

EXPERIMENTO DIDÁTICO DE MEDIÇÃO DA CIRCUNFERÊNCIA DA TERRA.

Levi O. de A. Azevedo^{1*}, Orlando S. Ribeiro², Natanael C. Costa¹, Elis H. C. P. Sinnecker¹, Miriam Gandelman¹

1. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

2. Secretaria de Educação do Estado do Piauí

Resumo

Neste trabalho, medimos o raio da Terra reproduzindo o histórico experimento de Eratóstenes, realizado por volta de 235 a.C., nas antigas cidades de Siena e Alexandria [1]. Aqui, por sua vez, obtemos as medidas nas cidades do Rio de Janeiro - RJ - Brasil e Teresina - PI - Brasil, que possuem aproximadamente a mesma coordenada longitudinal, de forma simultânea, medindo a inclinação dos raios solares sobre a superfície da Terra quando o Sol está no ponto mais alto do céu. Utilizando dados de satélites para a determinação da distância (latitude) entre as cidades, e medindo a diferença dos seus respectivos ângulos em nosso aparato, estimamos o raio médio da Terra com um erro de 0.49% em relação aos valores da literatura.

A partir da diferença do horário em que o Sol fica a pino em cada cidade, podemos também calcular a pequena diferença longitudinal entre as duas localidades e, conseqüentemente, determinar a velocidade angular de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo. Isto é, apresentamos, de forma didática e simples, como obter a curvatura média do planeta, cuja superfície possui uma forma aproximadamente esférica, além da sua velocidade de rotação. Os resultados obtidos estão em bom acordo com os valores da literatura.

Palavras-chave: Raio da Terra; Eratóstenes; Experimentos didáticos

Introdução

A divulgação científica é um tema de grande importância, principalmente na atualidade, com a crescente onda de pseudociências e negacionismo que levantam as falsas dúvidas sobre conhecimentos já estabelecidos. Por exemplo, grupos terraplanistas têm ganhado destaque nas mídias sociais, o que é preocupante não apenas de um ponto de vista científico, mas também educacional. Uma ampla divulgação das ciências básicas e suas implicações no cotidiano da humanidade pode evitar a evolução desses grupos, além de motivar jovens a estudarem e, eventualmente, desenvolver as ciências. Neste contexto, a revisitação de experimentos históricos têm um papel crucial, apresentando de forma didática as etapas da construção do conhecimento e exibindo o Método Científico.

A medição do raio da Terra, feito por Eratóstenes por volta de 240 a.C. é um dos experimentos históricos mais conhecidos. A partir da leitura de documentos presentes na biblioteca de Alexandria, Eratóstenes levantou a hipótese de que a superfície da Terra possuía uma curvatura, i.e. não poderia ser plana. Motivado pelas idéias de formas perfeitas e simétricas dos gregos antigos, ele propôs que o planeta teria uma forma esférica e elaborou um experimento para medir o seu raio. O experimento baseia-se em argumentos de geometria, consistindo em determinar o ângulo de incidência dos raios solares a partir de medidas das sombras de hastes em duas cidades com latitudes diferentes, Alexandria e Siena (atual Assuã, no Egito). A diferença dos ângulos medidos entre as cidades confirmou as expectativas de uma superfície curva, e usando apenas argumentos de trigonometria básica, Eratóstenes determinou o raio e a circunferência da Terra, cujos valores são compatíveis com as medidas atuais.

O Museu Interativo da Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LADIF-UFRJ) é um museu científico que se dedica à divulgação de Física e História da Física, tendo como público alvo principal estudantes do ensino fundamental e médio. Tendo em vista a importância do tema “divulgação científica” e o estimulante resultado obtido por Eratóstenes, buscamos reproduzir seu experimento de forma didática, realizando algumas modificações, onde pudemos determinar a partir das medidas e dados de satélite o raio da Terra e sua velocidade de rotação.

Metodologia

O experimento foi realizado no dia 20 de fevereiro de 2020, a partir de medidas obtidas simultaneamente nas cidades do Rio de Janeiro-RJ e Teresina-PI, cuja distância (de latitude) é de aproximadamente 1980 km segundo dados de satélite fornecidos pelo Google Maps. Os materiais utilizados foram: um fio de prumo; um tubo fino de caneta; uma mesa baixa de suporte; uma trena; uma cartolina; uma bússola.

Passamos o fio de prumo por dentro do tubo de caneta, que, por sua vez estava preso à mesa de suporte a uma altura que determinamos com a trena. Mantendo a altura e posição do tubo sempre fixas, pudemos determinar a distância entre a sombra da ponta do tubo de caneta até a projeção do fio de prumo, marcando tais distâncias na cartolina fixa ao chão. A utilização de um tubo de caneta com o fio de prumo reduz

incertezas associadas à utilização de uma haste, tanto em relação à sua inclinação vertical quanto à espessura de sua sombra. O procedimento que adotamos é análogo ao utilizado por Eratóstenes, mas com a utilização de um fio de prumo.

Determinar o momento exato em que o Sol está a pino é um problema não trivial. Ademais, devido à distância longitudinal não desprezível entre as duas cidades, os seus instantes de Sol a pino também não são simultâneos. Para superar essas dificuldades, realizamos não apenas uma única medida de tamanho de sombra, mas várias entre as 11:10h e 13:00h, com intervalos de 5 a 10 minutos. Esse procedimento nos permitiu analisar os dados dos tamanhos de sombra como função do tempo a partir de um ajuste por uma hipérbole, onde o ponto de distância mínima determina o exato momento do Sol no ponto mais alto no céu para as duas cidades. Determinamos o tamanho da sombra no Sol a pino e o instante de sua ocorrência em cada cidade via um pós-processamento de dados em softwares como *Qtiplot*, *OriginLab* ou *Mathematica*.

De posse desses dados (sombra mínima e altura do suporte), e por meio de cálculos de trigonometria básica, obtivemos os ângulos de incidência em cada localidade. É importante mencionar que, com o uso de bússolas, verificamos que (nesta época do ano) as sombras na cidade do Rio de Janeiro são projetadas para o Sul, enquanto em Teresina, estão para o Norte, de modo que devemos levar isso em consideração na determinação do ângulo total. Dessa forma, o arco de 1980 km formado entre as cidades é referente ao ângulo θ igual à soma dos ângulos de incidência dos raios do Sol sobre as cidades. Podemos então determinar o raio da Terra resolvendo a expressão $\theta \cdot R = 1980 \text{ km}$, cujo resultado será apresentado e discutido na próxima seção.

A velocidade angular de rotação da Terra foi determinada a partir da diferença de tempo Δt entre os instantes de Sol a pino de cada cidade obtido com o pós tratamento dos dados. Utilizando dados de satélite para determinar a distância em ângulo longitudinal ϕ entre as cidades, determinamos a velocidade de rotação ω resolvendo $\omega = \phi/\Delta t$.

Resultados e Discussão

A medida para o ângulo de incidência dos raios solares no Rio e em Teresina foram respectivamente $(12,41 \pm 0,06)^\circ$ e $(5,3 \pm 0,1)^\circ$. Devido a medida ter sido feita durante o final do verão no hemisfério Sul, observamos com o auxílio das bússolas que a sombra do tubo no Rio de Janeiro é projetada para o Sul, enquanto a sombra observada em Teresina é projetada para o Norte. Dessa forma, o arco formado entre as cidades têm um ângulo total igual à soma dos ângulos medidos, ou seja, $(17,7 \pm 0,1)^\circ$. A partir desse ângulo e da distância entre as cidades, medimos o raio da Terra fazendo $\theta \cdot R = 1980 \text{ km}$. Obtivemos o resultado de $6402 \pm 45 \text{ km}$ que possui uma discrepância relativa de 0.49% em relação ao valor aceito para o raio médio da Terra, de 6371 km [2].

A partir do tratamento dos dados, observamos que há um atraso de 1 minuto e 24 segundos entre o horário de Sol a pino no Rio de Janeiro em relação à Teresina, correspondente à medida de (0.35 ± 0.08) de diferença em longitude, onde o Rio de Janeiro está mais a oeste (Sol fica a pino mais tarde). O valor obtido com a ferramenta Google Maps é de $0,38^\circ$.

Utilizando a distância longitudinal obtida com o Google Maps e o atraso de 1 minuto e 24 segundos medido no experimento, obtivemos uma medida para a velocidade angular da Terra de $(0,28 \pm 0,04) \text{ Rad/h}$. Esse resultado é próximo do valor aceito, calculado como $\frac{2\pi}{24h} \approx 0,262 \text{ rad/h}$.

Conclusões

A elaboração do experimento tem um alto potencial didático e podem ser ensinadas técnicas de medição, elaboração de gráficos, montagem de um aparato experimental e outras importantes habilidades necessárias ao desenvolvimento científico. A realização de medidas em dias diferentes permite a observação também da variação do ângulo de inclinação e como ele varia com o passar dos dias.

Os resultados obtidos possuem bom acordo com os valores aceitos mundialmente (Raio da Terra) e com os valores medidos a partir de ferramentas de localização global, utilizadas pelo sistema do Google Maps (distância longitudinal).

Podemos utilizar o experimento para introduzir aos estudantes o método científico e o conceito de observação da natureza, além de ser uma excelente ferramenta interdisciplinar, possibilitando o estudo de história, geografia, física, matemática e filosofia. A partir do experimento também é possível fazer divulgação científica, desmistificando a ciência e influenciando no engajamento de jovens no meio científico.

Devido ao experimento ter necessidade de ser realizado em cidades diferentes também possibilita que escolas de cidades distintas troquem informações e experiências, além de também os estudantes envolvidos poderem ampliar seu conhecimento.

Referências bibliográficas

[1] – Paul G. Hewitt, *Conceptual Physics*, 11th ed. (Pearson, 2009).

[2] – McCarthy and Petit, 2004, "IERS Conventions (2003)," IERS Technical Note No. 32, Frankfurt: Bundesamts fur Kartographie und Geodasie.