

Material Suplementar para “Algoritmo de Refração: Uma proposta didática para investigação do problema de minimização do tempo”

Anexo A - Sequência Didática: Uma Abordagem Computacional do Princípio de Fermat.

Este anexo propõe uma atividade voltada a estudantes de graduação em Física, Matemática e Engenharias, com foco na simulação computacional do fenômeno da refração da luz. Com base no Princípio de Fermat, o algoritmo desenvolvido permite investigar trajetórias luminosas em diferentes meios, promovendo a integração de conceitos físicos, matemáticos e computacionais.

A proposta estimula a conexão entre teoria e prática por meio da análise de tempos de percurso e da manipulação de parâmetros, favorecendo a compreensão dos fenômenos naturais e o uso de tecnologias no ensino. Tomando como referência o algoritmo apresentado no Anexo C, este material oferece um roteiro prático para aplicação didática, acompanhado de questionamentos orientadores que ampliam as possibilidades de exploração da ferramenta. Ressalta-se que a abordagem tem caráter ilustrativo, sem a pretensão de esgotar seu potencial de uso.

A estrutura deste anexo inclui orientações para a execução do código, exemplos de simulações e situações para análise, seguidas de reflexões guiadas que incentivam a aplicação prática e o aprofundamento conceitual.

Preparando o ambiente

Para a execução do algoritmo, é necessária uma IDE compatível com a linguagem Octave. Dentre algumas possibilidades, destacamos duas opções:

- Instalação local do software: <https://www.octave.org/>
- Execução via navegador (sem instalação): <https://octave-online.net/>

Importante: nas próximas etapas, será necessário modificar exclusivamente a seguinte seção do algoritmo (ver Anexo C):

```
[...]  
% --- AJUSTE DE PARÂMETROS ---  
  
% --- definição de n1 e n2 e o número de valores de x0 a ser  
variado  
  
n1=1.00;    % altere aqui o índice de refração do meio 1  
n2=1.33;    % altere aqui o índice de refração do meio 2  
numero = 20; % altere aqui o número de valores de x0 a ser  
variado  
  
... (continuação do código)
```

Após ajustar os parâmetros conforme os objetivos da simulação, o código (Anexo C) pode ser copiado e executado em uma das opções de IDE mencionadas anteriormente. Por exemplo, ao utilizar a segunda opção (execução online), a Figura A.1 apresenta a tela inicial do ambiente web. Nela, uma seta azul indica a caixa específica destinada à inserção do código.

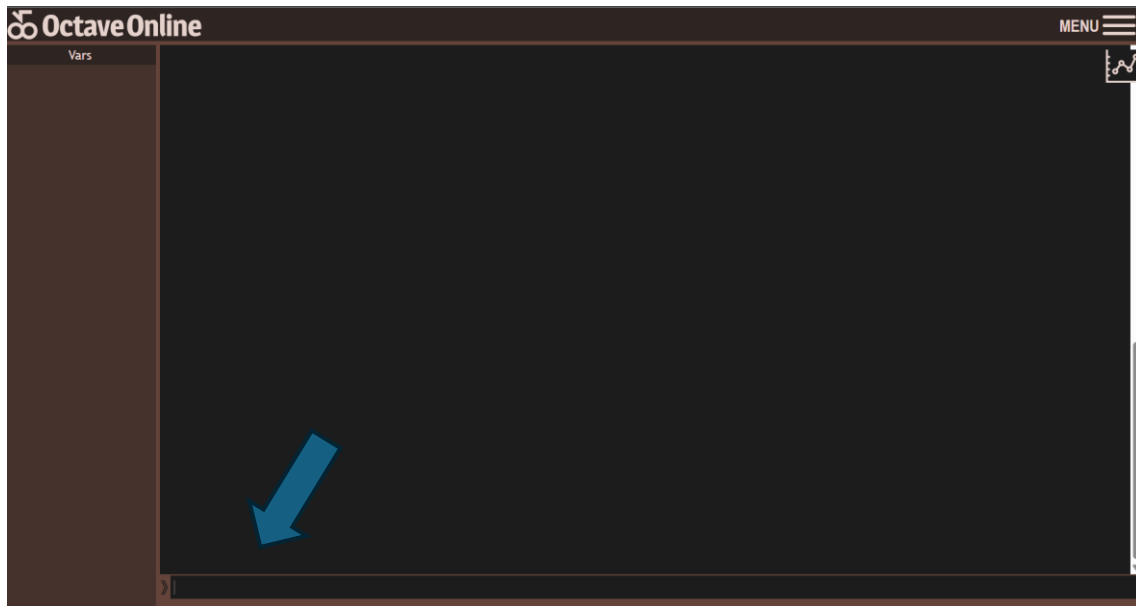


Figura A1 – Tela inicial do ambiente web.

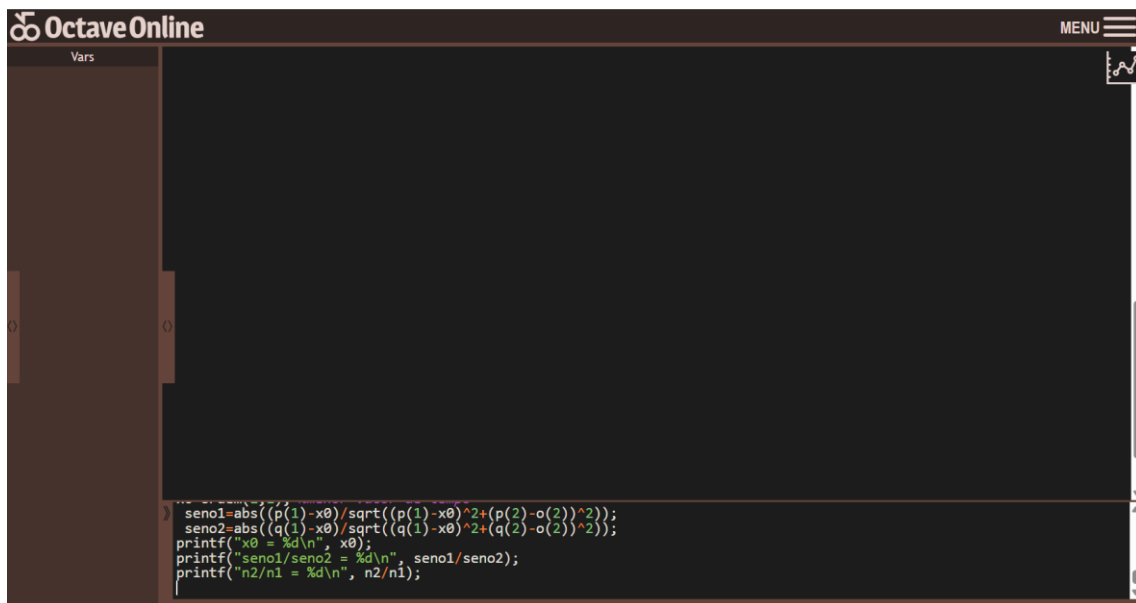


Figura A2 – Caixa de código da IDE com o algoritmo a ser executado.

Em seguida, copie e cole o conteúdo do Anexo C na caixa de código da IDE escolhida (Figura A.2). Em ambientes online, utilize o espaço destacado na tela inicial. Após inserir o código, pressione *Enter* para iniciar a simulação.

Após a execução bem-sucedida do código, os resultados serão exibidos diretamente na tela. Caso a saída seja extensa, será necessário rolar a tela para visualizar todas as informações

geradas pela simulação.

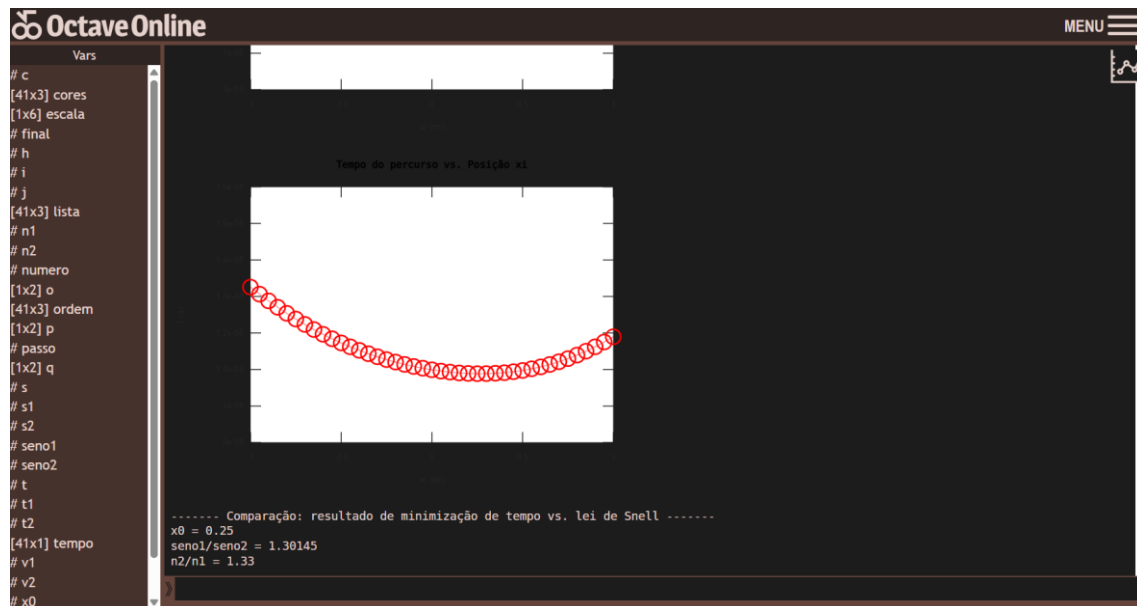


Figura A3 – Saída do código com os resultados obtidos.

Com a execução concluída, o código gerou os resultados com base nos dados inseridos.

Agora, com os dados em mãos, estamos prontos para explorar os exemplos propostos e analisar os comportamentos observados nas simulações. Recomenda-se realizar esta atividade em pequenos grupos, favorecendo discussões, comparações e interpretações dos resultados simulados.

Explorando Resultados

Etapa 1 – Verificação da Coerência do Algoritmo

Nesta etapa, vamos examinar se o algoritmo apresenta um comportamento coerente em uma situação-limite, ou seja, quando os índices de refração dos dois meios são iguais. Ajuste necessário no código – na seção "Ajuste de Configuração", modifique os parâmetros conforme indicado abaixo:

```
n1 = 1.00;           % índice de refração do meio 1
n2 = 1.00;           % índice de refração do meio 2
numero = 20;         % número de divisões na simulação
```

Com os ajustes aplicados, siga os próximos passos:

1. Execute a simulação com os parâmetros configurados anteriormente.
2. Registre os dados apresentados pela IDE.
3. Analise os resultados obtidos, verificando se estão de acordo com a expectativa física.

Reflexões sugeridas:

Discuta por que a simulação de uma situação em que os dois meios possuem o mesmo índice de refração ($n_1 = n_2 = 1$) pode ser considerada uma boa estratégia para testar a confiabilidade de um algoritmo de cálculo de trajetórias da luz.

Esta é uma situação limite e conhecida, onde não há refração. O raio de luz deve seguir em linha reta e os ângulos de incidência e refração devem ser iguais. Se o algoritmo for coerente, ele deve reproduzir esse comportamento.

Explique o que se espera observar em relação ao caminho da luz e aos ângulos de incidência e refração quando os meios possuem o mesmo índice de refração ($n_1 = n_2$). Analise se os resultados da simulação estão de acordo com essa expectativa.

Espera-se que o raio não mude de direção, passando diretamente pela origem ($x_0 = 0$) e formando ângulos iguais ($\theta_1 = \theta_2$). O resultado do algoritmo confirmou essa expectativa ao encontrar $x_0 = 0$, e a razão entre os senos e os índices de refração.

Etapas 2 – Testes com Diferentes Meios:

Agora que compreendemos o funcionamento básico do algoritmo, é hora de explorar diferentes cenários físicos e observar como a luz se comporta ao atravessar interfaces entre materiais com diferentes índices de refração. Analisaremos as informações geradas pelo código, buscando identificar padrões na refração da luz com base nas propriedades de cada meio.

TESTE 1: Ar e Água.

Ajuste os valores das variáveis dos índices de refração e defina o número de divisões no intervalo da abscissa estudado conforme abaixo:

```
n1 = 1.00;           % índice de refração do AR
n2 = 1.33;           % índice de refração do ÁGUA
numero = 20;         % número de divisões na simulação
```

Execute o código, seguindo os passos de verificação conforme as instruções dispostas no Anexo B, registrando os dados apresentados na saída, e analise os resultados obtidos.

Reflexões sugeridas:

Ao analisar a simulação da trajetória da luz ao atravessar a interface entre ar e água, observe o formato do raio antes e depois do ponto de transição entre os meios. Proponha uma explicação sobre o que essa mudança revela a respeito da alteração na direção da luz, relacionando esse comportamento ao índice de refração da água.

Ao passar do ar para a água, a luz entra em um meio mais refringente e se aproxima da normal — ou seja, o ângulo de refração é menor que o de incidência. Na simulação, isso aparece como uma quebra na trajetória, com a luz mudando de direção ao cruzar a interface. Isso reflete o comportamento previsto pela Lei de Snell, mostrando que a luz muda de velocidade e se curva ao entrar na água.

TESTE 2: Ar e Vidro.

Ajuste os valores das variáveis dos índices de refração e defina os passos de verificação conforme as instruções indicadas.

```
n1 = 1.00;           % índice de refração do AR
n2 = 1.52;           % índice de refração do VIDRO
numero = 100;        % número de divisões na simulação
```

Como anteriormente, execute o código, registre os dados apresentados na saída, e analise os resultados obtidos.

Reflexões sugeridas:

O algoritmo utilizado permite variar o número de divisões na busca pela trajetória de menor tempo (por meio do parâmetro ‘numero’). Explique como esse parâmetro afeta a precisão dos resultados.

Quanto maior o número de divisões (‘numero’), mais pontos o algoritmo considera na busca pelo caminho ótimo. Isso melhora a precisão da simulação, diminuindo o erro na estimativa dos ângulos e na comparação com a Lei de Snell.

O gráfico do tempo de percurso em função da posição x_i mostra um ponto de mínimo. Descreva o que esse mínimo representa em termos físicos. Além disso, explique como ele se relaciona com o Princípio de Fermat.

O mínimo no tempo de percurso representa o caminho real da luz entre os dois pontos, segundo o Princípio de Fermat. Esse é o caminho que a luz naturalmente percorre, pois é o que leva menos tempo entre a origem e o destino.

TESTE 3: Diamante e Ar.

Ajuste os valores conforme abaixo. Como realizado nos testes anteriores, execute o código, registre os dados apresentados na saída, e analise os resultados obtidos.

```
n1 = 2.42;           % índice de refração do DIAMANTE
n2 = 1.00;           % índice de refração do AR
numero = 100;        % número de divisões na simulação
```

Reflexões sugeridas:

Ao comparar os casos ar/água, ar/vidro e diamante/ar, avalie o que muda na diferença entre os valores calculados pelo algoritmo (baseado em Fermat) e a previsão da Lei de Snell. Explique o papel do índice de refração nessa diferença.

A diferença entre os valores $\sin \theta_1 / \sin \theta_2$ e n_2 / n_1 diminui à medida que o número de divisões aumenta. Em meios com maior contraste de índices de refração (como diamante/ar), é necessária mais precisão para obter bons resultados. Quanto mais pontos avaliados, melhor a aproximação.

No caso em que a luz passa do diamante para o ar, a luz vai de um meio mais refringente para um menos refringente. O que pode ser observado quanto ao formato da trajetória da luz na simulação? Discuta como esse comportamento pode resultar em reflexão total e investigue situações ou aplicações tecnológicas que utilizam esse fenômeno.

Ao passar do diamante para o ar, a luz se afasta da normal, e o ângulo de refração é maior que o de incidência. Se o ângulo de incidência ultrapassa o ângulo limite, ocorre reflexão total, sem refração. Na simulação, isso se nota pela curvatura da trajetória e possíveis falhas ao ultrapassar esse limite. Esse fenômeno é fundamental em tecnologias como fibras ópticas, onde a luz é guiada por reflexão total interna.

Conclusão

As etapas apresentadas neste guia oferecem uma base para a aplicação inicial do código, permitindo explorar conceitos de refração e trajetórias da luz de forma computacional. Ainda que o foco tenha sido a introdução ao algoritmo e seus testes básicos, outros exemplos e variações podem ser trabalhados conforme o objetivo didático. Além disso, o uso do código não se limita ao contexto aqui proposto — ele pode ser adaptado para aplicações mais amplas, como no ensino de computação científica, otimização de trajetórias ou na abordagem de princípios físicos de forma interdisciplinar.