORES SOBRE A PEÇA DE TEATRO

A seguir apresentamos os relatos de dois alunos, A1 e A2, que participaram como atores da peça de teatro com relação à algumas questões que fizemos para saber como foi o envolvimento dos mesmos com a metodologia, o tema proposto e a importância do trabalho em grupo. Não foi possível realizar tal discussão com todos os alunos-atores da peça devido às dificuldades e limitações impostas pela pandemia de COVID-19.

1. O que você achou do primeiro momento vivenciado em nosso teatro?

A1: *“Serviu para que minhas expectativas aumentassem. Um momento que deu início à uma ótima recordação.”*

A2: *“Eu achei uma experiência ótima em estar atuando e interpretando.”*

2. Qual a série que você está cursando? Qual sua data de nascimento?

A1: *“Primeiro ano do Ensino Médio. 25/07/2003.”*

A2: *“Primeiro ano do Ensino Médio. 30/01/2004.”*

3. Você tem alguma experiência com teatro? Quais? Onde?

A1: *“Sim. Fiz apenas dois meses com minha tia e poucas semanas na academia da Sol.”*

A2: *“Não. Foi minha primeira experiência.”*

4. Expresse em palavras o que você sentiu e pensou durante o desenvolvimento das atividades.

A1: *“Apesar do cansaço pela rotina corrida dos ensaios enredada dos estudos de manhã, me senti extremamente contente em saber que estávamos fazendo nossas ideias realmente valerem a pena.”*

A2: *“Eu sempre pensei que ia dar certo e que seria perfeito e divertido.”*

5. Como você pode utilizar sua voz e corpo para dinamizar suas encenações?

A1: *“Para transparecer dinâmica, precisamos colocar emoções em cada atos ou falas ditas. Caso contrário iríamos parecer robôs sem expressão. É preciso ter vontade.”*

A2: *“Fazendo gestos e me expressando melhor com o próximo.”*

6. Os conteúdos propostos para a escrita da peça teatral são de importância para o seu desenvolvimento cognitivo? Por quê?

A1: *“Além da expansão de conhecimento que adquirimos ao longo dos dias, pois será algo que não vamos esquecer facilmente, também aprendemos a conviver como uma equipe.”*

A2: *“Sim, pois me explicou como funciona o sistema solar, com as posições da lua e os outros.”*

7. Como as atividades realizadas tem ajudado em seu crescimento pessoal e coletivo?

A1: *“As atividades me mostraram que é preciso ter paciência e muito respeito ao próximo e as suas opiniões. Uma pessoa só não pode mudar o mundo, temos que fazer isso juntos.”*

A2: *“A interação com outras pessoas, e abranger o meu conhecimento.”*

8. Por que a concentração tem um papel fundamental no teatro? Como é possível desenvolvê-la?

A1: *“Sem a concentração nós ficamos desfocados e esquecemos as falas e até ações. Podemos desenvolvê-la por meio da leitura, exercícios de respiração.”*

A2: *“Para se acalmar para a hora da apresentação para não travar.”*

9. Qual o tipo de relacionamento que você acha que deve existir no teatro entre professor e alunos e entre os colegas? Por quê?

A1: *“Acho que um relacionamento entre amigos, de confiança, pois ambos devem se sentir seguros para encenar.”*

A2: *“Como colegas e amigos.”*

10. De qual esquete você mais gostou? Por quê?

A1: *“Da 7, pois todos participaram e foi gratificante ver todos em cena.”*

A2: *“Eu gostei de todas as esquetes, pois ficaram legais e divertido.”*

11. Você tem sugestões de outros teatros que poderiam ser relacionados com os conteúdos de Física abordados em sala de aula? Quais?

A1: *“Eu gostaria sim de outros teatros, um mostrando a lei de Newton ou os movimentos aprendidos em aula.”*

A2: *“Não sei qual outro teatro eu poderia sugerir.”*

12. Como você percebe a questão da afetividade no processo de ensino-aprendizagem?

A1: *“A vontade que o professor tem de nos fazer aprender, não somente decorar. É notável a preocupação com o aluno.”*

A2: *“Quando os alunos gostam do professor e ele é divertido que o ensino fica mais afetivo.”*

13. Quais são os pontos do teatro que você achou mais relevantes para a aprendizagem do tema proposto? Por quê?

A1: *“Acho que realmente a união, pois mostrou a mim que todos têm personalidades diferentes, mas podemos sim trabalhar como uma equipe.”*

A2: *“Eu acho que tudo serve como ajuda no aprendizado.”*

14. Você acredita que utilizando peças teatrais nas aulas de Física o aluno pode perceber com maior facilidade a utilização desta nas situações do dia a dia? Por quê?

A1: *“Sim, pois é mais fácil aprender participando de uma dinâmica.”*

A2: *“Eu acho que sim, ajuda a entender melhor a física.”*

15. Algumas escolas não utilizam atividades ligadas ao teatro. Qual o seu posicionamento sobre o assunto?

A1: *“Creio que elas deveriam dar mais espaço para atividades como o teatro, pois também é uma aprendizagem.”*

A2: *“O teatro para mim ajuda sim no aprendizado.”*

16. O teatro trabalha com o corpo e a expressão e exercita a mente. Como você acha que isso pode auxiliar nas aulas de Física?

A1: *“Aumenta nossa concentração e nos faz aprender com mais vontade e de forma mais dinâmica.”*

A2: *“Explicando os conceitos físicos com o teatro.”*

17. Em sua opinião, o professor que é “apaixonado” por sua profissão consegue desenvolver as aulas com maior facilidade e assim, ajudar o aluno em seu aprendizado? Por quê?

A1: *“Sim, pois dessa maneira ele vai conseguir chamar mais a atenção do aluno. ‘Se para ele é fácil, também pode ser pra mim’.”*

A2: *“Sim, o professor consegue ajudar o aluno a facilitar o ensino.”*

18. Quando você está motivado tem maior facilidade no processo de aprendizagem? Por quê?

A1: *“Sim, pois há mais vontade e encorajamento de aprender.”*

A2: *“Sim, eu tenho mais facilidade em aprender quando eu estou motivado.”*

19. Como foi sua experiência com a peça teatral “Sistema Maluco”?

A1: *“Foi uma experiência que vai ficar marcada em meu coração. Por todos os aplausos e elogios, gostaria de agradecer ao professor Ederaldo, que teve a determinação de nos fazer aprender.”*

A2: *“O teatro ‘Sistema Maluco’ foi incrível e muito divertido e que tenha muitos outros teatros nos próximos anos.”*

20. Uma mensagem final sobre o teatro.

A1: *“Apesar de não gostar muito da matéria em si, não tive experiências ruins, apenas adquiri mais vontade de estudar. Os encontros do teatro me ensinaram algumas virtudes, amor e respeito ao semelhante, paciência, concentração e empenho.”*

A2: *“Foi uma experiência muito boa.”*

Além do trabalho realizado com os alunos que participaram diretamente da peça de teatro, nós também pretendíamos abordar o assunto em sala de aula para verificar o efeito do trabalho nos estudantes que assistiram a peça. Para isso, preparamos um questionário,

apresentado no apêndice, sobre os assuntos tratados na peça. Infelizmente, com a impossibilidade de trabalharmos presencialmente com os alunos, devido à pandemia de COVID-19, logo após a apresentação dos espetáculos, não foi possível estabelecermos contato com os alunos para realizarmos tal análise.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

Nossa proposta consistiu na elaboração de uma peça de teatro que teve 9 encontros (ensaios) de 1h30 de duração cada, fora do horário de aula. Foram realizadas duas apresentações com duração de aproximadamente 30 minutos. A peça foi dividida em esquetes (peças de curta duração), as quais permitiram que o apresentador resumisse brevemente o assunto a ser encenado. Os dois espetáculos ocorreram na feira de Ciência de uma escola particular na cidade de Mogi Guaçu, no interior de São Paulo, com um público bastante diversificado. Entre as pessoas que estavam assistindo, encontravam-se alunos, professores, funcionários, pais, mantenedores e autoridades da cidade.

Apesar de ter sido um sucesso de público, de aprendizado emocional e de conceitos de Astronomia, de expressão corporal, de eloquência, de trabalho em equipe, de desenvolvimento em geral dos estudantes-atores, algumas melhorias são necessárias. Como a peça foi constituída de 9 esquetes e tivemos 9 ensaios, tendo realizado em torno de 1 ensaio para cada esquete, sugerimos ao professor que for aplicar a nossa proposta, que utilize mais encontros para ensaiar e discutir o tema, caso seja necessário. Devido ao tempo restrito que tivemos para ensaiar, os estudantes tiveram que internalizar muitos conceitos e treinar as cenas fora do horário dos ensaios. Contudo, os mesmos conseguiram compreender o assunto e as encenações. Foram os próprios estudantes-atores que prepararam o figurino e construíram todo o cenário. Apesar do trabalho adicional, isto favoreceu os alunos no engajamento da peça e na vivência antecipada com o cenário.

O fato de termos apresentado uma peça teatral dividida em 9 esquetes facilitou bastante o entendimento dos tópicos abordados para o público e também para os estudantes-atores. Estas constituíram peças de curta duração dentro da peça principal. A cada esquete uma nova surpresa surgia para aqueles que eram leigos no assunto e também para aqueles que de uma forma ou de outra tinham familiaridade com os conceitos de Astronomia. A performance dos estudantes-atores chamou muito a atenção do público. Foi possível notar nestes estudantes, após a realização do trabalho, maior autonomia e protagonismo, a vergonha e o medo foram substituídos por confiança e coragem. À medida que os esquetes eram ensaiados, era nítida a melhoria na compreensão dos fenômenos físicos encenados e na eloquência dos alunos. Houveram momentos em que os estudantes-atores explicavam de formas diferentes e corretas o mesmo fenômeno físico encenado. A razão, muitas vezes, era substituída pela emoção. Frequentemente repetíamos as cenas por diversos motivos e a raiva de ter errado, o nervosismo de não ter entendido e o medo de não conseguir, fazia com que parássemos para refletir na tentativa de controlar os sentimentos. Uma vez que a razão era retomada, prosseguíamos com o ensaio e no final, a raiva se transformava em amor, o nervosismo em satisfação de entender os conceitos de Astronomia e de explicá-los e o medo em fé. Infelizmente, com a pandemia de COVID-19, não foi possível acompanharmos a evolução dos alunos que não participaram do teatro com atividades em sala de aula. Contudo, sugerimos algumas atividades para isso no nosso produto educacional disponível no apêndice deste trabalho.

O Teatro possibilitou que os estudantes-atores se desenvolvessem globalmente, o senso crítico e criativo puderam ser explorados naturalmente e a expressão corporal facilitou bastante a compreensão dos conceitos de Astronomia. Eles puderam se conhecer melhor e aos outros, o trabalho em equipe permitiu a cooperação e o respeito mútuo. Foi possível observar superações com relação a timidez, introversão, nervosismos e medos durante todo o processo e o mais gratificante foi notar que os conceitos de Astronomia foram aprendidos e a Física desmistificada, de certa forma, passando a ser interessante e desejada por estes alunos. Um deles chegou a dizer: *“Eu não gostava de Física, achava chato e sem sentido, mas o teatro me mostrou que a Física tem seus encantos e seus propósitos.”*

Concepções errôneas a respeito dos conceitos de Astronomia foram substituídas por reflexões e explicações que convergiam para a comprovação científica atual dos conceitos em questão. A dialogicidade, problematização e cooperação permitiram que o ensino-aprendizagem pudesse ocorrer de uma maneira significativa, de modo que estes estudantes levarão esta experiência para toda a vida.

A Arte e a Ciência se complementaram de maneira bastante satisfatória com a aplicação da nossa proposta. Ao divulgarmos a Ciência através da Arte diminuimos a distância entre o público geral e o específico. Ao proporcionar esta união de saberes, a escola se torna um local em que o ambiente é socializado conscientemente e democraticamente por todas as pessoas envolvidas nesse trabalho. Os estudantes em geral têm uma maior liberdade de expressão, o professor passa a ser o mediador e os estudantes os protagonistas na construção do conhecimento.

Esperamos que nossa proposta de ensino de Física usando o teatro para introduzir a Astronomia no Ensino Médio possa inspirar outros professores a criar novas peças em outros temas das ciências, fazendo com que os estudantes sejam protagonistas no processo de ensino e aprendizagem, construindo o conhecimento de uma maneira lúdica e divertida.

REFERÊNCIAS

ARONS, A. B. Basic physics of the semidiurnal lunar tide. American Journal of Physics, v. 47, n. 11, p. 934-937, 1979.

BARTHES, R. O óbvio e o obtuso: ensaios críticos III. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1990.

BERTHOLD, M. História Mundial do Teatro. 4. ed. São Paulo: Perspectiva, 2010.

BOGDAN, R. e BIKLEN, S. Investigação qualitativa em educação. Porto: Porto Editora, 2013.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais: terceiro e quarto ciclos do ensino fundamental – Ciências da Natureza. Brasília: MEC/SEMTEC, 1998.

_____. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais + (PCN+) – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

_____. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Segunda versão. Brasília, MEC/CONSED/UNDIME, 2016. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/docman/maio-2016-pdf/40791-bncc-proposta-preliminar-segunda-versao-pdf/file>. Acesso em: 20 jan. 2021.

BRECHT, B. H. Estudos Sobre Teatro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1978.

BUTIKOV, E. I. A Dynamical Picture of the Oceanic Tides. American Journal of Physics, Petersburg, v. 70, n. 10, p. 1001-1011, oct. 2002.

CAMPANINI, B. D. e ROCHA, M. B. Ciência e Arte: contribuições do teatro científico para o ensino de ciências em atas do ENPEC. *In*: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. 11., 2017, Florianópolis. Anais [...], Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2017, p. 1-10.

CARVALHO, S. Um certo conceito de teatro. REVISTA USP, São Paulo, n. 49, p. 169-175, mar./maio, 2001.

CECATTO, J. R. O Sol. *In*: MILONE, A. C. *et al.* Introdução à Astronomia e Astrofísica. São José dos Campos: INPE, 2010. p. 4-9-41.

CHAISSON, E. e MCMILLAN, S. Charting the Heavens: The Foundations of Astronomy. *In*: CHAISSON, E. e MCMILLAN, S. Astronomy Today. 8th. ed. San Francisco: Pearson Education, 2013. p. 4-31.

_____. The Copernican Revolution: The Birth of Modern Science. *In*: CHAISSON, E. e MCMILLAN, S. Astronomy Today. 8th. ed. San Francisco: Pearson Education, 2013. p. 32-57.

_____. Earth: Our Home in Space. *In*: CHAISSON, E. e MCMILLAN, S. Astronomy Today. 8th. ed. San Francisco: Pearson Education, 2013. p. 160-187.

_____. The Moon and Mercury: Scorched and Battered Worlds. *In*: CHAISSON, E. e MCMILLAN, S. Astronomy Today. 8th. ed. San Francisco: Pearson Education, 2013. p. 188-215.

CIVITA, V. Teatro vivo: introdução e história. São Paulo: Abril Cultural, 1976.

DAMASIO, F. O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 3, p. 3602, 2011.

DOLCI, L. N. Teatro na Educação: Desenvolvendo no Aluno a Capacidade de Integração nos Grupos Sociais. Revista Electrónica Diálogos Educativos, ISSN 0718-1310, ano 4, n. 8, p. 68-90, 2004.

DRAGONI, M. Gravity in Earth's Interior. The Physics Teacher, v. 58, p. 97-100, January 2020.

FERREIRA, F. R. Ciência e arte: investigações sobre identidades, diferenças e diálogos. Educação e Pesquisa, v. 36, n. 1, p. 261-80, jan./abr. 2010.

GALILI and LEHAVI. The importance of weightlessness and tides in teaching gravitation. American Journal of Physics, v. 71, n. 11, 1127-1135, 2003.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de Administração de Empresas, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

GRÜTZMANN, T. P. A Formação dos Professores de Matemática por Meio dos Jogos Teatrais. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) – Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

IACHEL, G. e NARDI, R. Algumas Tendências das Publicações Relacionadas à Astronomia em Periódicos Brasileiros de Ensino de Física nas Últimas Décadas. Rev. Ensaio, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, p. 225-38, maio/ago. 2010.

JÚDICE, R. e DUTRA, G. Física e Teatro: Uma parceria que deu certo! Física na Escola, v. 2, n. 1, p. 7-9, 2001.

KISHIMOTO, T.M. O jogo e a Educação Infantil. São Paulo: Pioneira, 1994.

KOUDELA, I. D. Jogos teatrais. 4. ed. São Paulo: Perspectiva, 1998.

LAY, T. and WALLACE, T. C. Modern Global Seismology. Academic Press, London, 1995.

LIMA, L. G. e CORRALLO, M. V. Trinta Anos de Física Também é Cultura: Apresentação de Estratégias Didáticas para o Ensino da Interface Física-Literatura por Meio de Indicadores. *In*:

XXIII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, Salvador, 2019. Anais [...], Salvador: Ed. Universitária UFBA, 2019. p. 1-8.

MARTINS, R. A. Introdução: A História das Ciências e seus Usos na Educação. In: SILVA, C. C. S. (Org.). Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. xxi-v.

MATOS, C. (Org.). Ciência e arte: imaginário e descoberta. São Paulo: Terceira Margem, 2003.

MEDINA, M. e BRAGA, M. O Teatro como Ferramenta de Aprendizagem da Física e de Problematização da Natureza da Ciência. Cad. Bras. Ens. Fís., Florianópolis, v. 27, n. 2, p. 313-33, ago. 2010.

MELO, E. G. S. A Natureza da Ciência na Formação Inicial de Professores de Física: contribuições do teatro científico-experimental. 2016. Tese (Doutorado em Ensino das Ciências) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

MILONE, A. C. A. Astronomia no dia a dia. In: MILONE, A. C. *et al.* Introdução à Astronomia e Astrofísica. São José dos Campos: INPE, 2010. p. 5-55.

MOTZ, L. The Conservation Principles and Kepler's Laws of Planetary Motion. American Journal of Physics, New York, v. 43, n. 7, p. 575-578, jul. 1975.

OLIVEIRA, M. A.; ALBRECHT, E. Ensino de Astronomia e Formação em Astronomia, um recorte dos últimos três anos. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. 2017, Florianópolis. Anais [...], Florianópolis: Ed. Universitária UFSC, 2017. p. 1-9.

OLIVEIRA, N. R. A Presença do Teatro no Ensino de Física. 2004. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PAIVA JÚNIOR, F. G.; LEÃO, A. L. M. S. e MELLO, S. C. B. Validade e confiabilidade na pesquisa qualitativa em administração. Revista de Ciências da Administração, v. 13, n. 31, 190-209, 2011.

REIS, J. C.; GUERRA, A. e BRAGA, M. Física e Arte: A Construção do Mundo com Tintas, Palavras e Equações. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 57 n. 3, p. 29-32, jul./set. 2005.

RODRIGUES, C. V. O Sistema Solar. In: MILONE, A. C. *et al.* Introdução à Astronomia e Astrofísica. São José dos Campos: INPE, 2010. p. 3-5-44.

ROQUE, N. F. Química por Meio do Teatro. Química Nova na Escola, n. 25, p. 27-29, maio, 2007.

ROSA, C. T. W.; PÉREZ, C. A. S. e DRUM, C. Ensino de Física nas séries iniciais: concepções da prática docente. Revista Investigações em Ensino de Ciências, v. 12, n. 3, p. 357-68, 2007.

SILVEIRA, J. R. A. Arte e Ciência: uma reconexão entre as áreas. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 70, n. 2, p. 24-25, abr./jun. 2018.

SNYDER, R. Two-density model of the Earth. American Journal of Physics v. 54, p. 511–513, June 1986.

SPOLIN, V. Improvisação para o teatro. 4. ed. São Paulo: Perspectiva, 2005.

_____. O jogo teatral no livro do diretor. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 2004.

TIPLER, P. A. e MOSCA, G. Gravitação. *In*: TIPLER, P. A. e MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. p. 373-404.

TONIATO, J. D. De Newton a Einstein: A Geometrização da Gravitação. Cadernos de Astronomia, Espírito Santo, v. 1, n. 1, p. 17-29, jul. 2020.

ZANETIC, J. Física Também é Cultura. 1989. 252 f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

_____. Física e Cultura. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 57 n. 3, p. 21-24, jul./set. 2005.

_____. Física e Literatura: Construindo uma Ponte entre as Duas Culturas. História, Ciências, Saúde – Manguinhos, Rio de Janeiro, v. 13 (suplemento), p. 55-70, out. 2006.

_____. Física e Arte: uma ponte entre duas culturas. Pro-Posições, v. 17, n. 1 (49), p. 39-57, jan./abr. 2006.

Apêndice

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufisoc** Sorocaba



PEÇA TEATRAL PARA INTRODUÇÃO DE CONCEITOS DE ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO



Figura disponível em: <https://outschool.com/classes/draw-and-understand-the-solar-systems-UHPwCU35>

E. B. Macedo Junior, E. Benedetti Filho e J. A. Souza

Sorocaba – SP
Agosto de 2021

PREFÁCIO

A peça teatral descrita neste produto educacional foi elaborada para que professores(as) do ensino médio que lecionam a disciplina de Física, possam de uma maneira lúdica e divertida introduzir o estudo da Astronomia utilizando o teatro como metodologia de ensino. A Física é uma ciência natural baseada em experimentos, medidas e análises matemáticas, cujo propósito é encontrar leis físicas quantitativas capazes de descrever fenômenos e o comportamento de sistemas pertencentes aos microcosmos e aos macrocosmos. Muitos estudantes questionam o porquê de se aprender Física, tentando entender como irão usar a mesma em suas vidas ou cotidianos. O Ensino de Física na maioria das escolas, devido aos vestibulares e ao exame nacional do ensino médio, muitas vezes reduz a Física à resolução de exercícios, aplicação de fórmulas e pouco se aprende a pensar sobre os fenômenos da natureza, que nos cercam e nos acompanham todos os dias por toda a nossa vida.

Os movimentos do Sol, da Terra e da Lua são apresentados neste material de uma forma que o professor e os estudantes possam, através do diálogo, da discussão e da encenação, internalizá-los. Os fenômenos naturais, tão comuns a todos nós e que muitas vezes são tidos como misteriosos por não conhecermos o seu funcionamento, podem ser estudados e aprendidos usando o teatro como metodologia de ensino-aprendizagem. Os sistemas geocêntrico e heliocêntrico são abordados logo no início da peça teatral. Os três astros, os quais nos referimos neste trabalho, são apresentados com todas as especificidades que precisamos para entendermos os fenômenos como estações do ano e suas causas, os eclipses, as marés, entre outros. Descrevemos também as leis de Kepler e a lei universal da gravitação de Newton. Além da peça teatral, sugerimos um questionário para o(a) professor(a) trabalhar em sala de aula com toda a turma, considerando os alunos que participaram diretamente da peça como estudantes-atores e também aqueles que apenas assistiram a peça. Todos os tópicos e sugestões foram desenvolvidos de uma maneira simples e em uma linguagem acessível para o(a) professor(a) do ensino médio.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
bueno.ederaldo@gmail.com

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da
Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, agosto de 2021.

SUMÁRIO

A.1 O TEATRO COMO METODOLOGIA DE ENSINO	86
A.2 CONTEÚDOS DE FÍSICA	87
A.2.1 Introduzindo a Astronomia	87
A.2.2 Sistemas Geocêntrico e Heliocêntrico	87
A.2.3 Sol, Terra e Lua	90
A.2.4 Dias, Noites e Estações do Ano	98
A.2.5 Eclipses Lunares e Solares	100
A.2.6 Leis de Kepler	104
A.2.7 Lei da Gravitação Universal de Newton.....	109
A.2.8 Marés	113
A.3 A PEÇA DE TEATRO: “SISTEMA MALUCO”	118
A.3.1 Sobre os Ensaios da Peça e a Escolha do Figurino	119
A.3.2 Luz, Física, Ação: Esquetes da Peça Tetral.....	120
A.4 QUESTIONÁRIO SUGESTIVO	128

A.1 O TEATRO COMO METODOLOGIA DE ENSINO

Neste produto educacional utilizamos o teatro como metodologia de ensino para introduzir conceitos de astronomia nas aulas de Física do ensino médio. A peça teatral elaborada é intitulada “Sistema Maluco” e foi inspirada no Teatrinho do Sistema Sol-Terra-Lua do Professor Roberto Boczko do Departamento de Astronomia da Universidade de São Paulo (IAG-USP).

A escolha de usar o teatro como metodologia foi devido à possibilidade dos estudantes poderem interagir entre si, além de poderem adquirir uma apropriação cognitiva do conteúdo da peça teatral. O teatro pode ser explorado na escola para vincular a arte de tornar uma história visualmente verdadeira com as aulas de Física. Neste caso o enredo é descrito pelos conteúdos de Física e a história da ciência e os atores, que falam e atuam no palco, são os alunos e o professor. Este método também pode estimular o desenvolvimento de habilidades e competências dos alunos, como a comunicação através da oratória, a expressão e consciência corporais, a organização do pensamento e a empatia, as quais muitas vezes, são desconhecidas por eles. Quando o estudante reflete, expressa e comunica o que está fazendo, fica evidente que ele está envolvido e construindo seu conhecimento de uma maneira lúdica, prazerosa e divertida (OLIVEIRA, 2004).

O uso do teatro para introdução da Astronomia no Ensino Médio pode ser explorado diretamente com o conteúdo apresentado no caderno de Física do estado de São Paulo, no tema Astronomia, com o título “*Universo, Terra e Vida*” (BRASIL, 2002). Nossa proposta também está de acordo com o que é estabelecido pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

No Ensino Médio, o fazer teatral se constitui pela intensa troca de experiências entre os educandos, aprimorando a percepção estética, a imaginação, a consciência corporal, a intuição, a memória, a reflexão e a emoção. Possibilita o desenvolvimento integral dos estudantes, tanto do ponto de vista cognitivo quanto estético, afetivo, político, cultural e social, propiciando um espaço singular para a interdisciplinaridade com outros componentes e áreas do currículo. Este componente articula manifestações culturais em tempos e espaços diversos, incluindo o entorno artístico do educando e as produções artísticas e culturais que lhe são contemporâneas. (BRASIL, 2016, p. 522).

Além dos aspectos históricos sobre a astronomia é possível trabalhar inúmeros conteúdos de Física com a nossa peça teatral “Sistema Maluco”, como sistema geocêntrico e heliocêntrico, características do Sol, da Terra e da Lua, como são estabelecidos os dias e as noites, estações do ano, eclipses lunares e solares, leis de Kepler e a lei da gravitação universal

de Newton, a formação das marés, entre outros. Na próxima seção exploramos de maneira sugestiva tais tópicos em uma linguagem acessível para o(a) professor(a) do ensino médio.

A.2 CONTEÚDOS DE FÍSICA

O tema central da peça “Sistema Maluco” aborda os três astros, Sol, Terra e Lua, suas características, movimentos, interações e a influência destes no nosso cotidiano. Estes astros são os principais personagens da peça, sendo representados pelos estudantes-atores. Nas encenações os conceitos físicos são apresentados através de narração, diálogos entre as personagens e movimentos.

A.2.1 Introduzindo a Astronomia

A Astronomia é uma das ciências mais antigas da humanidade. A observação do firmamento teve sua origem na pré-história há cerca de 100 mil anos atrás, quando o ser humano vivia em pequenos grupos nômades. Durante o dia o Sol era contemplado e a noite milhares de outras estrelas eram observadas no firmamento. A Lua, principalmente na fase cheia, clareava as noites escuras. Por eles não compreenderem direito os astros, animais, montanhas, florestas, desertos e a água, esses eram tidos como divindades. Por volta de 3500 a.C. começou-se a desenvolver a escrita e posteriormente a matemática. Isso foi essencial para o desenvolvimento da cultura e da ciência (MILONE, 2010).

A Astronomia, por ser uma das ciências mais antigas da humanidade vem sendo utilizada por milhares de anos em todas as culturas, seja para entender os fenômenos que ocorrem na natureza, como forma de medir o tempo, determinar as estações do ano, os dias, as horas, as marés, como meio de se localizar geograficamente, utilizada como instrumento de navegação, entre outras tantas formas de utilização (OLIVEIRA e ALBRECHT, 2017, p. 2).

A.2.2 Sistemas Geocêntrico e Heliocêntrico

A intuição básica do ser humano é que o Sol, a Lua e os planetas giram ao redor da Terra (de leste para oeste) em períodos distintos, pois é o que vemos, com a Terra localizada fixa no centro do Universo. Daí a origem do modelo geocêntrico (Terra no centro). O modelo

que colocava a Terra imóvel no centro foi superado por outro que explicava melhor o movimento dos planetas. Neste outro modelo o Sol era considerado imóvel e posicionado no centro do sistema, com a Terra, a Lua e os planetas girando ao seu redor, sendo por isso chamado de modelo heliocêntrico (MILONE, 2010).

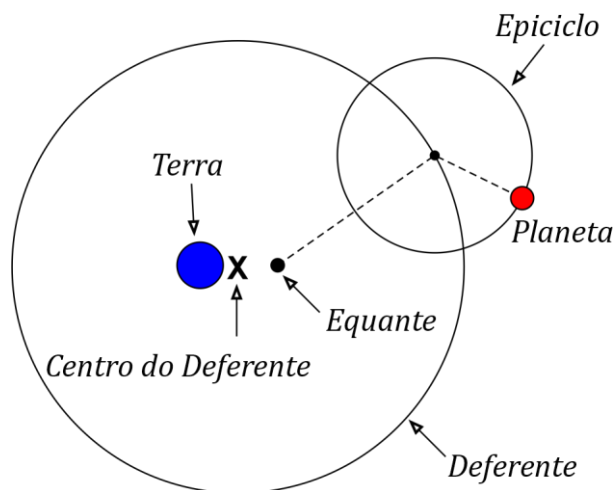
Platão (século IV a.C.) acreditava que os movimentos dos astros ao redor da Terra eram circulares e com velocidades constantes. Ele havia adotado as ideias da perfeição e regularidade de Pitágoras de Samos (século V a.C.). Aristóteles (século IV a.C.), que era discípulo de Platão, transformou essas ideias em dogmas astronômicos que perduraram por mais de 2000 anos. Claudio Ptolomeu (90-168 d.C.) escreveu *Almagest* (O majestoso) que veio para explicar os movimentos errantes dos planetas no modelo geocêntrico. Para isso os astrônomos gregos usaram artifícios como o excêntrico, os epiciclos e o equante, este último introduzido por Ptolomeu (DAMASIO, 2011). Na figura A.1 apresentamos o excêntrico, o epiciclo e o equante.

É importante ressaltar que não podemos chamar esse modelo de geocêntrico, visto que a Terra não está mais no centro do sistema. Esse modelo é chamado de geostático e perdurou do século II até o século XVI, quando foi contestado por Nicolau Copérnico (1473-1543). O que o incomodava era a afirmação de que os movimentos não eram mais uniformes em torno do centro, ou seja, a ideia de equante violava os ensinamentos gregos. O modelo de Copérnico já havia sido sugerido antes por Aristarco de Samos (c. 310 – c. 250 a.C.) que era a hipótese do modelo heliocêntrico para o Universo, conforme ilustrado na figura A.2. Naquela época as pessoas acreditavam que a Terra ocupava a posição central do Universo, porém os movimentos progressivos e retrógrados dos planetas eram explicados de uma maneira muito confusa por este modelo. Foi tentando equacionar esse problema que Copérnico sugere que o Sol deveria estar no centro em vez da Terra. Apesar de criticar o modelo de Aristóteles, Copérnico não dispensava muitas de suas concepções (DAMASIO, 2011).

Por volta de 1519 Copérnico escreveu um ensaio denominado *Commentariolus*, no qual revela que apesar dos dados numéricos de Ptolomeu serem consistentes, os movimentos dos planetas não poderiam ser não uniformes. Os movimentos retrógrados deveriam ser reduzidos a outros movimentos que fossem círculos centrados com velocidade angular constante em torno do centro, e o equante de Ptolomeu violava essa condição. A solução dada para o movimento errante dos planetas foi considerar o Sol fixo e imóvel e, em relação a um ponto central distante de três diâmetros solares dele, os planetas Mercúrio, Vênus, Terra (esta gira em torno de seu próprio eixo e a Lua gira ao seu redor), Marte, Jupiter e Saturno girando em trajetórias circulares. Quanto mais afastado o planeta estiver do Sol maior será seu período de translação.

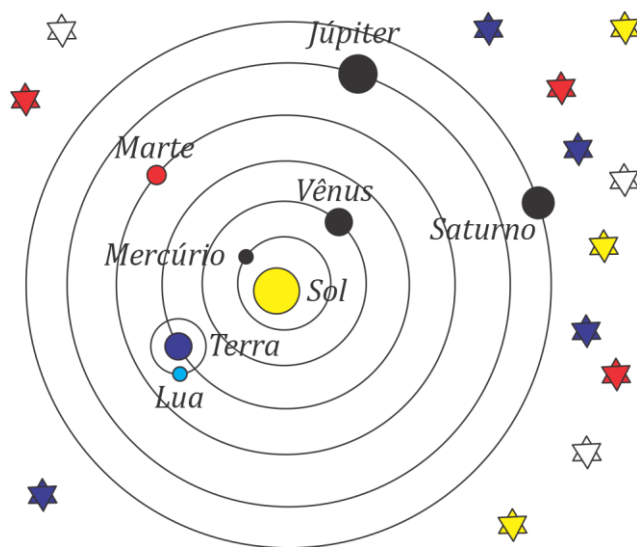
Esse modelo é chamado de heliostático, pois o Sol não é o centro das circunferências descritas pelos planetas (DAMASIO, 2011).

Figura A.1 – Excêntrico é o ponto central do Deferente; Epiciclo é a trajetória do planeta e Equante é o centro do movimento de translação do Epiciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.2 – Modelo Cosmológico de Copérnico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.2.3 Sol, Terra e Lua

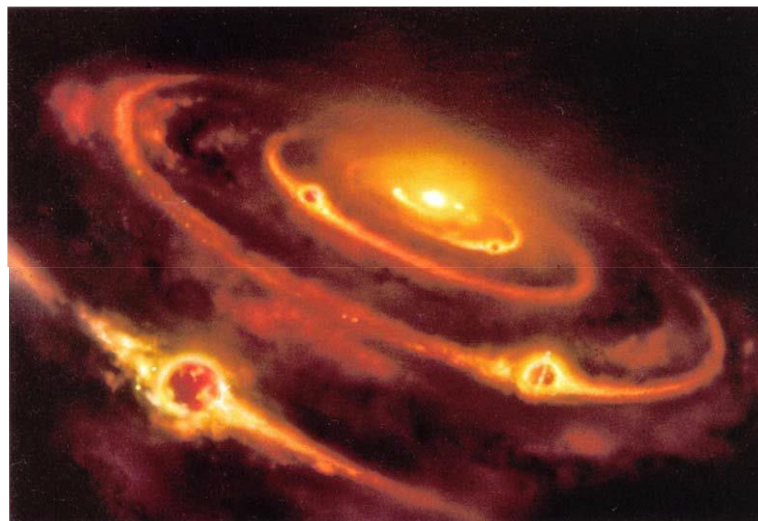
O Sol, a Terra e a Lua são os astros mais importantes para nós no sistema solar. A Terra é nosso planeta (nossa casa), a Lua nosso satélite e o Sol nossa estrela. O Sol e a Lua são essenciais para a existência de vida na Terra. O Sol nos fornece energia e junto com a Lua, regulariza diversos fenômenos que ocorrem no planeta, como as marés. O Sol era adorado por culturas antigas como sendo um deus. Os gregos o chamavam de Helios, os persas de Mitras e os egípcios de Rá. Anaxágoras (século V a.C.) acreditava que o Sol era uma bola de fogo, o que intuitivamente faz bastante sentido. Nós aprendemos a admirar sua imponência no céu diurno, igual fazemos com a Lua no céu noturno. O Sol é a estrela mais próxima da Terra, sua luz demora aproximadamente 8 minutos para chegar até nós. A outra estrela mais próxima de nós é alfa do Centauro e sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós, lembrando que a velocidade da luz no vácuo é a maior possível no nosso Universo. O centro geométrico e gravitacional do sistema solar é ocupado pelo Sol, que translada em torno do centro da galáxia e possui uma rotação diferencial, ou seja, nas regiões polares o período de rotação é maior do que nas regiões equatoriais. Em outras palavras, o período de rotação depende da latitude. O período médio de rotação é de 27 dias, possui rotação diferencial de aproximadamente 25 dias no Equador e cerca de 30 dias nas proximidades dos polos (CECATTO, 2010).

O nascimento de estrelas, como Sol, e de sistemas maiores, como o sistema solar, se dá através de nuvens de gás densas e gigantesas, compostas de Hidrogênio e Hélio. No caso de formação de uma estrela, por exemplo, nas regiões de maior concentração dos gases a força gravitacional é maior. Isso faz com que esta massa gasosa se contraia, aumentando consideravelmente a pressão na mesma e conseqüentemente sua temperatura, podendo acarretar na queima do hidrogênio, fusão nuclear, formando a estrela. Se não houver massa suficiente neste processo, o objeto irá se resfriar e planetas poderão ser formados. O Sol e os objetos celestes que compõem o sistema solar se formaram há aproximadamente 4,5 bilhões de anos (CECATTO, 2010). A figura A.3 apresenta uma ilustração da formação do Sol e do sistema solar.

De toda energia utilizada aqui na Terra, 99,98% é proveniente do Sol. A massa solar é muito grande e devido à força gravitacional ela se contrai. A densidade, a pressão e a temperatura são muito altas no centro do Sol (o gás se encontra no estado ionizado – plasma), possibilitando reações de fusão nuclear onde hidrogênios se fundem formando hélio e liberando muita energia. O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do Universo e está presente

em 73% da massa solar. A temperatura no núcleo solar atinge 15 milhões de graus centígrados e na superfície a temperatura é de cerca de 5.500 graus centígrados (RODRIGUES, 2010).

Figura A.3 – Concepção artística mostrando a formação do Sol e do sistema solar. A região mais clara corresponde à estrela em torno da qual estão orbitando alguns planetas do sistema solar em formação.



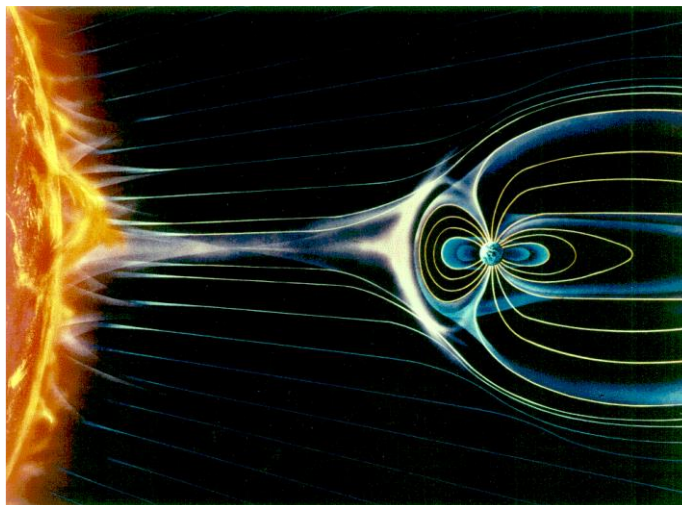
Fonte: (LANG, 2001 *apud* CECATTO, 2010, p. 4-11).

Outro fenômeno interessante são os ventos solares, um fluxo de elétrons e íons positivos que escapam do Sol para o espaço através de linhas “abertas” de seu campo magnético e eventualmente viajam até a Terra. Estas partículas interagem com os gases da alta atmosfera e o campo magnético terrestre as desvia para os polos formando as auroras (CECATTO, 2010). O vento solar causa uma deformação na direção da linha Sol-Terra quando interage com o campo magnético terrestre. Veja ilustração na figura A.4.

Na figura A.5 (a) e (b) estão representadas as auroras que ocorrem do encontro do vento solar com os gases da atmosfera da Terra. As moléculas da atmosfera ficam excitadas após a colisão com as partículas carregadas do vento solar e emitem luz ao voltarem para os seus estados fundamentais. As cores que vemos nas auroras dependem dos níveis de energia que cada tipo de átomo ou molécula atinge ao ser excitado, fazendo com que fótons de diferentes energias sejam emitidos ao voltar para os seus respectivos estados fundamentais (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A Terra na mitologia grega é conhecida como a deusa Gaia e na mitologia romana a deusa Terra, esposa do Céu (RODRIGUES, 2010).

Figura A.4 – Vento solar e sua interação com o campo magnético terrestre. A ação do vento solar pressiona o campo magnético terrestre em direção ao espaço exterior.



Fonte: (CECATTO, 2010, p. 4-35).

Figura A.5 – (a) Aurora colorida formada no céu, parecendo enormes cortinas sopradas pelo vento brilhando no escuro. (b) Aurora bem acima da Terra, fotografada de um ônibus espacial (visível à esquerda).



Fonte: (CHAISSON e MCMILLAN, 2013, p. 182).

Esta imagem remete a um sistema dinâmico em constante mudança, em que os elementos envolvidos são o ar, a água, a terra e a própria vida em nosso planeta. Muitos livros de Astronomia apresentam o estudo da Terra através da geologia.

Da mesma maneira que as rochas, árvores e o ar, nós somos “materiais da terra”. Na figura A.6 apresentamos uma foto da Terra construída a partir de várias imagens coletadas pela sonda Clementine.

Figura A.6 – Mosaico de imagens do planeta Terra obtidas com a sonda Clementine (NSSDC).



Fonte: (RODRIGUES, 2010, p. 3-25).

O conhecimento sobre o nosso planeta pode facilitar o entendimento de outros planetas e da Lua. A Terra possui um formato quase esférico. Sua massa e o seu raio são iguais a aproximadamente 6×10^{24} kg e 6.400 km, respectivamente. Grande parte da superfície da Terra é formada por água, que possui densidade de 1.000 kg/m^3 , e a parte da superfície que é formada por rocha tem densidade que varia de 2.000 kg/m^3 a 4.000 kg/m^3 . Abaixo da superfície o material é ainda mais denso (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A vida na Terra só é possível devido à sua temperatura que permite termos água no estado líquido. Três quartos da superfície terrestre é coberta por água e sua atmosfera é composta por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases como dióxido de carbono, argônio, vapor de água, etc. O efeito estufa é muito importante para a existência de vida na Terra. Ao penetrar na atmosfera terrestre a radiação infravermelha do espectro da luz solar é absorvida principalmente por vapor de água e dióxido de carbono, de maneira que esta energia fica retida entre a atmosfera e a superfície. Com isso, a atmosfera próxima da superfície terrestre fica aquecida viabilizando a existência de inúmeras formas de vida, como a nossa (RODRIGUES, 2010).

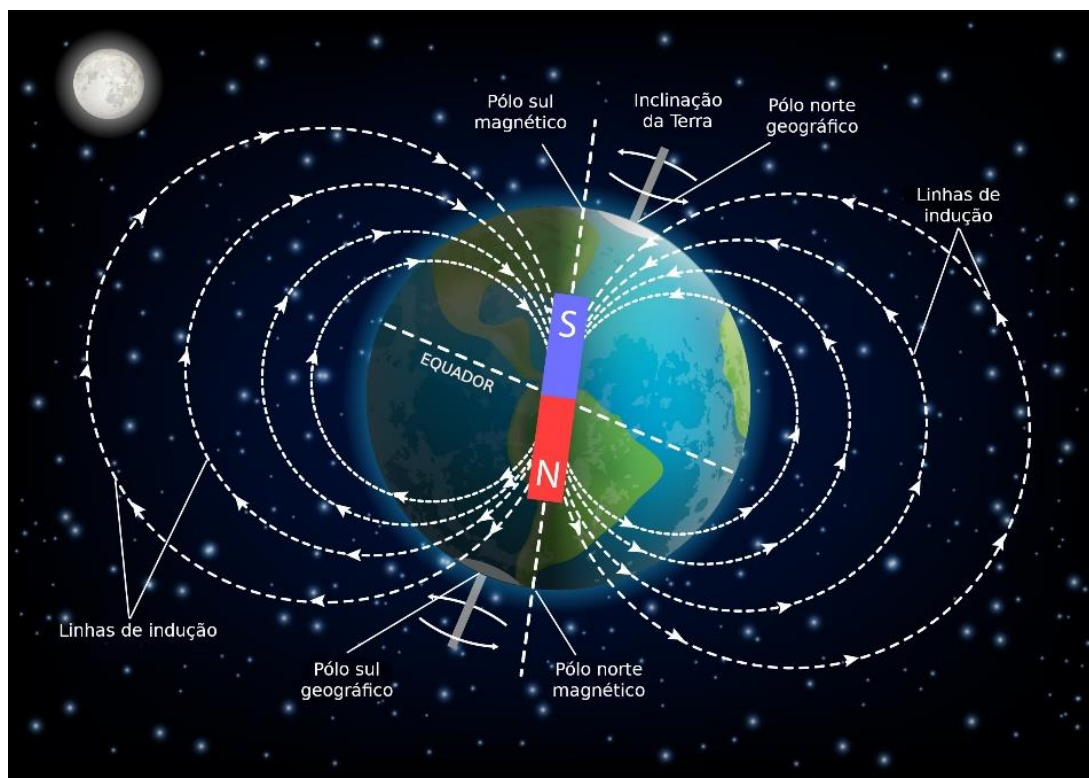
Na atmosfera, a cerca de 25 km de altitude, está a camada de ozônio (O_3). A radiação solar ultravioleta é absorvida pelo ozônio e nitrogênio atmosféricos, esta quebra o O_3 , formando a molécula de oxigênio (O_2). A camada de O_3 protege a vida na Terra da maioria da radiação ultravioleta proveniente do Sol. Alguns gases originados de atividades humanas, como o grupo dos clorofluorcarbonos (CFC), foram por muito tempo utilizados como propelentes em latas de

aerossol, solventes na lavagem a seco, produtos de refrigerantes, condicionadores de ar e refrigeradores, causando danos à camada de ozônio. O CFC, quando na estratosfera, é quebrado pela absorção de energia solar liberando cloro (Cl). Este reage com o ozônio, transformando-o em O_2 . Este fenômeno foi descoberto na década de 1970. Até então achava-se que os CFCs eram rapidamente quebrados após o uso. O cloro funciona como se fosse um catalizador, não é consumido na reação, fazendo com que uma única molécula de CFC destrua até 100.000 moléculas de O_3 . Portanto, uma pequena quantidade de CFC é capaz de fazer estragos significativos na camada de ozônio, aumentando substancialmente a quantidade de radiação ultravioleta que atinge a superfície da Terra. A principal causa dos buracos na camada de ozônio é associada aos produtos químicos produzidos pelo homem (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). Em 1987, através do Protocolo de Montreal, decidiu-se que o uso de substâncias que destroem a camada de ozônio, como os CFCs, deveriam ser diminuídos significativamente até o final do século XX.

O campo magnético da Terra gera ao seu redor uma região de influência chamada de magnetosfera. Próximo da Terra o campo magnético é semelhante ao campo de uma barra magnética gigante, veja ilustração na figura A.7. As linhas de indução magnética “saem” do norte magnético e “entram” no sul magnético. Estes polos magnéticos não são fixos em relação ao nosso planeta, eles variam de posição em uma taxa de 10 km por ano. O polo norte magnético da Terra fica próximo do polo sul geográfico e o polo sul magnético fica próximo do polo norte geográfico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

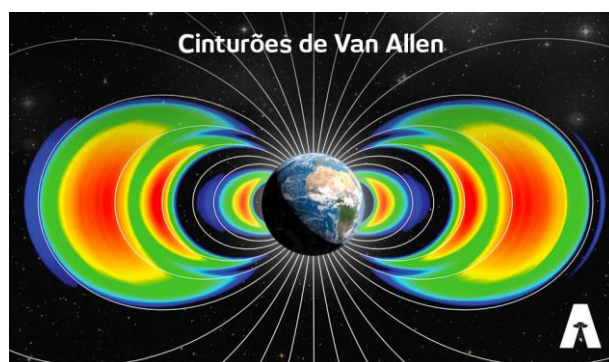
O magnetismo terrestre somente existe porque a Terra está girando. O núcleo da Terra é composto por metal líquido, que ao girar produz o seu magnetismo. Esta conexão entre a estrutura interna e o magnetismo é muito importante para o estudo de qualquer planeta, pois medindo o campo magnético de um planeta podemos dizer muito sobre seu interior. O campo magnético da Terra desempenha um importante papel de proteção contra partículas carregadas e potencialmente destrutivas. Sem a magnetosfera, a atmosfera e talvez a superfície do planeta seriam bombardeadas por partículas nocivas, prejudiciais a muitas formas de vida. Alguns pesquisadores acreditam que sem a magnetosfera a vida não seria possível. A magnetosfera da Terra possui duas regiões onde se encontram partículas carregadas de alta energia. A primeira se encontra a 3.000 km de altitude e a segunda a 20.000 km de altitude. Estas duas regiões são denominadas de cinto de radiação de Van Allen (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura A.8 ilustra os cinturões de radiação de Van Allen.

Figura A.7 – Ilustração do planeta Terra com seus eixos de rotação e magnético. As linhas de indução magnéticas representam o campo magnético terrestre.



Fonte: Siberian Art. Disponível em: <https://www.infoescola.com/eletromagnetismo/polos-magneticos-da-terra>. Acesso em: 31 jan. 2021.

Figura A.8 – Ilustração do planeta Terra com suas linhas de campo magnético e as duas regiões de radiação de Van Allen, a interna a 3.000 km de altitude e a externa a 20.000 km de altitude.



Fonte: Space Between. Disponível em: <https://spacebetween.com.br/index.php/2020/07/27/o-que-e-o-cinturao-de-van-allen>. Acesso em: 31 jan. 2021.

A Lua é o satélite natural da Terra. É possível ver a olhos nus diversas crateras na Lua, causadas por impactos de corpos celestes com sua superfície. Na foto apresentada na figura A.9 é possível identificar regiões escuras, que são grandes regiões preenchidas por lava solidificada, que chamamos de mares, e regiões claras, em que há formação de montanhas. A massa da Lua

é 80 vezes menor que a da Terra e seu tamanho é $\frac{1}{4}$ do da Terra. Do ponto de vista físico poderíamos definir o conjunto Terra-Lua como um sistema binário (RODRIGUES, 2010).

Figura A.9 – Imagem da Lua cheia obtida pela Apollo 11 (NSSDC).



Fonte: (RODRIGUES, 2010, p. 3-26).

As semelhanças e as diferenças entre a Lua e a Terra dificultam e até mesmo confundem os pesquisadores na tentativa de explicar a existência da Lua. Muitas teorias foram construídas ao longo dos anos. A primeira é a teoria irmã, que sugere que a Lua e a Terra formaram-se praticamente juntas e próximas, cada uma girando em torno de um centro de massa, independentemente. O problema dessa teoria é que a densidade e composição da Lua e da Terra são diferentes, assim sendo não poderiam ter se originado do mesmo material pré-planetário. A segunda é a teoria da captura, que afirma que a Lua se formou longe da Terra e foi capturada por esta. Devido à Lua ter se materializado longe da Terra, a densidade e a composição diferentes delas não eram mais um problema. Porém a captura da Lua pela Terra seria um evento muito difícil de acontecer devido à sua massa. A terceira é a teoria filha, que diz que a Lua se originou da própria Terra. Uma Terra jovem e derretida girando muito rápido jorrou matéria protolunar da bacia do oceano pacífico, pois existe uma semelhança química desta com o manto externo da Lua. Entretanto, esta teoria não tem grande aceitação, porque simulações computacionais indicaram que seria impossível a Terra ejetar a Lua por efeito de rotação. A quarta e última teoria é a teoria do impacto. Muitos astrônomos dizem que esta é uma junção da teoria da captura com a teoria filha. Na teoria do impacto é proposto que um objeto grande

do tamanho do planeta Marte colidiu com a Terra jovem e derretida e arrancou pedaços dela, os quais originaram a Lua. Simulações computacionais de tal catástrofe mostram que vários pedaços se juntaram em órbita em torno da Terra. A explicação de a Lua não ter um núcleo central denso é devido ao objeto de colisão ter deixado qualquer que seja seu núcleo para trás na Terra. O fato da composição da Lua não ser semelhante ao do manto da Terra é porque esta não tinha seu núcleo de ferro formado. A conclusão é que para entendermos a origem da Lua temos que fazer a interação entre teoria e observação e é assim que é feita a ciência moderna (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

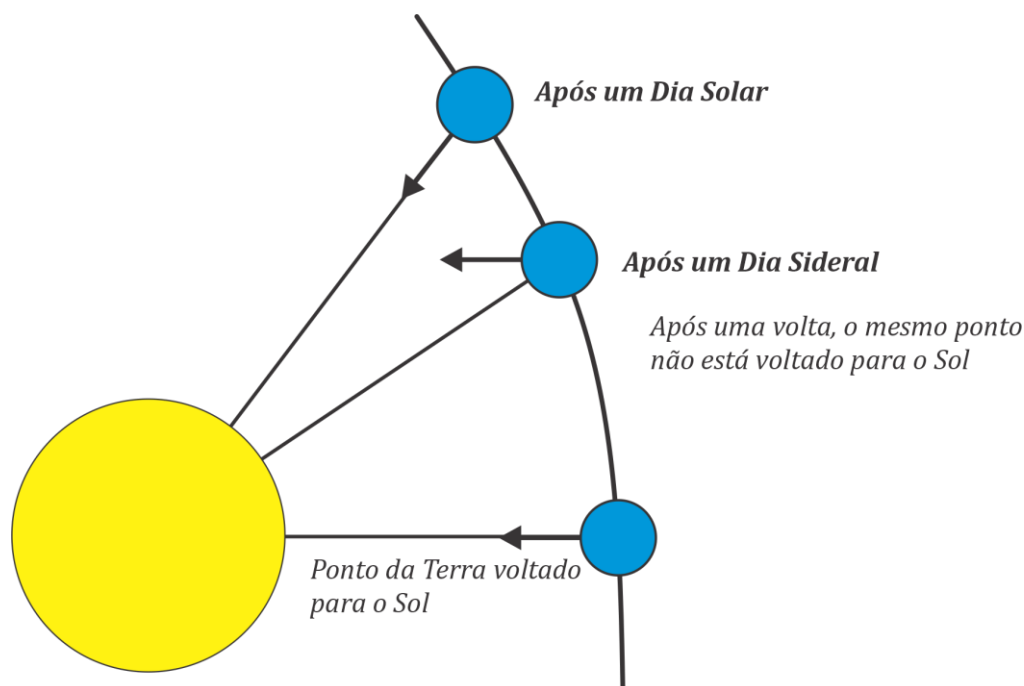
Não é possível observar variações moderadas de temperatura na Lua do dia para a noite, devido ao aquecimento solar, porque a atmosfera da mesma é rarefeita. Como resultado, são observadas grandes oscilações de temperatura. Ao meio-dia a temperatura atinge 400 K ou 127 °C e à noite 100 K ou -173 °C. Ela está geologicamente morta e dista aproximadamente 384.000 km da Terra. A distância real depende da posição da Lua, pois sua órbita em torno da Terra é ligeiramente elíptica. Sua densidade é de 3.300 kg/m³, sendo menor que a da Terra, cuja densidade média é de 5.500 kg/m³. Com isso concluímos que ela apresenta menos materiais pesados, como o ferro. Devido sua massa ser 80 vezes menor que a da Terra e seu raio $\frac{1}{4}$ do raio da Terra, seu campo gravitacional é menor, cerca de $\frac{1}{6}$ do campo gravitacional da Terra. Se compararmos a velocidade que um objeto precisa ter para escapar do campo gravitacional da Lua, obtemos uma velocidade de escape de 2,4 km/s, enquanto que para a Terra esta velocidade é de 11,2 km/s (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

O período de rotação da Lua é precisamente igual ao período de revolução sobre a Terra, com duração de 27,3 dias. Sendo assim a Lua sempre apresenta a mesma face para a Terra. O fato da órbita da Lua ser síncrona é devido à interação gravitacional entre esses dois corpos. Assim, como a Lua provoca marés na Terra, esta também produz uma protuberância de maré na Lua. Como a Terra é mais massiva que a Lua, a força da maré na Lua é cerca de 20 vezes maior do que na Terra. Há muito tempo, a distância entre a Terra e a Lua era $\frac{2}{3}$ do valor atual, ou seja, cerca de 250.000 km e as forças das marés da Terra na Lua eram 3 vezes maiores do que é hoje e isso pode ter sido o responsável pela forma alongada da Lua (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A.2.4 Dias, Noites e Estações do Ano

O dia e a noite são medidos com relação ao movimento aparente do Sol. Porém, é o movimento de rotação da Terra que nos fornece o período de um dia e uma noite. Quando esse movimento tem o Sol como referência chamamos de dia solar, com período de 24 h, considerando o meio-dia de um dia ao meio-dia do outro. Se tomarmos as estrelas distantes como referencial temos o dia sideral com período de 23h56min, equivalente ao período de rotação da Terra. Esta pequena diferença entre o dia solar e o dia sideral ocorre porque toda vez que a Terra rotaciona uma vez em torno de seu eixo, ela também percorre uma pequena distância ao longo de sua órbita em torno do Sol. Para o Sol retornar à mesma posição aparente no céu a Terra precisa rotacionar um pouco mais de 360° (aproximadamente 1°), veja figura A.10 (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura A.10 – Ilustração mostrando o dia sideral, cuja duração é o período de rotação da Terra e o dia solar, cuja duração é ligeiramente maior que o período do dia sideral, para que o Sol retorne à mesma posição aparente no céu.

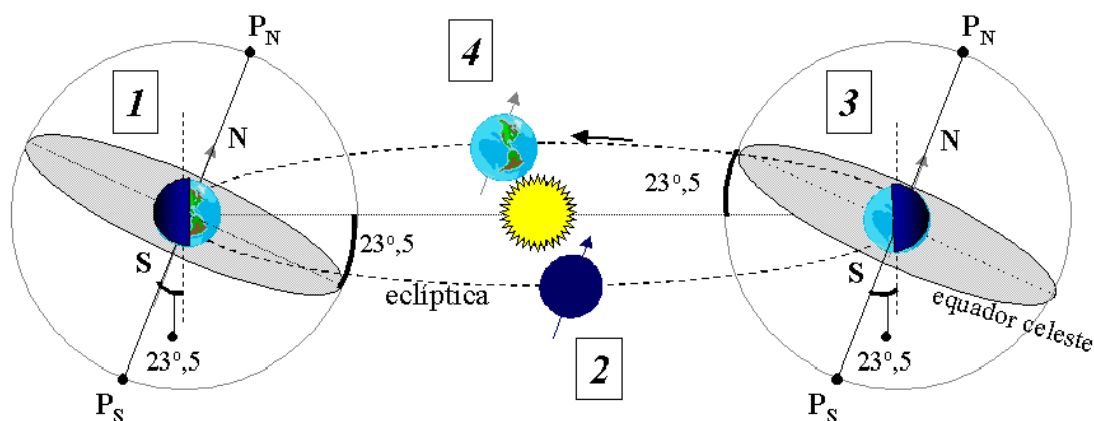


Fonte: Elaborado pelo autor.

A eclíptica é a trajetória que a Terra descreve em torno do Sol. A inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à eclíptica é de $23,5^\circ$ e essa inclinação é responsável pelas estações do ano, conforme mostrado na figura A.11. Ao contrário do que é comum pensar, não é a

distância da Terra ao Sol que é relevante, mesmo porque a maior distância entre a Terra e o Sol é próxima da menor. O que é relevante é o tempo de exposição à luz do Sol e a concentração dessa luz. Nas posições de equinócios, onde começa a primavera em um hemisfério e o outono no outro, o dia e a noite têm a mesma duração. Nas posições de solstícios, onde começa o verão em um dos hemisférios e o inverno no outro, o dia e a noite não têm a mesma duração. No solstício de verão o dia tem duração maior do que a noite e no solstício de inverno a noite tem duração maior do que o dia (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura A.11 representa as posições da Terra na eclíptica em relação ao Sol.

Figura A.11 – Ilustração mostrando a influência da inclinação de $23,5^\circ$ do eixo de rotação da Terra, em relação à eclíptica (curva tracejada), nas estações do ano e nas posições dos solstícios (1 e 3) e equinócios (2 e 4).



Fonte: (MILONE, 2010, p. 1-30).

Além dos movimentos de translação, rotação e de se movimentar com o Sol através de nossa galáxia, a Terra tem um movimento de precessão. A causa da precessão da Terra é devido ao torque causado pelas forças da gravidade do Sol, da Lua e da sua própria gravidade. O tempo de um ciclo completo de precessão é de 26.000 anos e o eixo da Terra descreve a figura de um cone neste período. O tempo necessário para a Terra dar uma volta ao redor do Sol em relação às estrelas distantes é chamado de ano sideral e tem duração de 365,256 dias solares médios. O movimento de precessão da Terra faz com que o ano sideral seja 20 minutos maior que o ano tropical. A duração deste último é de 365,242 anos solares médios e tem como referencial o equinócio vernal, ou seja, o início das estações do ano (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A.2.5 Eclipses Lunares e Solares

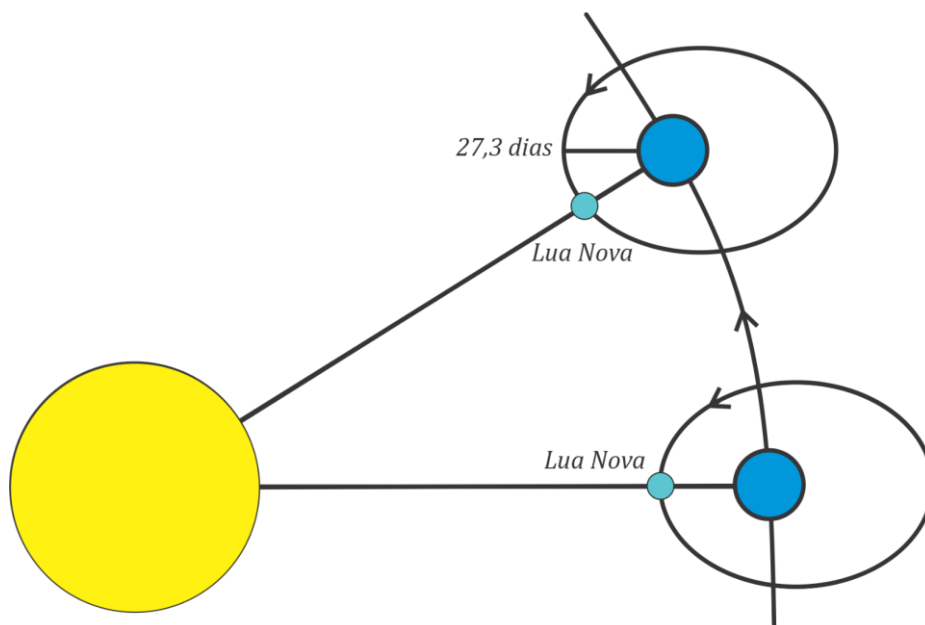
O ciclo das fases da Lua tem duração de 29,5 dias para ser concluído. Este período é denominado de mês sinódico. O ciclo inicia a partir da Lua nova, que é pouco visível no céu. À medida que a mesma fica mais visível, se torna Lua crescente. A Lua continua crescendo durante a próxima semana e se torna Lua cheia (gibosa), ficando visível até duas semanas após a Lua nova. A partir daí a Lua começa a diminuir e se torna Lua minguante, continua decrescendo e volta a ser Lua nova completando assim o ciclo, veja figura A.12. A posição da Lua em relação ao Sol, vista da Terra, depende da fase lunar. Por exemplo, a Lua cheia nasce no leste enquanto o Sol se põe no oeste. A Lua crescente nasce ao meio-dia, mas só começa a ser visível no final do dia. Quando o Sol se põe, a Lua já está alta no céu (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura A.12 – Imagem mostra as fases da Lua vista por um observador no hemisfério sul da Terra.



Fonte: [Pinterest](https://br.pinterest.com/pin/709879959990789816). Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/709879959990789816>. Acesso em: 1 maio 2021.

O período para a Lua efetuar uma revolução completa em torno do seu eixo e ao mesmo tempo dar uma volta em torno da Terra é chamado de mês sideral e tem duração de 27,3 dias. Este é um pouco menor do que o mês sinódico, porque o dia solar é ligeiramente maior do que o dia sideral. A figura A.13 ilustra o mês sideral e o mês sinódico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura A.13 – Imagem mostra o ciclo das fases da Lua, sua rotação e translação.

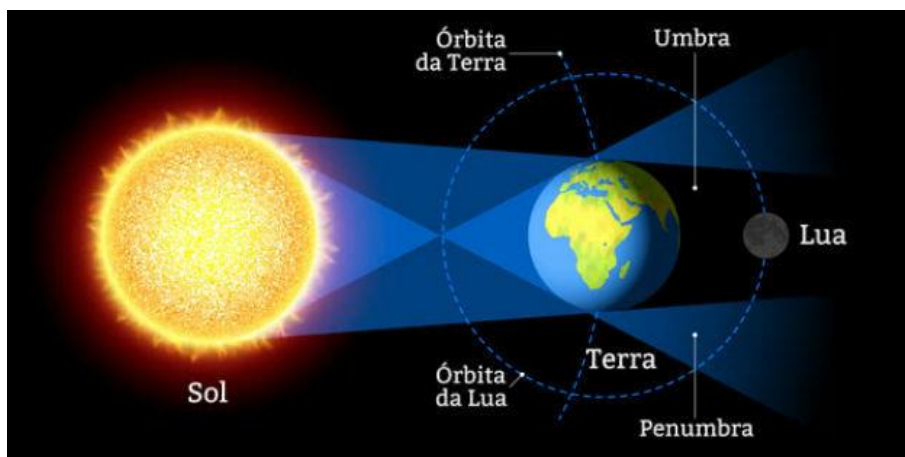
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando o Sol, a Terra e a Lua se alinham ocorre um fenômeno chamado eclipse. Porém, este fenômeno somente ocorre quando a Lua se encontra na fase de Lua nova ou cheia. Quando o Sol e a Lua estão em direções opostas, visto da Terra, a sombra da Terra escurece a Lua em um eclipse lunar, veja figura A.14 (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

O eclipse lunar total ocorre quando a Lua se encontra na fase de Lua cheia. Porém, normalmente o alinhamento dos astros não é perfeito e a região central da sombra da Terra, chamada umbra (ausência total de luz solar), não cobre totalmente a Lua cheia. Tal ocorrência é conhecida como eclipse lunar parcial, em que pelo menos parte da superfície da Lua se encontra na região de penumbra (ausência parcial de luz solar). Eclipses totais lunares duram o tempo necessário para a Lua cheia sair da região de sombra (umbra) da Terra. Este intervalo de tempo não é mais que cerca de 100 minutos. Durante este tempo a Lua adquire uma coloração vermelha escura e misteriosa, a qual tem origem da luz solar que é desviada (avermelhada) pela atmosfera da Terra e é refratada na superfície lunar evitando que a sombra da Terra fique completamente preta (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

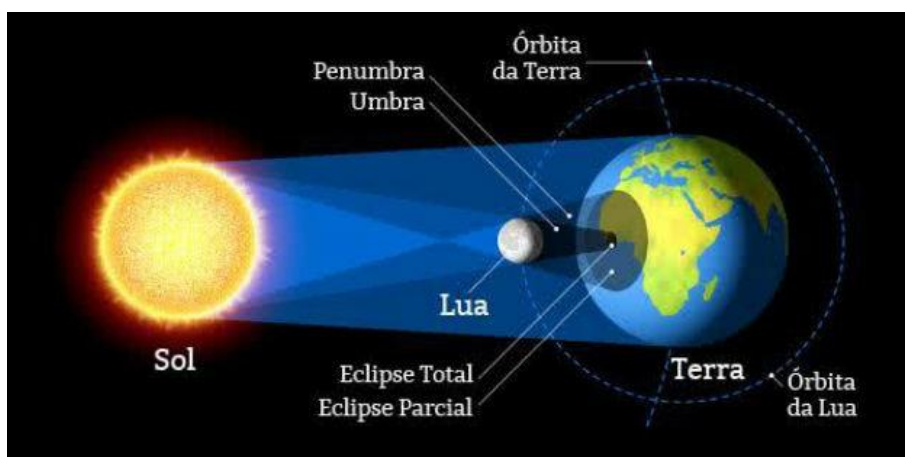
Quando a Lua e o Sol estão exatamente na mesma direção, visto da Terra, ocorre um fenômeno ainda mais inspirador. A Lua passa entre o Sol e a Terra, se o alinhamento dos astros for perfeito, observa-se o eclipse total solar e o dia brevemente se torna noite em algumas regiões, veja ilustração na figura A.15. A luz do Sol é reduzida significativamente, algumas estrelas e planetas tornam-se visíveis durante o dia (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Figura A.14 – Ilustração de um eclipse total da Lua. O Sol, a Terra e a Lua se alinham, com a Lua se encontrando na região central de sombra (umbra) da Terra.



Fonte: GOUVEIA, R. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eclipse-lunar>. Acesso em: 2 fev. 2021.

Figura A.15 – Ilustração de um eclipse solar. Na região de umbra na Terra ocorre o eclipse solar total e na região de penumbra ocorre o eclipse solar parcial.



Fonte: GOUVEIA, R. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eclipse-solar>. Acesso em: 2 fev. 2021.

A sombra da Lua na superfície da Terra tem um diâmetro de cerca de 7.000 km, que é praticamente o dobro do seu próprio diâmetro. Na região externa à essa sombra nenhum eclipse é visto. Na região central da mesma, chamada de umbra, observa-se o eclipse total do Sol. Na região de sombra, chamada de penumbra, observa-se o eclipse parcial do Sol, veja figura A.15. A região de umbra não excede 270 km e a superfície da Terra viaja a mais de 1.700 km/h, portanto a duração de um eclipse total solar não deve exceder 7,5 minutos (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Em um eclipse solar parcial a Lua está ligeiramente deslocada em relação ao alinhamento dos astros e apenas uma parte do Sol é coberta. O eclipse solar total, ao contrário do eclipse lunar, que é visível simultaneamente por todos os locais do lado noturno da Terra, somente pode ser visto de uma pequena parte do lado diurno da Terra. Mesmo assim, é possível estudar a coroa solar que é uma parte difícil de ver do nosso Sol (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Como já discutido, a órbita da Lua em torno da Terra não é exatamente circular. Se durante um eclipse a Lua estiver longe o suficiente da Terra, o seu disco não consegue cobrir totalmente o disco do Sol, mesmo que seus centros estejam alinhados. Quando isso ocorre a sombra da Lua na Terra não apresenta uma região de umbra, de maneira que um fino anel de luz solar envolve a Lua. A coroa solar não é vista, pois a pequena quantidade de Sol que ainda é visível impede completamente que o brilho fraco da coroa seja visto. Este eclipse é chamado de eclipse anular do Sol, veja figura A.16. De todos os eclipses solares observados, aproximadamente metade são eclipses anulares (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

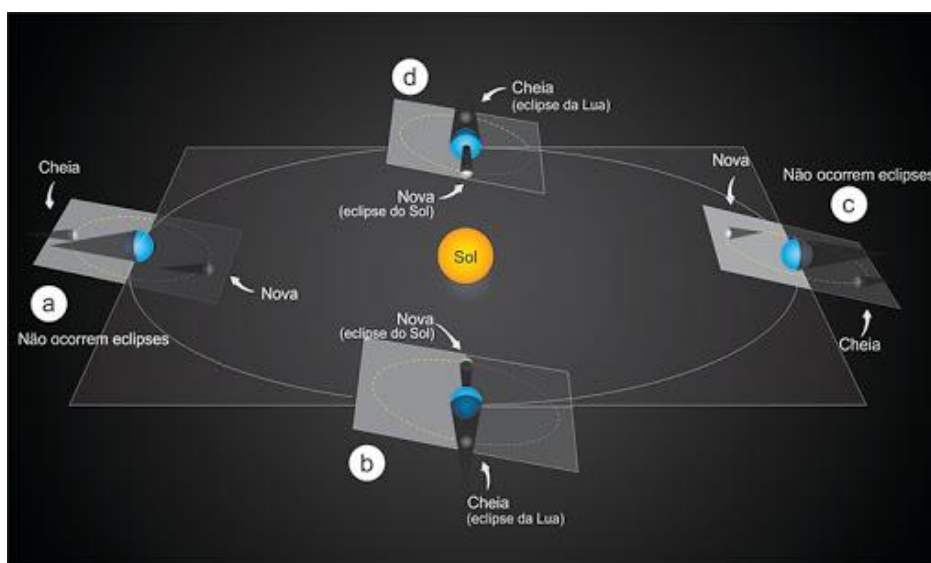
Figura A.16 – Eclipse anular do Sol. Um fino anel de luz solar envolve o disco lunar. Nesta situação a coroa solar não é visível.



Fonte: Olhar Digital. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2020/06/18/ciencia-e-espaco/eclipse-vai-criar-anel-de-fogo-no-ceu-neste-domingo-assista>. Acesso em: 3 fev. 2021.

Diante de toda essa descrição os alunos podem perguntar: Por que não há um eclipse solar em cada Lua nova e um eclipse lunar em cada Lua cheia? A resposta é, porque a órbita da Lua é ligeiramente inclinada de um ângulo de $5,2^\circ$ em relação à eclíptica (órbita da Terra em torno do Sol). A probabilidade de ocorrer um alinhamento perfeito entre o Sol, a Terra e a Lua é muito pequena, de maneira que os eclipses são eventos relativamente raros (CHAISSON e MCMILLAN, 2013). A figura A.17 ilustra a órbita da Lua inclinada em relação à eclíptica.

Figura A.17 – Ilustração mostrando quatro lunações diferentes. Em (a) e (c) não há eclipse, pois os astros não estão alinhados. Em (b) e (d) pode haver eclipses solar e lunar, pois os astros estão alinhados.



Fonte: Linha dos Nodos. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/eclipses/eclipse.htm>. Acesso em: 3 fev. 2021.

Os nós da órbita da Lua se encontram nas intersecções da órbita com o plano da eclíptica. Quando a Lua se encontra nesses nós pode ocorrer eclipse ou não, dependendo se a linha de nós (linha imaginária que liga os nós) está ou não direcionada para o Sol. A figura A.17 ilustra os dois casos. Em (b) e (d) são apresentados os dois períodos conhecidos como estações de eclipses, que podem ocorrer tanto o eclipse solar quanto o lunar, dependendo do alinhamento entre os astros. Se a Lua estiver acima ou abaixo do plano da eclíptica, casos (a) e (c) da figura A.17, não ocorre eclipse. Esses casos são chamados de desfavoráveis e são mais comuns. Portanto, pode-se concluir que os eclipses ocorrem somente quando a Lua está na fase de Lua nova ou cheia e a linha de nós estiver passando pelos centros dos astros (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

A.2.6 Leis de Kepler

Johannes Kepler (1571-1630) foi um matemático e astrônomo alemão, contemporâneo do primeiro observador “moderno” Galileu Galilei. Diferente de Galileu, Kepler era um teórico puro. Seu trabalho sobre o movimento planetário, que tanto esclareceu nosso conhecimento, foi baseado em observações de outros, em especial na extensa coleção de dados compilados por

Tycho Brahe (1546-1601). A maioria das observações de Tycho foram feitas antes da invenção do telescópio em seu próprio observatório, chamado Uraniborg, na Dinamarca. Seus instrumentos de observação foram feitos por ele mesmo, os quais permitiram que ele conseguisse registros precisos das estrelas, planetas e outros eventos celestiais, como um cometa e uma supernova. Depois de sua morte, Kepler herdou todos os dados das observações dos planetas feitas por ele em várias décadas. A partir daí começou a elaborar uma teoria do movimento dos planetas que não precisasse utilizar os epiciclos. O heliocentrismo de Copérnico foi adotado por ele, porém as órbitas dos planetas não deveriam ser circulares. A sua teoria deveria conciliar os dados observacionais de Tycho e o sistema heliocêntrico (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Depois de muitos estudos Kepler conseguiu, a partir dos dados planetários de Brahe, desenvolver três leis do movimento planetário que levam seu nome. Usando observações de diferentes épocas do ano e triangulação de diferentes pontos da órbita da Terra, ele determinou a forma da órbita de cada planeta e encontrou as velocidades em que os planetas se movem através da observação da posição dos planetas em noites sucessivas. Ele relacionou o tamanho da órbita de um planeta ao seu período orbital sideral, ou seja, quanto mais distante estiver um planeta do Sol, maior será o tempo de revolução em torno dele (CHAISSON; MCMILLAN, 2013).

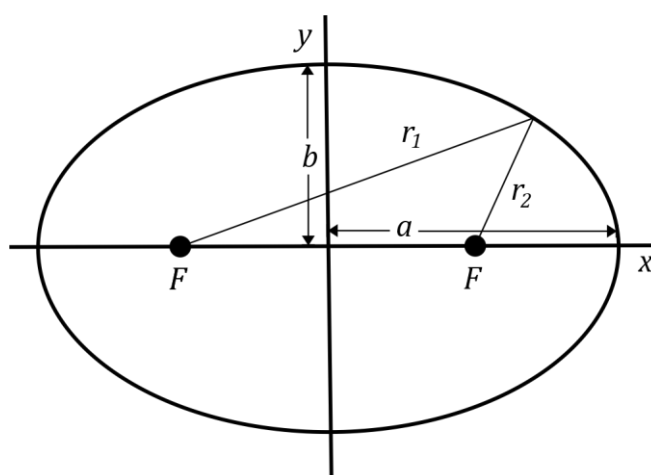
Kepler expôs estes resultados nas suas três leis empíricas do movimento planetário. Estas leis são consistentes com a lei da gravitação universal de Newton (TIPLER; MOSCA, 2013). A primeira lei de Kepler, também conhecida como lei das órbitas, diz que as órbitas dos planetas são elípticas com o Sol ocupando um de seus focos, ver ilustração na figura A.18. Uma elipse é o lugar geométrico dos pontos para os quais a soma das distâncias a dois pontos fixos, chamados focos F , é constante, como ilustrado na figura A.19.

A segunda lei de Kepler diz que o segmento de reta imaginário que liga qualquer planeta ao Sol, varre áreas iguais em tempos iguais (TIPLER; MOSCA, 2013). Esta lei é conhecida como lei das áreas e é uma consequência da conservação do momento angular, ver ilustração na figura A.20. A terceira é a lei dos períodos, que diz que o quadrado do período de revolução de qualquer planeta ao redor do Sol é proporcional ao cubo da distância do mesmo.

As leis de Kepler deram um forte suporte às ideias de Copérnico, pois o movimento dos planetas podia ser descrito com grande simplicidade se o Sol fosse adotado como sistema de referência. Tais leis eram empíricas, sem nenhuma interpretação teórica, pois Kepler não fornecia o conceito de força como causa das regularidades observadas. O conceito de força é

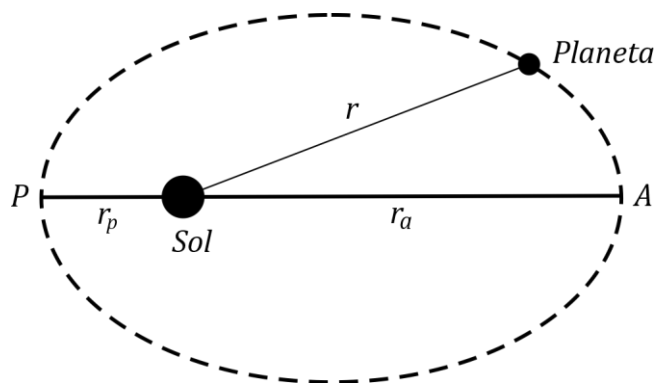
melhor formulado por Newton, que deduz as leis de Kepler a partir de suas leis de movimento e da sua lei da gravitação universal.

Figura A.18 – Ilustração mostrando uma elipse cujo lugar geométrico dos pontos para os quais $r_1 + r_2 = \text{constante}$. A distância a é chamada de semieixo maior, e b é o semieixo menor. As circunferências são casos especiais onde os focos coincidem.



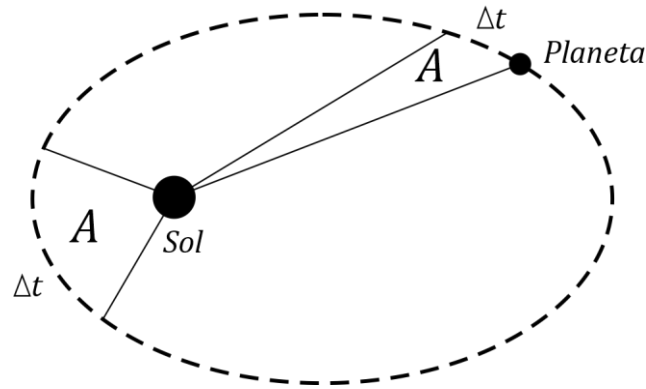
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.19 – Ilustração mostrando a trajetória elíptica de um planeta com o Sol ocupando um de seus focos. O ponto P , onde o planeta se encontra mais próximo do Sol, é chamado de Periélio. O ponto A , onde o planeta se encontra mais afastado do Sol, é chamado de Afélio. A distância média entre um planeta e o Sol é igual a $(r_p + r_a)/2$ e é igual ao semieixo maior. Os planetas conhecidos descrevem órbitas mais circulares do que a órbita aqui mostrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.20 – Ilustração mostrando a lei das áreas. As áreas varridas pelo segmento de reta imaginário Sol-Planeta, durante um dado intervalo de tempo Δt , são iguais. O planeta se move mais rapidamente quando está próximo do Sol do que quando está mais afastado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vamos utilizar o conceito de momento angular para derivar a segunda lei de Kepler, a lei das áreas. A figura A.21 (a) mostra um planeta em órbita elíptica em torno do Sol. No tempo dt , o planeta se desloca de uma distância $v\Delta t$ ⁴, e o vetor raio \mathbf{r} varre a área sombreada da figura. Esta vale a metade da área do paralelogramo formado pelos vetores \mathbf{r} e $\mathbf{v}dt$. Esta pode ser descrita através do módulo do produto vetorial $|\mathbf{r} \times \mathbf{v}\Delta t|$ (TIPLER e MOSCA, 2013). Dessa forma, a área varrida ΔA , dada pela região sombreada na figura A.21 (a), pelo raio \mathbf{r} no tempo Δt é descrita por

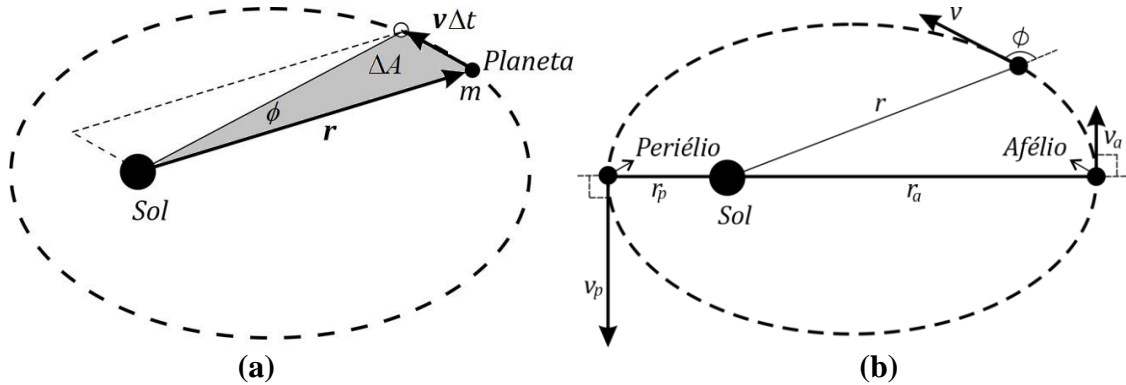
$$\Delta A = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{v}\Delta t| = \frac{|\mathbf{r} \times m\mathbf{v}|}{2m} \Delta t \Rightarrow \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{L}{2m}, \quad (A.1)$$

sendo $L = |\mathbf{r} \times m\mathbf{v}|$ a magnitude do momento angular orbital do planeta em torno do Sol, ou seja, esta é proporcional à magnitude do momento angular orbital L .

Como a força sobre o planeta está no segmento de reta imaginário Sol-Planeta, ela não exerce um torque τ em relação ao Sol. Consequentemente, $\tau = 0$ de maneira que L é constante. Logo, a taxa na qual a área é varrida é a mesma para todas as partes da órbita, que é o que diz a segunda lei de Kepler (TIPLER e MOSCA, 2013). Se L é constante, tem-se que $|\mathbf{r} \times m\mathbf{v}| = r v \sin(\phi)$ é constante. O ângulo ϕ é ilustrado na figura A.21(b). Note que no periélio (p) e no afélio (a) $\phi = 90^\circ$, de forma que $r_a v_a = r_p v_p$, de maneira que no periélio, distância r menor ao Sol, o planeta se move com velocidade maior e no afélio, distância maior, o planeta se move com menor velocidade.

⁴ Neste trabalho adotaremos a notação vetorial através de letras em negrito, como o vetor velocidade \mathbf{v} , por exemplo.

Figura A.21 - (a) Se o momento angular $L = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ é constante a área sobreada $\Delta A = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \times \mathbf{v}\Delta t| = \frac{1}{2m} L\Delta t$, varrida no tempo Δt também é constante, ou seja, $\frac{\Delta A}{\Delta t} = cte$. **(b)** Mostra que a magnitude do momento angular, dada por $L = m v r \text{sen}(\phi)$, permanece constante, e portanto, $r v \text{sen}(\phi)$ permanece constante. Para $\phi = 90^\circ$ no periélio (p) e no afélio (a) tem-se que $r_a v_a = r_p v_p$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já descrito, a terceira lei de Kepler diz que o quadrado do período de qualquer planeta é proporcional ao cubo do semieixo maior de sua órbita, ou seja,

$$T^2 = Cr^3, \tag{A.2}$$

sendo T o período de revolução, r o raio orbital médio e C uma constante que tem o mesmo valor para todos os planetas de um mesmo sistema solar.

Esta lei é consequência do fato de que a força exercida pelo Sol sobre um planeta, varia com o inverso do quadrado da distância do Sol ao planeta (TIPLER e MOSCA, 2013). Para demonstrarmos essa lei vamos utilizar a lei da gravitação universal de Newton, que diz que cada planeta deve ser atraído para o Sol com uma força proporcional à massa M_p do planeta e inversamente proporcional ao quadrado de sua distância ao Sol. Esta será apresentada formalmente na próxima seção. Considerando o caso especial de um planeta movendo-se com velocidade v em uma órbita circular de raio r em torno do Sol tem-se que $F = \frac{GM_s M_p}{r^2}$, sendo G a constante gravitacional universal e M_s a massa do Sol. A força gravitacional do Sol produz no planeta uma aceleração centrípeta dada por $a_c = \frac{v^2}{r}$. Considerando a segunda lei de Newton para massa constante ($F = M_p a_c$) tem-se que:

$$\frac{GM_s M_p}{r^2} = M_p \frac{v^2}{r}. \tag{A.3}$$

Explicitando v^2 , obtemos,

$$v^2 = \frac{GM_s}{r}. \tag{A.4}$$

Para um intervalo de tempo correspondente ao período de revolução do planeta em torno do Sol, este percorre uma distância $2\pi r$, de maneira que sua velocidade pode ser escrita como:

$$v = \frac{2\pi r}{T}. \quad (A.5)$$

Substituindo a equação (A.5) na equação (A.4) obtemos,

$$\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM_s}{r} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_s} r^3. \quad (A.6)$$

Comparando este resultado com a equação (A.2) tem-se que $C = \frac{4\pi^2}{GM_s}$.

Se substituirmos a massa do Sol M_s pela massa de um planeta M_p , a equação (A.6) se aplica para as órbitas dos satélites naturais de qualquer planeta, como a Lua em torno da Terra.

A.2.7 Lei da Gravitação Universal de Newton

As teses de Aritóteles (385-323 a.C.) acerca da atração gravitacional perduraram por aproximadamente dois mil anos. Galileu Galilei (1564-1642) foi quem contrastou a metodologia abstrata do raciocínio aristotélico com o método empírico. Outros grandes cientistas da época compartilhavam deste método empírico, entre eles, Francis Bacon (1561-1626), Johannes Kepler (1571-1630) e René Descartes (1596-1650). Contudo, quem elaborou a primeira teoria da gravitação com sistematização matemática e fundamentada no método científico foi Isaac Newton (TONIATO, 2020).

Isaac Newton nasceu em 1642 no dia de Natal, ano em que morreu Galileu Galilei, na cidade de Lincolnshire na Inglaterra. Quando a peste bubônica chegou a Cambridge em 1665, Newton, que estudava em Trinity College da Universidade de Cambridge, se refugiou na sua casa durante 2 anos. Neste período ele fez a descoberta da lei da gravidade, mas guardou segredo por 20 anos por achar que estava incompleta e para evitar críticas e plágio dos colegas (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

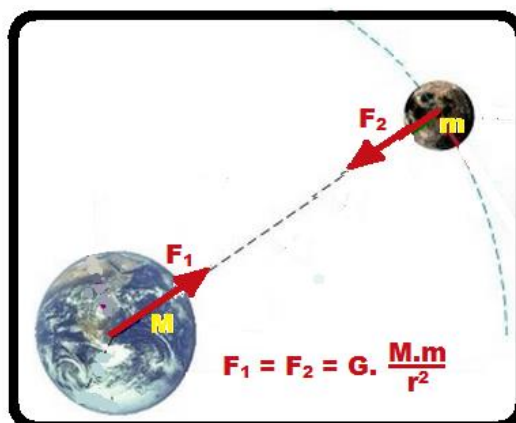
Newton, ao refletir acerca da queda de um corpo, hipotetizou que qualquer objeto que possui uma certa massa sempre exerce uma força gravitacional atrativa em todos os outros objetos massivos e quanto maior a massa do objeto, mais intensa é essa força. Por exemplo, na queda de uma bola, a Terra aplica uma força gravitacional de atração na bola e essa também aplica uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos na Terra (terceira lei de Newton). Devido à Terra ser muito mais massiva, esta adquire uma aceleração muito menor do que a bola (segunda lei de Newton) (CHAISSON e MCMILLAN, 2013).

Um outro aspecto da força gravitacional veio do estudo das acelerações dos planetas que orbitavam o Sol. Quanto maior a distância r do planeta ao Sol, menor seria a atração que receberia, ou seja, a força gravitacional atrativa diminuiria em proporção ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Em outras palavras, a força gravitacional atrativa é diretamente proporcional ao produto das massas m_1 e m_2 dos corpos 1 e 2, respectivamente, e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros dos corpos (CHAISSON e MCMILLAN, 2013), ou seja,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (\text{A.7})$$

sendo $G \approx 6,674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ uma constante universal que tem o mesmo valor para todos os pares de pontos materiais, chamada de constante gravitacional. A figura A.22 ilustra a atração gravitacional entre a Terra e a Lua.

Figura A.22 – Ilustração mostrando a Terra atraindo a Lua e simultaneamente a Lua atraindo a Terra, com uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. A massa da Terra é M e a da Lua é m . A distância entre os centros dos astros é dada por r e G é a constante gravitacional.



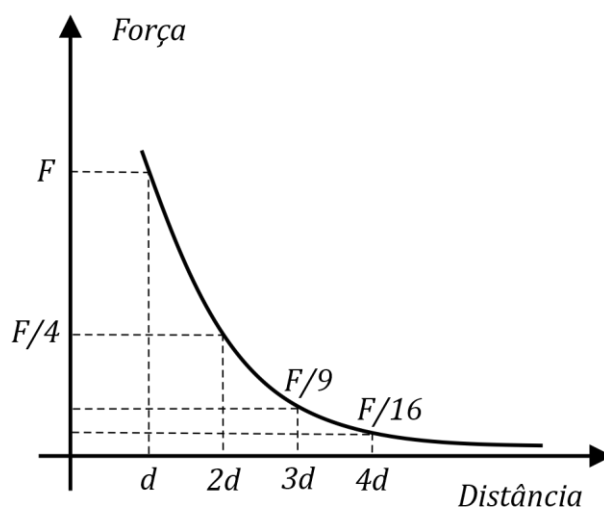
Fonte: Lei da Gravitação Universal de Newton. Disponível em: http://fisicaevestibular.com.br/novo/wp-content/uploads/migracao/leis-gravitacao/o_283d11e3487e4ebc.html. Acesso em: 11 fev. 2021.

Como $F = F \left(\frac{1}{r^2} \right)$, quando diminuimos a distância r entre os dois corpos pela metade da inicial ($r/2$), por exemplo, a força gravitacional de atração entre eles F' se torna quatro vezes maior, pois

$$F' = G \frac{m_1 m_2}{\left(\frac{r}{2} \right)^2} = 4 G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 4F.$$

Na figura A.23 ilustra o gráfico da força gravitacional atrativa em função da distância entre os centros de massa de dois corpos.

Figura A.23 – Gráfico da força gravitacional em função da distância entre dois corpos que estão interagindo entre si. A força varia de maneira inversamente proporcional com o quadrado da distância entre o centro dos corpos e o gráfico é uma hipérbole cúbica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Newton publicou sua teoria da gravitação em 1686, mas foi só um século depois que uma determinação experimental precisa da constante gravitacional G foi feita por Henry Cavendish em 1797 através de seus experimentos com a balança de torção (TIPLER e MOSCA, 2013).

Esta lei de força estende-se da gravitação na superfície da Terra até os corpos celestes, sendo por isso chamada de lei da gravitação universal de Newton. Com esta lei é possível reproduzir as leis do movimento planetário de Kepler e explicar que a origem dos movimentos orbitais dos planetas está na força gravitacional. A observação de que os corpos são acelerados igualmente por um campo gravitacional uniforme feita por Galileu é explicada por Newton como sendo o que ocorre nas proximidades da superfície da Terra, em que M e r são a massa e o raio da Terra. Se desprezarmos a rotação da Terra, considerarmos que a mesma é esférica e negligenciarmos suas variações de densidade, devido a existência de depósitos de minérios e outras substâncias cuja densidade é maior ou menor que a densidade média da Terra, a força gravitacional torna-se constante e passa a ser a própria força peso de um corpo próximo da superfície da Terra (TONIATO, 2020). A figura A.24 ilustra um corpo de massa m próximo da superfície da Terra e sob a influência de seu campo gravitacional de maneira que a força peso $P = mg$ é igual à força gravitacional F , ou seja,

$$mg = \frac{GMm}{r^2}.$$

Dividindo ambos os lados da igualdade acima por m , tem-se:

$$g = \frac{GM}{r^2} \cdot \quad (A. 8)$$

Substituindo $r = R + h$, conforme a figura A.24,

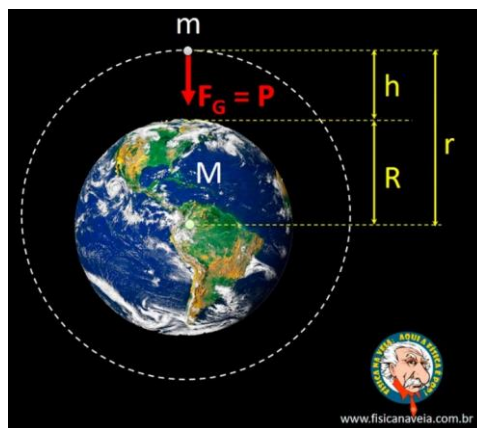
$$g = \frac{GM}{(R + h)^2} \cdot \quad (A. 9)$$

Na superfície da Terra tem-se $h = 0$, de maneira que,

$$g_0 = \frac{GM}{R^2} \cdot \quad (A. 10)$$

sendo g_0 o campo gravitacional na superfície da Terra.

Figura A.24 – Ilustração mostrando um corpo de massa m próximo da superfície da Terra a uma altitude h . A Terra possui massa M e raio R . A distância do centro da Terra até o centro do corpo é r . A força gravitacional é o próprio peso do corpo.



Fonte: FÍSICA NA VEIA. Disponível em: <https://fisicanaveia.blogosfera.uol.com.br/2020/06/11/a-gravidade-e-zero-no-espaco-quanto-vale-a-gravidade-na-iss>. Acesso em: 11 fev. 2021.

O campo gravitacional no exterior do planeta ($r \geq R$) pode ser calculado como se toda a massa M do planeta estivesse confinada em seu centro, ou seja, se tivéssemos uma massa pontual. Mas como é o campo gravitacional no interior de um planeta? Este obedece a mesma lei de força?

A resposta para esta última pergunta é não. Para calcular a aceleração da gravidade no interior do planeta é necessário saber a distribuição da densidade de massa da Terra. Como uma primeira aproximação, pode-se assumir que a Terra possui simetria esférica e densidade dependente apenas com a distância r a partir do centro do planeta. Sob estas condições é possível obter a distribuição de densidade a partir da equação de Adams-Williamson (LAY and WALLACE, 1995), a qual relaciona o gradiente de densidade radial com as propriedades elásticas de um planeta com simetria esférica sob condições hidrostáticas. A solução desta

equação requer o conhecimento das velocidades de ondas sísmicas como função de r , as quais podem ser obtidas de dados sismométricos.

A gravidade no interior da Terra é aproximadamente constante e igual ao valor observado na superfície em todo o manto terrestre. Este possui uma espessura de aproximadamente 3.000 quilômetros e representa 84% do volume total da Terra. Este resultado pode ser explicado pelo modelo terrestre de duas camadas (SNYDER, 1986), o qual mostra que a constância da aceleração da gravidade é uma consequência do tamanho particular e da densidade do núcleo terrestre com relação ao tamanho e densidade de todo o planeta Terra. Em outros planetas com diferentes distribuições de massa, a dependência da aceleração da gravidade pode ser muito diferente (DRAGONI, 2020).

Conhecer o campo gravitacional no interior da Terra é muito importante, porque a gravidade é uma das principais forças que controlam os movimentos internos da Terra, como os movimentos de convecção que ocorrem no núcleo e no manto. Tais movimentos dão origem a manifestações fundamentais da atividade do planeta, como o seu campo magnético e a dinâmica de sua superfície através das placas tectônicas, vulcões e terremotos (DRAGONI, 2020).

A.2.8 Marés

As marés são os movimentos periódicos de subida e descida do nível médio do mar que ocorrem em todo o oceano. À medida que o nível do mar sobe e desce, a borda do mar lentamente se desloca em direção à terra e ao mar diariamente. O conhecimento da periodicidade das marés é muito importante para várias atividades costeiras, como surf, pesca, navegação e até mesmo para se preparar para tempestades.

As marés são causadas pela variação das forças gravitacionais que a Lua e o Sol exercem sobre a Terra e seus oceanos. Isto ocorre porque o campo gravitacional tanto da Lua quanto do Sol não é homogêneo em todo o globo. A força gravitacional que a Lua exerce em qualquer corpo na superfície da Terra é cerca de cem vezes menor do que a força gravitacional que o Sol exerce. Entretanto, pelo fato da Lua estar mais próxima da Terra do que o Sol, a não homogeneidade do campo gravitacional lunar em toda a Terra é consideravelmente maior do que a do campo solar. Como consequência disso as marés induzidas pela Lua são aproximadamente o dobro das marés induzidas pelo Sol (BUTIKOV, 2002).

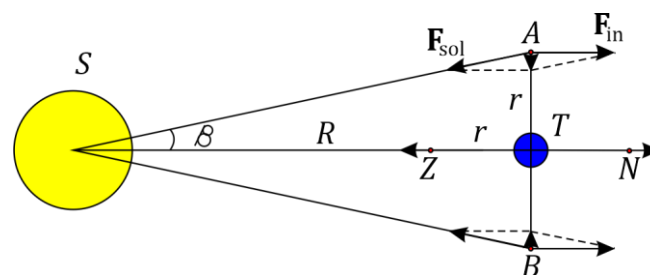
Devido ao centro de massa do sistema Sol-Terra quase coincidir com o centro do Sol, as forças geradoras de maré podem ser melhor entendidas se começarmos analisando as marés

induzidas pelo Sol. A Terra como um todo se move com uma aceleração relativa a um referencial inercial. Essa aceleração é consequência das forças gravitacionais dos corpos celestes. Ela se move em uma trajetória quase circular em torno do Sol com uma aceleração centrípeta \mathbf{a}_0 . Essa aceleração é produzida pela força gravitacional solar, como se a Terra estivesse “caindo” no campo gravitacional do Sol, e não depende de sua velocidade orbital (BUTIKOV, 2002).

Para entendermos melhor as marés vamos considerar um referencial geocêntrico não giratório que realiza um movimento translacional circular em torno do Sol, ou seja, é um movimento de revolução sem rotação. Com relação ao espaço inercial, relacionado às estrelas distantes, todos os pontos desse referencial movem-se com aceleração \mathbf{a}_0 , cuja magnitude e direção são as mesmas para todos os pontos. Qualquer corpo de massa m neste referencial não inercial geocêntrico está sujeito a uma pseudoforça de inércia $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_0$, que é independente da posição do corpo em relação a Terra. Se o corpo fosse colocado no centro da Terra, essa pseudoforça equilibraria exatamente a força gravitacional que o corpo recebe do Sol (BUTIKOV, 2002).

Diferente da pseudoforça de inércia, a força gravitacional do Sol, \mathbf{F}_{sol} , experimentada pelo corpo diminui com a sua distância do Sol, sendo sua magnitude e direção dependentes da posição do corpo na Terra. A *força de maré* é resultado da ação combinada da pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a força \mathbf{F}_{sol} , que somente possuiriam a mesma magnitude e direção se o corpo estivesse no centro da Terra (BUTIKOV, 2002). A figura A.25 ilustra a influência solar nas marés.

Figura A.25 – Ilustração das forças geradoras de maré induzidas pelo Sol (S) em diferentes pontos A, B, Z e N. Somente no centro da Terra (T) que a força geradora de maré é nula, pois a soma vetorial entre a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a força \mathbf{F}_{sol} é um vetor nulo. Então, \mathbf{F}_{in} e \mathbf{F}_{sol} passam a ter mesma magnitude e direção, com sentidos opostos. $\beta \approx r/R$ é o ângulo entre o corpo e o centro da Terra vista do Sol.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A magnitude da aceleração \mathbf{a}_0 de queda livre da Terra T no campo gravitacional do Sol S possui a mesma expressão da equação (A.10), ou seja,

$$a_0 = \frac{GM_{sol}}{R^2}, \quad (A.11)$$

mas neste caso M_{sol} é a massa do Sol e R é a distância Sol-Terra.

Ainda utilizando a figura A.25 vamos verificar as forças de maré nos pontos ao redor da Terra T . No ponto A a força \mathbf{F}_{sol} não tem a mesma direção da pseudoforça \mathbf{F}_{in} e a soma vetorial entre elas resulta na força de maré \mathbf{F}_A direcionada verticalmente para a Terra, de maneira que,

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_{sol} \text{sen}(\beta) \approx \mathbf{F}_{sol} \beta,$$

uma vez que $\beta = \frac{r}{R} \ll 1$ é o ângulo entre o corpo e o centro da Terra visto do Sol, fazendo com que seja válida a aproximação $\text{sen}(\beta) \approx \beta$. Como $F_{sol} = ma_0$, pela equação (A.11) tem-se para a magnitude de F_A ,

$$F_A = ma_0\beta = ma_0 \left(\frac{r}{R}\right) = \left(\frac{GmM_{sol}}{R^2}\right) \left(\frac{r}{R}\right) = \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3}\right)r. \quad (A.12)$$

A força de maré \mathbf{F}_B no ponto B tem a mesma magnitude de \mathbf{F}_A e também é direcionada verticalmente para a Terra. Nestes dois pontos A e B ao redor da Terra a força de maré é sempre vertical para baixo e o Sol está no horizonte, ou seja, $R \perp r$ como mostrado na figura A.25 (BUTIKOV, 2002).

Quando o corpo se encontra no ponto Z , o Sol encontra-se no zênite⁵. A distância do Sol ao corpo é menor do que a distância do Sol a Terra, de maneira que a força \mathbf{F}_{sol} é mais intensa do que a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e ambas apresentam a mesma direção. Por isso a força de maré \mathbf{F}_Z no ponto Z é vertical para cima em relação a Terra e direcionada para o Sol. Sua magnitude é dada por $F_Z = F_{sol} - F_{in}$, ou seja,

$$F_Z = G \frac{mM_{sol}}{(R-r)^2} - ma_0 = \frac{ma_0 R^2}{(R-r)^2} - ma_0 = ma_0 \left[\frac{R^2}{(R-r)^2} - 1 \right]. \quad (A.13)$$

em que utilizamos a equação (A.11). Sendo $\frac{r}{R} \ll 1$ é possível mostrar que o primeiro termo entre parênteses é dado, aproximadamente, por:

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{r}{R}\right)^2} \approx 1 + \frac{2r}{R},$$

de maneira que a equação (A.13) pode ser escrita como:

$$F_Z = ma_0 \left[\frac{R^2}{(R-r)^2} - 1 \right] \approx 2 \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r, \quad (A.14)$$

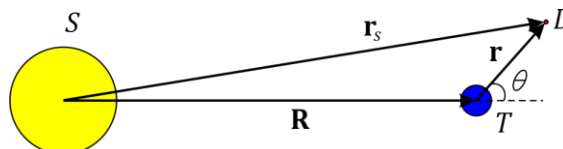
⁵ O zênite é o ponto da esfera celeste que se situa na vertical do observador, sobre a sua cabeça.

ou seja, $F_Z \approx 2F_A$, e portanto F_Z é aproximadamente o dobro da magnitude das forças de maré nos pontos A e B , uma vez que $F_A = F_B$.

No ponto N , a força de maré \mathbf{F}_N tem aproximadamente a mesma magnitude de \mathbf{F}_Z e é vertical para cima vista da Terra e do Sol e este se encontra no nadir⁶. Neste caso, a força \mathbf{F}_{Sol} é menos intensa do que a pseudoforça \mathbf{F}_{in} e apresenta a mesma direção. O raciocínio utilizado para as forças de maré induzidas pelo Sol na Terra são válidas também para as forças de maré induzidas pela Lua na Terra, bastando substituir M_{sol} pela massa da Lua e R pela distância Terra-Lua. O fator que realmente importa é a aceleração adquirida pela Terra devido a atração gravitacional do corpo celeste que causa as marés na Terra e não das velocidades orbitais de ambos os corpos acoplados gravitacionalmente. Como a Lua está mais perto da Terra, as forças geradoras de maré lunar são aproximadamente 2,2 vezes maior do que as solares (BUTIKOV, 2002).

Para obter uma expressão matemática geral para as forças geradoras de marés induzidas pelo Sol vamos considerar um ponto D arbitrário perto da Terra, como mostrado na figura A.26. Continuaremos considerando a estrutura geocêntrica não inercial e não rotativa para analisarmos a força de maré \mathbf{F}_D sobre um corpo de massa m colocado neste ponto.

Figura A.26 – Ilustração mostrando o Sol S , a Terra T e um ponto arbitrário D . O vetor \mathbf{r} é medido do centro da Terra até o ponto D , \mathbf{R} é o vetor do centro do Sol até o centro da Terra e $\mathbf{r}_s = \mathbf{R} + \mathbf{r}$ é o vetor medido do centro do Sol até o ponto D . O ângulo θ situa-se entre \mathbf{r} e a linha Sol-Terra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A força de maré \mathbf{F}_D é o resultado da soma vetorial da força $\mathbf{F}_{\text{Sol}} = G \frac{mM_{\text{sol}}}{r_s^2} (-\hat{\mathbf{r}}_s)$ com a pseudoforça $\mathbf{F}_{\text{in}} = -m\mathbf{a}_0 = -G \frac{mM_{\text{sol}}}{R^2} (-\hat{\mathbf{R}})$ no ponto D , sendo $\hat{\mathbf{r}}_s = \mathbf{r}_s/r_s$ e $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R}/R$ os versores das direções de \mathbf{r}_s e \mathbf{R} , respectivamente. Logo,

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_{\text{Sol}} + \mathbf{F}_{\text{in}} = -GmM_{\text{sol}} \left(\frac{\mathbf{r}_s}{r_s^3} - \frac{\mathbf{R}}{R^3} \right). \quad (\text{A.15})$$

Sendo $r \ll R$ podemos escrever,

$$r_s^2 = (\mathbf{R} + \mathbf{r})^2 = R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r}) + r^2 \approx R^2 \left[1 + 2 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (\text{A.16})$$

⁶ O nadir é o ponto da esfera celeste diretamente oposto ao zênite, situado na vertical do observador sob seus pés.

Para encontrarmos uma expressão aproximada para $1/r_s^3$, elevamos ambos os lados da equação (A.16) por $(-3/2)$, o que nos fornece:

$$(r_s^2)^{-\frac{3}{2}} \approx (R^2)^{-\frac{3}{2}} \left[1 + 2 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]^{-\frac{3}{2}} \rightarrow \frac{1}{r_s^3} \approx \frac{1}{R^3} \left[\frac{R^2}{R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})} \right]^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{[R^2 + 2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})]^{\frac{3}{2}}}.$$

Essa expressão ainda pode ser escrita como,

$$\frac{1}{r_s^3} = \frac{1}{R^3 \left[1 + \frac{2(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{1}{R^3} \left[1 - 3 \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (\text{A.17})$$

Substituindo o resultado (A.17) em (A.15) e sendo $\mathbf{r}_s = \mathbf{R} + \mathbf{r}$ tem-se,

$$\mathbf{F}_D \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[(\mathbf{R} + \mathbf{r}) \left(1 - \frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right) - \mathbf{R} \right] \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[\mathbf{r} - 3\mathbf{R} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right],$$

em que desprezamos o termo $-3\mathbf{r} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2}$ uma vez que $r \ll R$. Dessa forma a expressão geral para a força de maré em um ponto arbitrário D próximo da Terra fica:

$$\mathbf{F}_D \approx -G \frac{mM_{sol}}{R^3} \left[\mathbf{r} - 3\mathbf{R} \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})}{R^2} \right]. \quad (\text{A.18})$$

Se esta expressão for realmente geral, precisamos obter a partir desta os resultados (A.12) e (A.14). Considerando os pontos A , B e Z , N da figura A.25, tem-se que nos pontos A e B , \mathbf{r} é perpendicular a \mathbf{R} e, portanto, o produto escalar $\mathbf{R} \cdot \mathbf{r}$ é zero na expressão (A.18). Nesses dois pontos a força de maré é oposta a \mathbf{r} , ou seja, verticalmente para baixo e sua magnitude é igual a $\left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r$, como em (A.12). Nos pontos Z e N , a força de maré é dirigida ao longo de \mathbf{r} , isto é, verticalmente para cima e sua magnitude é dada por $2 \left(\frac{GmM_{sol}}{R^3} \right) r$, ou seja, o dobro da força nos pontos A e B como mostrado em (A.14). Portanto, vemos que para os quatro pontos citados a expressão geral (A.18) está de acordo com os resultados obtidos anteriormente (BUTIKOV, 2002).

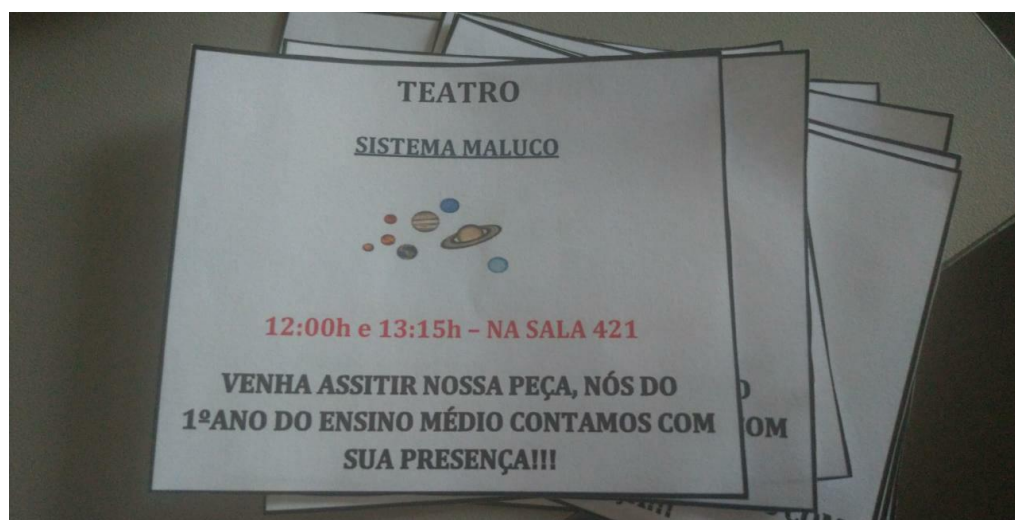
Para saber mais sobre as forças de maré induzidas pelo Sol e pela Lua e a influência do movimento de rotação da Terra nas mesmas recomendamos a leitura de Arons (1979), Butikov (2002) e Galili e Lehavi (2003).

A.3 A PEÇA DE TEATRO: “SISTEMA MALUCO”

A peça de teatro “Sistema Maluco” consiste de encenações acerca dos movimentos do Sol, da Terra e da Lua. O roteiro foi escrito para os estudantes representarem os movimentos de rotação e translação da Terra e da Lua, considerando a Terra no centro do sistema planetário para representar o sistema geocêntrico, e em outro momento, o Sol no centro do sistema para representar o sistema heliocêntrico. É possível mostrar que o Sol ocupa um dos focos da trajetória elíptica que a Terra descreve ao seu redor e explicar os pontos afélio e periélio, os solstícios e equinócios de inverno e verão. As encenações também podem ser conduzidas com a finalidade de responder perguntas como o porquê de não se ver o Sol e as estrelas ao mesmo tempo, o porquê de a Lua mostrar sempre a mesma face para a Terra, as fases da Lua, os eclipses solares e lunares e o porquê de não ocorrerem eclipses em todas as Luas novas e cheias.

A peça teatral foi escrita em uma linguagem acessível para qualquer público, podendo ser conduzida pelo professor em sala de aula para os alunos apenas, como uma atividade disciplinar, por exemplo, ou para um público geral em feiras de ciências, festividades da escola ou mesmo da cidade em que o professor e os alunos residem. A divulgação da peça pode ser feita conforme a disponibilidade de recursos da escola através de panfletos, como o apresentado na figura A.27, ou meios digitais, como redes sociais, site da escola, entre outros.

Figura A.27 – Exemplo de divulgação da peça de teatro “Sistema Maluco” através de um panfleto mostrando o horário e o local do espetáculo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.3.1 Sobre os Ensaios da Peça e a Escolha do Figurino

Os ensaios da peça podem ser realizados em horários contrários às aulas. O conteúdo apresentado na peça “Sistema Maluco” foi dividido em 9 esquetes, que consistem em peças de curta duração. Esta estratégia foi adotada para facilitar o estudo e a descrição do conteúdo pelos estudantes e também os ensaios. O número necessário de ensaios para cada esquete deve ser estabelecido pelo(a) professor(a), conforme o entendimento e a evolução dos alunos com relação aos temas trabalhados para cada esquete.

Para facilitar para os alunos, nos ensaios iniciais o(a) professor(a) pode desenhar no chão com giz de cera uma elipse para representar a eclíptica. Sugerimos que cada esquete seja ensaiada independentemente, sendo anunciada pelo apresentador antes dos estudantes-atores entrarem em cena. O papel do apresentador é muito importante, porque ele situa o público historicamente sobre o que será apresentado e introduzir o conteúdo de cada cena (esquete).

Sugerimos também que os ensaios sejam gravados para que análises sejam feitas pelos alunos e pelo(a) professor(a) com relação ao tempo de fala, performance dos alunos no palco e a forma como o conteúdo está sendo descrito, para a realização de melhorias na peça.

Para cada esquete o(a) professor(a) e os alunos podem escolher trilhas sonoras temáticas para auxiliar a envolver o público no assunto abordado. Por exemplo, nós escolhemos a música *The Dark Side of the Moon* (O lado escuro da Lua) da banda britânica Pink Floyd para a cena em que a personagem Lua fica girando em torno dela mesma e da Terra, mostrando sempre a mesma face para a Terra.

Com relação ao figurino sugerimos que sejam utilizados materiais de baixo custo, como tecidos nas cores amarelo para o Sol, azul para a Terra, branco para as Luas e vermelho para os planetas. O cenário pode ser feito com uma cortina de elanquinha preta, grande o suficiente para ilustrar o firmamento, na qual as estrelas, feitas de cartolina de diferentes cores, podem ser coladas com fita adesiva. Para ilustrar melhor o plano orbital da Lua para a explicação dos eclipses, pode-se utilizar uma placa de isopor no formato de disco pintada na cor desejada ou outro material equivalente. Este deve ser utilizado como um colar pela personagem Terra, para evidenciar a inclinação do plano orbital da Lua, veja foto apresentada na figura A.28.

Figura A.28 – Personagem Terra utilizando “colar” de isopor para ilustrar a inclinação do plano orbital da Lua.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.3.2 Luz, Física, Ação: Esquetes da Peça Teatral

A duração da peça de teatro com os temas apresentados neste produto educacional é estimada em aproximadamente 30 minutos, mas pode ser estendida conforme o desejo do(a) professor(a).

Esquete 1: Apresentando o “Sistema Maluco” e o Modelo Geocêntrico

No início da peça o narrador cumprimenta o público e apresenta o “Sistema Maluco”, Terra, Lua, Sol e os planetas do sistema solar, tendo como primeira abordagem o modelo geocêntrico de Ptolomeu. As falas de cada personagem são apresentadas abaixo em negrito.

Narrador: Bom dia senhoras e senhores, sejam todos muito bem vindos ao nosso teatro. Através de uma maneira lúdica iremos encantá-los com nossas encenações acerca da Física, em particular sobre tópicos de Astronomia. Gostaria de deixar claro a todos que nosso referencial é um observador no hemisfério sul da Terra. A observação do firmamento foi talvez a atividade mais prazerosa das civilizações de eras passadas. O primeiro sistema planetário foi o sistema geocêntrico proposto pelo astrônomo e geógrafo grego Cláudio Ptolomeu, que viveu no início da era cristã (século II).

Terra: (entra e se posiciona no centro do palco) Eu sou a Terra e ocupo o centro do Universo.

Lua: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou a Lua e giro em torno da Terra.

Sol: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou o Sol e giro em torno da Terra.

Planetas: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra) Eu sou os Planetas e giramos em torno da Terra.

Terra: (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas.

Saem do palco os Planetas, o Sol e a Lua nesta ordem, girando no sentido horário em torno da Terra e por último sai a Terra.

Esquete 2: O Modelo Heliocêntrico

Narrador: Depois de quatorze séculos, ou seja, século XVI o astrônomo e matemático polonês Nicolau Copérnico propôs o sistema heliocêntrico, ideia já proposta na Grécia antiga por Aristarco de Samos (século III a.C.), porém rejeitada por outros astrônomos gregos.

Sol: (entra e se posiciona no centro do palco) Eu sou o Sol e ocupo o centro do Universo.

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou a Terra e giro em torno do Sol.

Lua: (entra e gira no sentido horário ao redor da Terra, e esta gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou a Lua e giro em torno da Terra, que gira em torno do Sol.

Planetas: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol) Eu sou os Planetas e giramos em torno do Sol.

Sol: (olhando e gesticulando para cima) E no firmamento encontram-se as estrelas fixas.

Saem do palco os Planetas, a Lua e a Terra nesta ordem, girando no sentido horário em torno do Sol e por último sai o Sol.

Esquete 3: A Órbita da Terra

Narrador: No século XVII, Johannes Kepler, astrônomo, astrólogo e matemático alemão analisando os dados compilados por Tycho Brahe, astrônomo dinamarquês, percebeu

que as órbitas dos planetas em torno do Sol não eram circulares e o Sol não ocupava o centro do Universo.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica) Eu sou o Sol e ocupo um dos focos da eclíptica.

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Periélio) Eu sou a Terra e giro em torno do Sol descrevendo uma órbita elíptica.

Terra: Sol, você sabia que esta é a menor distância entre mim e você?

Sol: Não, como você sabe?

Terra: É simples, esta posição se chama Periélio. (Terra se move no sentido horário para o Afélio e pergunta para o Sol) E agora você sabe qual é esta posição?

Sol: O nome eu não sei, mas sei que é a maior distância entre mim e você.

Terra: Muito bem, esta posição se chama Afélio.

Terra: (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Periélio e diz ao Sol) Sol, minha velocidade aqui é de 30,2 km/s.

Terra: (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol e se posiciona no Afélio e diz ao Sol) Agora estou com uma velocidade de 29,3 km/s.

Sol: Nossa! que loucura! Eu pensei que sua velocidade era constante e seu movimento uniforme.

Terra: Não, não, não, meu movimento é variado. Ao aproximar de ti, minha velocidade aumenta e ao afastar de ti, minha velocidade diminui.

Sol: (O Sol encabulado pergunta para a Terra) Mas por que que isso acontece?

Terra: Porque você me atrai e eu te atraio com uma força de mesma intensidade e sentidos opostos, chamada força gravitacional. (A Terra gira no sentido horário ao redor do Sol com os braços esticados em direção aos braços esticados do Sol, quando a Terra passar pelo Periélio estará de mãos dadas com o Sol e passará mais rápido).

Terra e Sol saem do palco.

Esquete 4: Os Dias e as Noites

Narrador: Por que existem os dias e as noites? Por que não vemos as estrelas durante o dia? Questões interessantes, não é!?

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e gira no sentido horário ao redor do Sol e de si mesma).

Sol: Está louca, Terra!? Por que está girando?

Terra: Sol você sabe por que existem os dias e as noites?

Sol: Não, nunca pensei nisso!

Terra: Se você reparar sempre tem um lado meu que você está iluminando e outro não. O lado iluminado é o dia e o outro a noite.

Sol: E como isso acontece?

Terra: Enquanto eu giro em torno de você, giro em torno do meu próprio eixo. Este é chamado de movimento de rotação.

Sol: E qual é o período deste movimento?

Terra: O período é de 24 h, ou seja, tempo para eu te ver novamente.

Sol: Ah! Agora eu entendi! É o famoso dia solar. Mas espera aí! O que é mesmo um dia solar? E qual é a diferença do dia sideral?

Terra: O dia solar é em relação a você e o dia sideral em relação às estrelas do firmamento.

Sol: Terra, por gentileza, você pode encenar para eu entender melhor?

Terra: Sim, claro! Está vendo aquela estrela vermelha (aponta para a estrela), (A Terra gira entorno do seu próprio eixo) o tempo que eu demorar para vê-la novamente é a duração do dia sideral.

Sol: E qual é esta duração?

Terra: O dia sideral é de 23h56min4s, ou seja, é um pouco menor que o dia solar.

Terra: Sol, agora sou eu que tenho uma dúvida?

Sol: Fala, minha querida Terra!

Terra: Por que não vemos as estrelas do firmamento durante o dia?

Sol: Muito simples, sendo eu uma estrela tão bela, tão intensa e estando mais próxima de você do que das outras, meu brilho ofusca as demais estrelas.

Terra: Deixa me ver se eu entendi! (A Terra gira entorno do seu próprio eixo) Quando eu estou girando em torno do meu eixo, vejo você nascer, passo o dia contigo e depois você se põe e eu começo a enxergar as estrelas.

Sol: Isso mesmo, Terra, você é linda e muito inteligente. Vamos tomar um cafezinho? (Terra e Sol saem do palco).

Esquete 5: As Estações do Ano

Narrador: Em nosso país temos as quatro estações do ano bem definidas, mas o que define essas estações? Dia e noite sempre têm a mesma duração?

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terras: (entram e se posicionam nos solstícios e equinócios. Cada uma das quatro Terras com um cabo de vassoura perpendicular a eclíptica e formando um ângulo de 23,5° com este cabos).

Sol: Por que vocês estão inclinadas?

Terra: Se eu não estivesse inclinada de 23,5° em relação à vertical que passa pela minha órbita, não existiriam as estações do ano.

Sol: Nossa! Que máximo!

Terra: Não é!? Vou explicar. Nesta posição que me encontro é 21 de março.

Terra 1: Nesta posição em que me encontro é 22 de junho.

Terra 2: Nesta posição em que me encontro é 23 de setembro.

Terra 3: Nesta posição em que me encontro é 22 de dezembro.

Sol: Para, para, para tudo! Não estou entendendo mais nada, o que que tem a ver essas posições com as estações do ano?

Terra: Calma, relaxa, eu vou explicar!

Terra: (fala para o público) Pessoal vocês já sabem que eu sou inclinada, não vou ficar assim o tempo todo, ok!?! (Terras 1, 2 e 3 saem de cena).

Terra: Vamos lá, aqui em 21 de março ocorre o equinócio, o dia e a noite têm mesma duração, e é o início do outono.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de solstício de inverno) Aqui em 22 de junho ocorre o solstício de inverno, a noite é mais longa do que o dia, e é o início do inverno.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de equinócio) Aqui em 23 de setembro ocorre o equinócio, o dia e a noite têm mesma duração, e é o início da primavera.

Terra: (gira no sentido horário até a posição de solstício de verão) Aqui em 22 de dezembro ocorre o solstício de verão, o dia é mais longo do que a noite, e é o início do verão.

Sol: (Sol bate palmas para a Terra) Você é o meu planeta favorito adoro te aquecer! Agora vem comigo, vamos passear pela nossa galáxia, a maravilhosa Via Láctea.

Sol e Terra saem do palco.

Esquete 6: O Lado Escuro da Lua

Narrador: *The Dark Side of the Moon* (O lado escuro da Lua) é o oitavo álbum de estúdio da banda britânica de rock progressivo Pink Floyd, lançado em 1 de março de 1973. Que conceito físico está implícito no nome desse álbum?

Terra: (entra e se posiciona no centro do palco)

Lua: (entra e gira no sentido horário em torno da Terra e dela mesma sempre mostrando a mesma face para a Terra).

Terra: (faz cara de estranheza) Que bicho te mordeu!? Por que você não para de me olhar?

Lua: Não sei por que está me perguntando isso! Lembra de Theia? Aquele planeta com o tamanho aproximadamente igual ao de Marte, que chocou-se contra você e me afastou de ti. Desde então, giro em torno de ti.

Terra: Nossa! É verdade! Já faz tanto tempo que eu nem me lembrava.

Lua: Se não me falha a memória eu nasci 100 milhões de anos depois de seu nascimento. Lembrando que você nasceu aproximadamente a 4,6 bilhões de anos atrás.

Terra: Que memória de elefante, hein menina Lua!

Lua: Mamãe, eu não acredito que você nunca reparou que eu sempre mostro a mesma face para você.

Terra: Filhinha querida! Mamãe já está na meia idade, não me lembrava desse detalhe.

Lua: Tudo bem, mamãe, relaxa! Vou explicar para você: - o tempo que eu gasto para dar uma volta em torno de ti é o mesmo que eu gasto para dar uma volta em torno do meu próprio eixo.

Terra: Em outras palavras, os seus períodos de translação e rotação são coincidentes e têm duração de aproximadamente 28 dias.

Lua: (bate palmas) Isso mesmo, mamãe querida! Agora vamos aproveitar e ensinar tudo isso para o Sol.

Lua e Terra saem do palco dançando e cantando.

Esquete 7: As Fases da Lua e as Marés

Narrador: As fases da Lua referem-se à mudança aparente da porção visível iluminada do satélite devido a sua variação da posição em relação à Terra e ao Sol.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e se posiciona no Periélio)

Lua Nova: (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Nova e só apareço durante o dia, pois estou entre o Sol e a Terra. Sou responsável pelas maiores marés.

Lua Cheia: (entra e se posiciona em cima de um banquinho na órbita lunar, a Terra fica entre Lua Cheia e o Sol) Olá, muito prazer eu sou a Lua Cheia e clareio as noites escuras. E também sou responsável pelas maiores marés.

Sol: Muito bem! Eu gostaria de saber por que que vocês são responsáveis pelas maiores marés?

Lua Nova: Pense comigo, se eu me encontro entre você e a Terra, unimos nossas forças e o resultado são as maiores marés altas e as menores marés baixas. Essas marés são denominadas marés vivas ou de sizígia.

Sol: O que é Sizígia?

Lua Cheia: É uma palavra grega que significa ficar na mesma linha, ou seja, Sol, Terra e Lua alinhados.

Lua Cheia: Como estamos alinhados, eu e você Sol, unimos também nossas forças e o resultado são as marés de sizígia.

Sol: Interessante essa tal de Sizígia, hein!

Lua Crescente: (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à direção da reta que une o Sol e a Terra) Olá, muito prazer eu sou a Lua Crescente e tenho a forma da letra C. Sou a melhor fase para ser observada e sou responsável pelas marés de quadratura.

Lua Minguante: (entra e se posiciona na órbita lunar em direção perpendicular à reta que une o Sol e a Terra, oposta a posição da Lua Crescente) Olá, muito prazer eu sou a Lua Minguante e tenho a forma da letra D. E também sou responsável pelas marés de quadratura.

Sol: Ok! Agora eu gostaria de saber o que são as marés de quadratura e por que vocês são responsáveis?

Lua Crescente: São as menores marés altas, que são um pouco maiores que as marés baixas, ou seja, pequena diferença entre elas.

Lua Minguante: E tem mais, devido ao fato de não estarmos alinhadas, não somamos forças, com isso resulta-se as marés mortas ou de quadratura.

Sol: Suspeitei desde o princípio!

Saem do palco girando em sentido horário a Lua Nova, a Lua Minguante, a Lua Cheia, a Lua Crescente, a Terra e o Sol, nesta ordem.

Esquete 8: Eclipse Lunar

Narrador: Eclipse é uma palavra do grego antigo que quer dizer deixar para trás. Os eclipses assombravam muitas pessoas no passado, por elas ignorarem suas causas. Hoje sabemos que os eclipses ocorrem quando Sol, Terra e Lua se alinham.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra e se posiciona no Periélio).

Lua Nova: (entra e se posiciona de joelhos na órbita lunar entre o Sol e a Terra).

Terra: (pergunta para o Sol) Sol, não deveria estar ocorrendo um eclipse solar?

Sol: É mesmo! Pois a Lua Nova está entre mim e você.

Lua Nova: (explica para o Sol e para a Terra) Pois bem, embora eu esteja entre vocês, não estamos alinhadas.

Sol: Como assim?

Lua Nova: Vou explicar, dei-me licença. (sai e volta com o colar de isopor) Na verdade o plano da minha órbita é inclinado de $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra.

Sol: Então quer dizer que não vão mais ocorrer eclipses?

Terra: Não é isso Sol! O que a Lua Nova quis dizer é que precisamos estar alinhadas para ocorrer o eclipse.

Lua Nova: Isso mesmo Terra!

Sol: E quando vamos estar alinhadas?

Terra gira no sentido horário, Lua Nova sai, entra Lua Crescente e depois sai, entra Lua Cheia e se alinha com o Sol e a Terra.

Terra: Sol, sei que hoje eu, você e a Lua Cheia estamos alinhadas, mas não estou vendo a Lua Cheia (Terra gira em torno do seu eixo no sentido horário procurando a Lua Cheia).

Sol: É claro que não está vendo, ela está eclipsada! E tem mais, este eclipse é total para todo observador situado no seu lado não iluminado.

Terra: Entendi! Este é o eclipse lunar, agora só falta o eclipse solar.

Saem do palco a Lua Cheia, a Terra e o Sol.

Esquete 9: Eclipse Solar

Narrador: Devido à inclinação de $5,2^\circ$ da órbita da Lua em relação à órbita da Terra, os eclipses não ocorrem em todas as Luas Novas e Cheias.

Sol: (entra e se posiciona em um dos focos da eclíptica).

Terra: (entra com o colar de isopor e se posiciona no Periélio).

Lua Nova: (entra e se posiciona próximo ao colar de isopor da Terra entre o Sol e a Terra).

Terra: Nossa! Que máximo! O Sol sumiu totalmente, o dia virou noite e as galinhas foram para o galinheiro dormir.

Sol: Não sumi não! É a Lua Nova que está me escondendo, pois estamos alinhadas, eu, você e a Lua Nova.

Lua Nova: Acho que agora vocês entenderam o porquê dos eclipses não ocorrerem em todas as Luas Novas e Cheias.

Terra: Sim, minha filhinha! Agora está tudo esclarecido.

Sol: Que bom é estar, ficar e brincar com vocês, o universo é do tamanho do nosso conhecimento!

Saem do palco a Lua Nova, a Terra e o Sol.

Entram todos e agradecem.

O espetáculo é finalizado com o elenco agradecendo ao público.

A.4 QUESTIONÁRIO SUGESTIVO

Nesta seção apresentamos de maneira sugestiva algumas perguntas e respostas para auxiliar o(a) professor(a) a trabalhar os conceitos de Física após a apresentação da peça teatral, principalmente com os alunos que não participaram da peça como estudantes-atores. Este procedimento pode ser útil para acompanhar a evolução destes alunos com relação ao tema abordado. As respostas fornecidas são simples e resumidas. O(a) professor(a) pode torná-las mais elaboradas conforme a necessidade ou o interesse dos alunos pelo tema.

1. Qual a forma geométrica do Sol, da Terra e da Lua?

Resposta: Para os nossos olhos os três corpos celestes parecem esferas perfeitas. Na realidade, dentre os três corpos celestes, o Sol possui a forma geométrica mais próxima de uma esfera perfeita. A Terra e a Lua são dois exemplos de esferoides oblatos. Isso significa que elas possuem a forma de uma bola levemente murcha. Contudo, podemos dizer que a Terra e a Lua possuem formato esférico em boa aproximação.

2. *Existem evidências que mostram que a Terra é esférica?*

Resposta: Há 2.500 anos a maioria dos filósofos gregos acreditavam que a Terra era redonda e não plana. Nesta época Pitágoras foi um dos primeiros a propor uma Terra esférica, principalmente por motivos estéticos, sem qualquer evidência física direta. Em torno de 250 anos antes de Cristo, ou seja, há mais de 2.200 anos, Eratóstenes mediu a circunferência da Terra através da distância entre as cidades de Siena e Alexandria e considerando a projeção da sombra de uma vareta ao meio dia no solstício de verão estimando o valor de 38.600 a 46.600 km para a circunferência da Terra. Hoje sabemos que este valor é de aproximadamente 40.000 km. Pelas limitações da época com relação à medidas de distância, o resultado de Eratóstenes é considerado como um dos primeiros grandes triunfos do cálculo científico. Com apenas uma medida não podemos dizer que a Terra é esférica, esta poderia ser uma calota. Mas se fizermos várias medidas em diferentes regiões do planeta teremos uma evidência clara da esfericidade do planeta. Dentre outras evidências podemos citar o desaparecimento progressivo de navios no horizonte, assim como a própria existência do horizonte, as estrelas no firmamento não são as mesmas para todas as regiões do planeta, o amanhecer e o anoitecer, assim como a duração dos dias e das noites, são diferentes em diferentes lugares do planeta. A existência de fuso horários, diferenças de estações do ano ao longo do planeta. Com o uso das tecnologias atuais a esfericidade da Terra pode ser comprovada pela exploração espacial através de espaçonaves e balões atmosféricos que possibilitam tirar fotos do planeta, o uso de sistemas de navegação, como o GPS, planos de voos, navegação marítima, entre outros.

3. *Qual corpo celeste ocupa o centro do sistema solar, o Sol, a Terra ou a Lua?*

Resposta: O Sol.

4. *O Sol, a Terra e a Lua estão parados?*

Resposta: Não, estes estão em movimento de translação, com o Sol orbitando o centro da nossa galáxia, a Via Láctea, a Terra orbitando o Sol e a Lua orbitando a Terra. Estes também possuem movimento de rotação em torno de seus próprios eixos.

5. *Quais são os dois grandes sistemas planetários estudados?*

Resposta: Geocentrismo e Heliocentrismo.

6. *Quais são os movimentos da Terra?*

Resposta: Translação, Rotação e Precessão.

7. *Porque existem os dias e as noites como as conhecemos?*

Resposta: Por causa do movimento de rotação da Terra.

8. *O que é dia solar? Qual é a duração?*

Resposta: Este ocorre quando a Terra completa uma volta em torno do seu eixo em relação ao Sol e possui um período de aproximadamente 24 h, variando durante o ano devido a órbita elíptica da Terra e de sua inclinação.

9. *O que é dia sideral? Qual é a duração?*

Resposta: Este ocorre quando a Terra completa uma volta em torno do seu eixo em relação às estrelas do firmamento, considerando estas fixas devido à distância, possuindo um período de 23h56min4s.

10. O que é dia lunar? Qual é a duração?

Resposta: Este ocorre quando a Terra completa uma volta em torno do seu eixo em relação à Lua e possui um período de 24h50min28s.

11. A velocidade de translação da Terra é constante?

Resposta: Não, esta aumenta ao se aproximar do Sol e diminui ao se afastar do mesmo, em concordância com a lei das áreas de Kepler.

12. Por que a velocidade de translação da Terra aumenta ao aproximar-se do Sol?

Resposta: Devido ao princípio da conservação do momento angular da Terra.

13. Quais são as estações do ano? Qual é a duração de cada estação?

Resposta: Primavera, Verão, Outono e Inverno e tempo de duração das mesmas é 3 meses. Em países da zona tropical da Terra, como o Brasil, apenas duas estações são bem definidas, verão e inverno.

14. Qual é a causa das estações do ano?

Resposta: O movimento de translação da Terra e sua inclinação.

15. Qual é a inclinação da Terra?

Resposta: A Terra possui 23,5° entre o seu eixo de rotação e a reta normal ao plano de sua órbita elíptica.

16. Os dias e as noites sempre têm a mesma duração? O que são solstícios e equinócios?

Resposta: Não, estes variam durante o ano. Os solstícios ocorrem no primeiro dia de verão e de inverno. No Solstício de Verão o dia é mais longo e no Solstício de Inverno a noite é mais longa. Os equinócios ocorrem no primeiro dia da primavera e do outono. Nos Equinócios de primavera e outono, os dias e as noites têm a mesma duração.

17. Por que vemos sempre a mesma face da Lua? Qual é o período de translação da Lua? Qual é o período de rotação da Lua?

Resposta: Porque a Lua apresenta períodos de translação e rotação coincidentes, de aproximadamente 28 dias.

18. Quais são as fases da Lua?

Resposta: Nova, Crescente, Cheia e Minguante.

19. O que são as marés? Quais os tipos de marés que existem?

Resposta: Estas são observadas pelo fluxo e refluxo das águas do mar devido aos efeitos combinados da rotação da Terra com as forças gravitacionais exercidas pela Lua e pelo Sol em nosso planeta. As marés podem ser classificadas em semidiurna, diurna e mista.

20. Quantos períodos de marés ocorrem ao longo do dia?

Resposta: Para a maré mais comum, a semidiurna, são quatro períodos de marés, dois de maré alta e dois de maré baixa. Para a maré diurna são dois períodos de marés, alta e baixa, e para a maré mista são quatro períodos de marés, com dois de maré alta e dois de maré baixa. Porém, neste caso a diferença de altura entre as marés é maior.

21. O que são marés de Sizígia? Quando ocorrem as marés de Sizígia?

Resposta: São as maiores marés altas e as menores marés baixas que existem e ocorrem quando o Sol, a Terra e a Lua estão alinhados.

22. O que são eclipses solar e lunar?

Resposta: No eclipse solar o Sol desaparece parcial ou totalmente quando a Lua encontra-se entre o Sol e a Terra. No eclipse lunar a Lua desaparece parcial ou totalmente quando a Terra encontra-se entre o Sol e a Lua.

23. Por que os eclipses não ocorrem em todas as Luas cheias e novas?

Resposta: Por causa da inclinação do plano da órbita da Lua em relação à órbita da Terra, fazendo com que os três astros, Sol, Terra e Lua, não fiquem alinhados em todas as Luas cheias e novas.

24. Qual é a inclinação do plano da órbita da Lua em relação à órbita da Terra?

Resposta: Em torno de $5,2^\circ$.

Estas perguntas e respostas, além de fornecerem vários dos conceitos científicos abordados na peça teatral “Sistema Maluco”, podem ajudar o professor nos ensaios das esquetes.