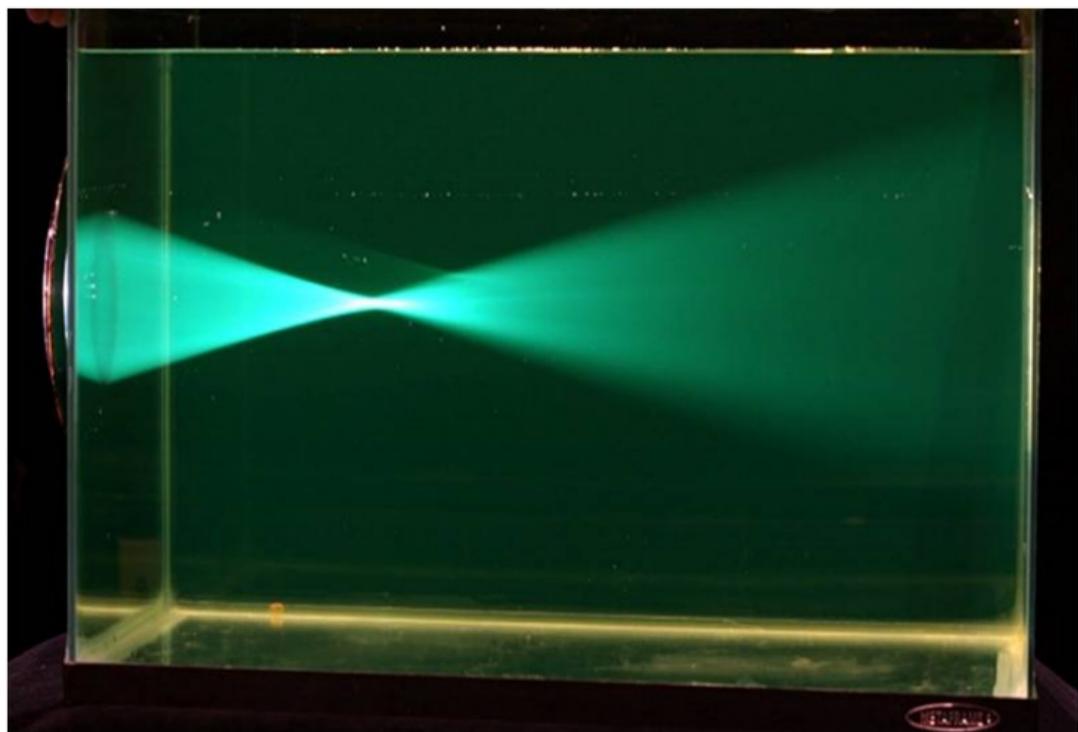


## Experimento I - Experiencias básicas de óptica



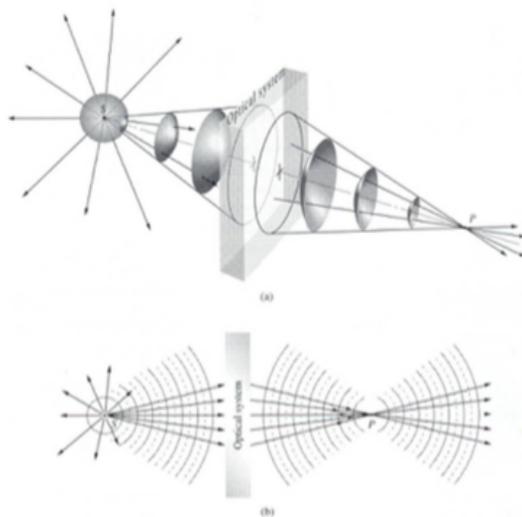
## Objetivos do experimento

- Estudar algumas características da óptica geométrica e construir imagens a partir de objetos em uma lente.

# Óptica geométrica

- Os comprimentos de onda típicos da luz visível estão entre 400 e 700 nm
  - ▶ Sistemas macroscópicos simples, do dia a dia, possuem dimensões tais que  $\frac{\lambda}{d} < 10^{-3}$ , ou seja, os efeitos ondulatórios são muito pequenos
- Neste caso, a **óptica geométrica** é aquela onde:
  - ▶ Podemos aproximar a luz por raios luminosos que se propagam de forma retilínea de um ponto a outro e os fenômenos ondulatórios podem ser desprezados

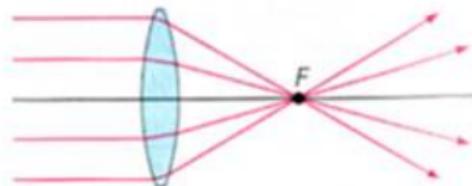
- Sistema refrator imerso em um meio
- O índice de refração da lente é diferente do meio e o seu formato é planejado de forma a alterar a direção dos raios luminosos incidentes



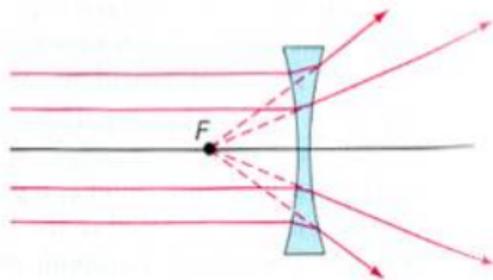
# Tipos de lentes

- Lentes podem ser convergentes ou divergentes
  - ▶ Convergentes (positivas) aproximam os raios luminosos
  - ▶ Divergentes (negativas) afastam os raios luminosos

convergente



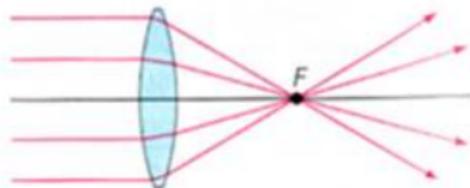
divergente



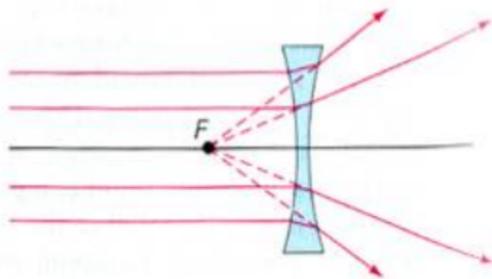
# Lentes delgadas

- Toda lente delgada é caracterizada por uma distância focal, única e independente da face em que o raio luminoso atinge a lente
- A distância focal ( $f$ ) é a distância entre o centro da lente e o ponto no qual todos os raios luminosos, incidentes paralelos ao eixo da lente, convergem (ou divergem)
  - ▶ Lentes convergentes:  $f > 0$
  - ▶ Divergentes:  $f < 0$

convergente



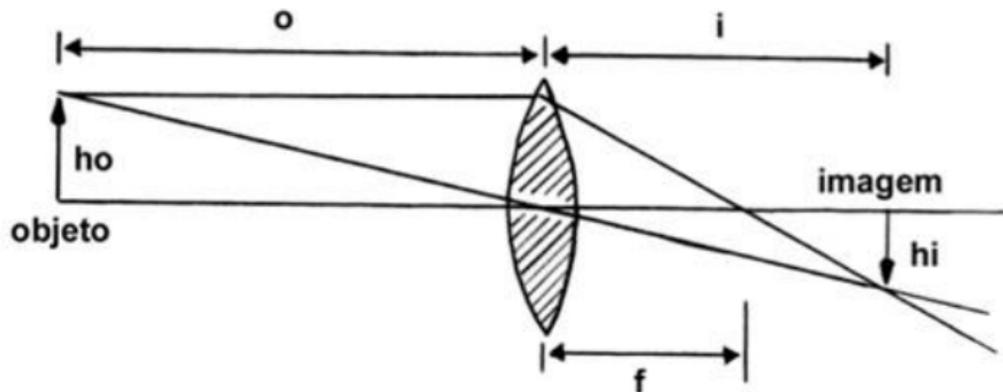
divergente



# Algumas definições úteis

- Objeto e imagem de uma lente

- ▶  $h_o$  = tamanho do objeto
- ▶  $h_i$  = tamanho da imagem
- ▶  $o$  = distância do objeto ao centro da lente
- ▶  $i$  = distância da imagem ao centro da lente
- ▶  $f$  = distância focal da lente



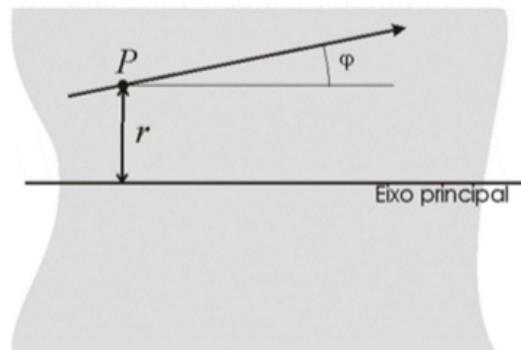
## Como calcular a trajetória de um raio luminoso?

- O cálculo das trajetórias de raios luminosos é bastante complexo e trabalhoso
- Necessita-se saber os ângulos de incidência em cada uma das superfícies, os respectivos índices de refração e as distâncias/formas das superfícies
- Uma técnica utilizada para estes cálculos é o método matricial

# O método matricial

- Seja um raio luminoso  $R$  em um meio óptico qualquer. Podemos caracterizar, em qualquer ponto  $P$ , este raio luminoso pela distância ao eixo óptico principal ( $r$ ) e o ângulo com este eixo ( $\varphi$ )
- Sendo assim, um ponto  $P$  qualquer pode ser escrito como um vetor de duas componentes

$$P = \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix}$$

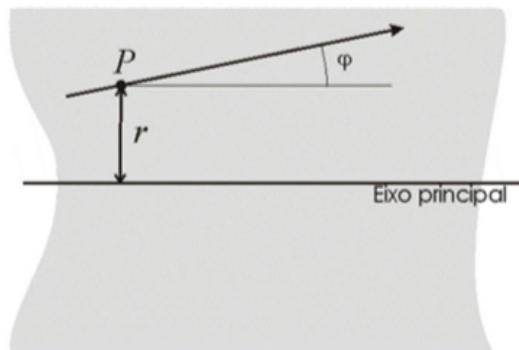


# Aproximação de raio paraxial

- Para aplicar o método matricial nos moldes que iremos discutir, é necessário que os raios luminosos sejam paraxiais
- Um **raio paraxial** é aquele que incide na lente em ângulos pequenos, de tal modo que:

$$\cos\varphi \sim 1 \quad \text{e} \quad \text{sen}\varphi \sim \varphi$$

- Razoável para  $\varphi < 10^\circ$

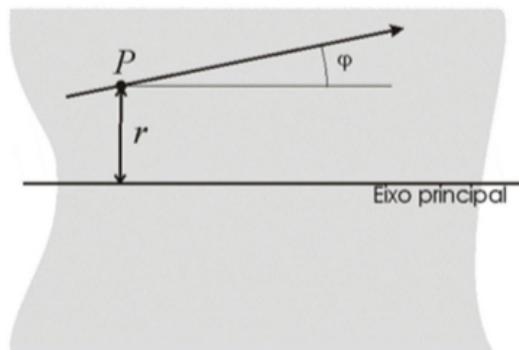


# O método matricial

- O método matricial estabelece uma transformação de um ponto  $P_1$  para outro ponto  $P_2$  de um meio através de uma matriz de transformação  $M$

$$P_2 = M \cdot P_1$$

$$P_1 = M^{-1} \cdot P_2$$



# O método matricial

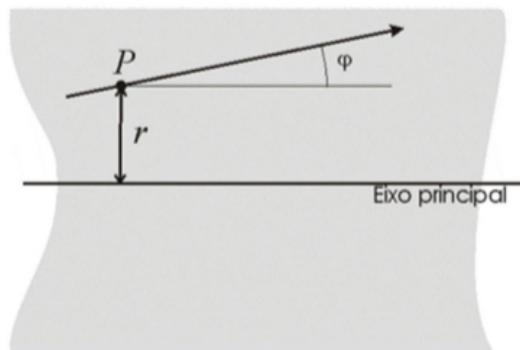
- O método matricial estabelece uma transformação de um ponto  $P_1$  para outro ponto  $P_2$  de um meio através de uma matriz de transformação  $M$

$$P_2 = M \cdot P_1$$

$$P_1 = M^{-1} \cdot P_2$$

- Ou seja

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$



# O método matricial

- O método matricial estabelece uma transformação de um ponto  $P_1$  para outro ponto  $P_2$  de um meio através de uma matriz de transformação  $M$

$$P_2 = M \cdot P_1$$

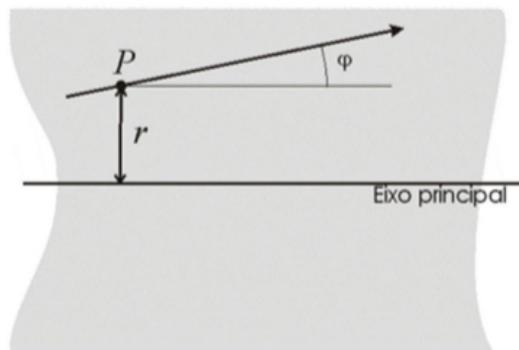
$$P_1 = M^{-1} \cdot P_2$$

- Ou seja

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

- $M$  é dada por

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$



## Transformação de $P_1$ para $P_2$

- A transformação de um ponto  $P_1$  para um ponto  $P_2$  pode ser escrita como:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

## Transformação de $P_1$ para $P_2$

- A transformação de um ponto  $P_1$  para um ponto  $P_2$  pode ser escrita como:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

$$r_2 = Ar_1 + B\varphi_1$$

$$\varphi_2 = Cr_1 + D\varphi_1$$

## Múltiplas propagações

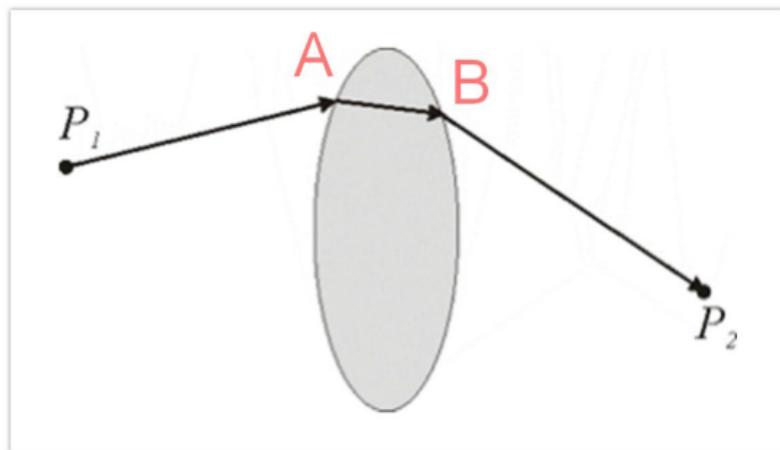
- A vantagem do método matricial é poder escrever a propagação de um raio luminoso por matrizes independentes para cada meio envolvido e combiná-las
- Seja, por exemplo, uma propagação do ponto  $P_1$  para  $P_2$  que passa por vários meios distintos. A transformação, neste caso, é:

$$P_2 = M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot P_1$$

## Exemplo: lente simples

- A transformação de  $P_1$  para  $P_2$  é dada por:

$$P_2 = M_{P_1 \rightarrow P_2} \cdot P_1$$

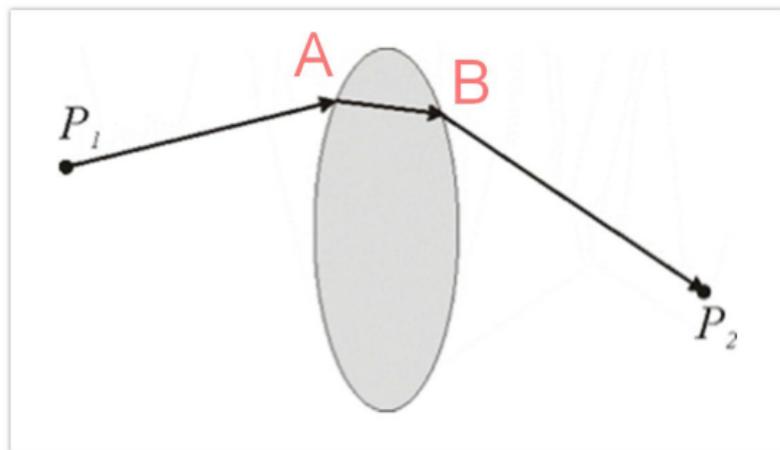


## Exemplo: lente simples

- A transformação de  $P_1$  para  $P_2$  é dada por:

$$P_2 = M_{P_1 \rightarrow P_2} \cdot P_1$$

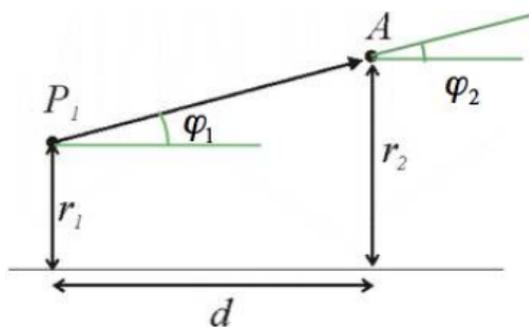
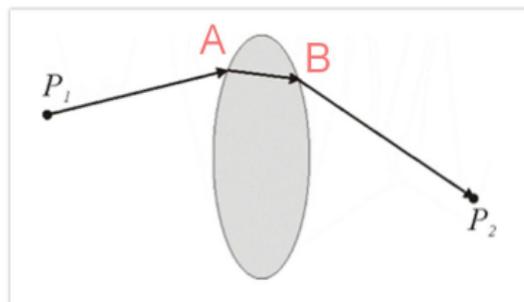
$$P_2 = M_{B \rightarrow P_2} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A} \cdot P_1$$



# Propagação de $P_1 \rightarrow A$

- Propagação em linha reta
- Equação de uma reta, conhecendo dois pontos

$$\varphi_2 = \varphi_1 \quad \tan\varphi_1 \sim \varphi_1$$

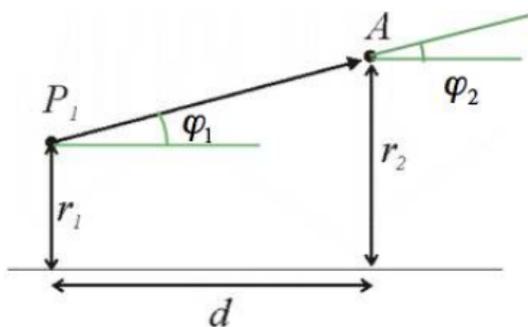
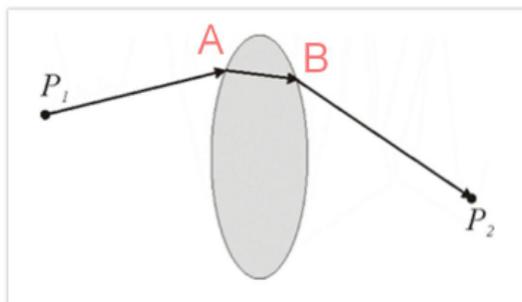


# Propagação de $P_1 \rightarrow A$

- Propagação em linha reta
- Equação de uma reta, conhecendo dois pontos

$$\varphi_2 = \varphi_1 \quad \tan\varphi_1 \sim \varphi_1$$

$$r_2 = r_1 + d \tan\varphi_1 \quad \Rightarrow \quad r_2 = r_1 + d\varphi_1$$



# Propagação de $P_1 \rightarrow A$

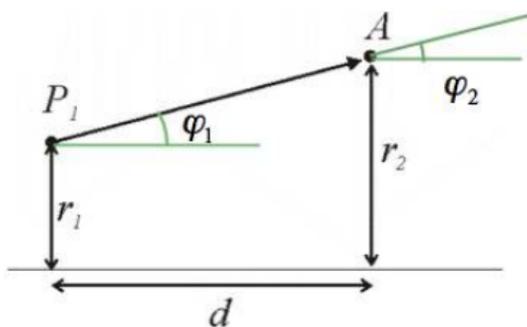
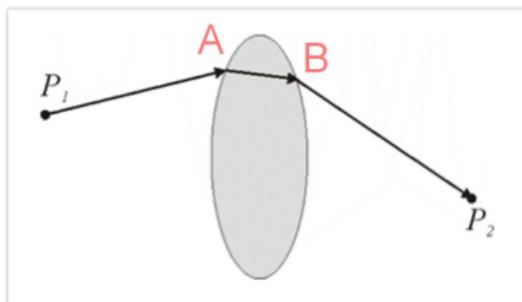
- Propagação em linha reta
- Equação de uma reta, conhecendo dois pontos

$$\varphi_2 = \varphi_1 \quad \tan\varphi_1 \sim \varphi_1$$

$$r_2 = r_1 + d \tan\varphi_1 \quad \Rightarrow \quad r_2 = r_1 + d\varphi_1$$

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

$$M_{P_1 \rightarrow A} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

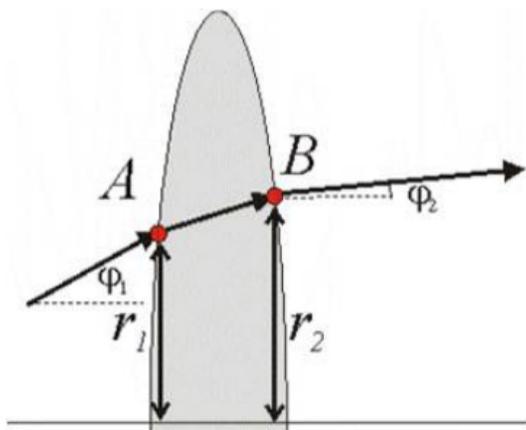
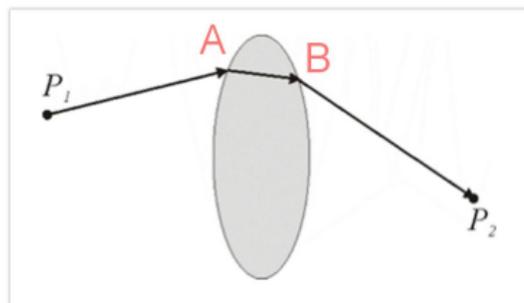


# Propagação de $A \rightarrow B$

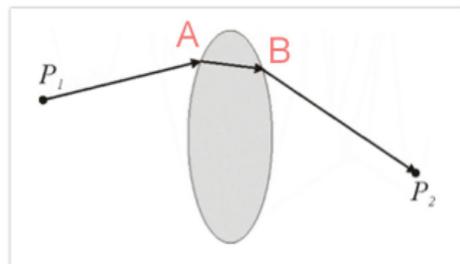
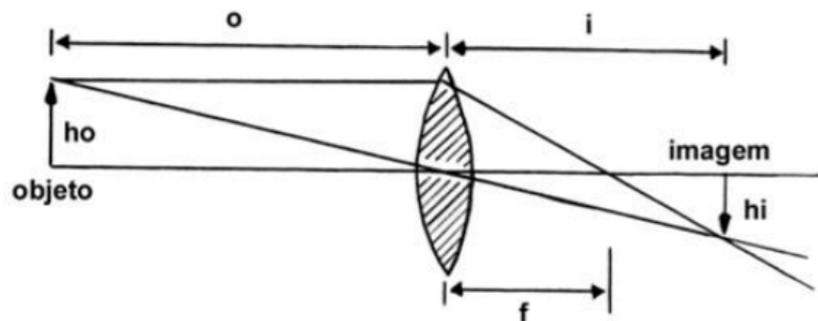
- Dentro da lente
- Ver texto no site para dedução desta expressão

$$M_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

$f$  = distância focal

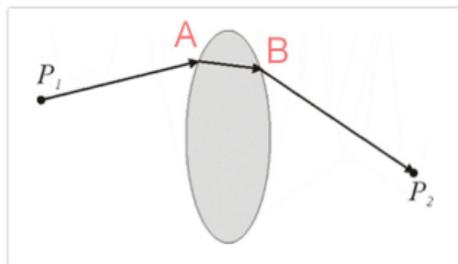
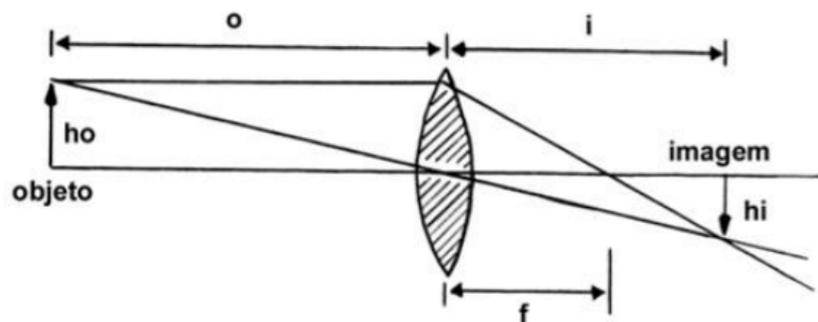


# Transformação completa



$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = M_{B \rightarrow P_2} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

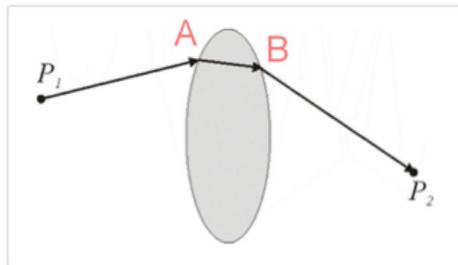
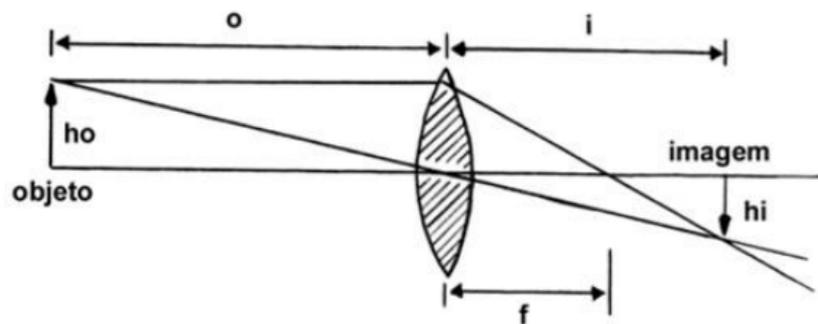
# Transformação completa



$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = M_{B \rightarrow P_2} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

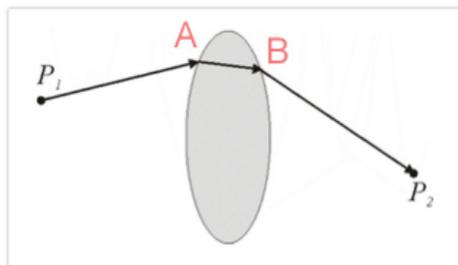
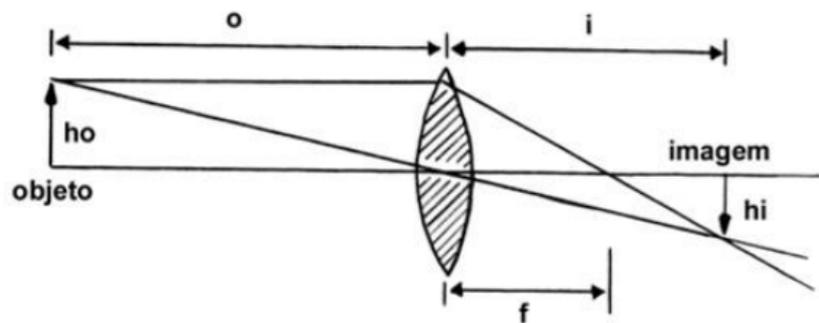
$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & o \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

# Transformação completa



$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{i}{f} & o - \frac{io}{f} + i \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{o}{f} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}$$

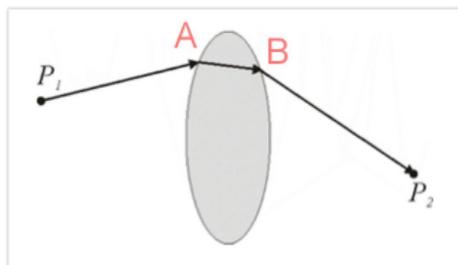
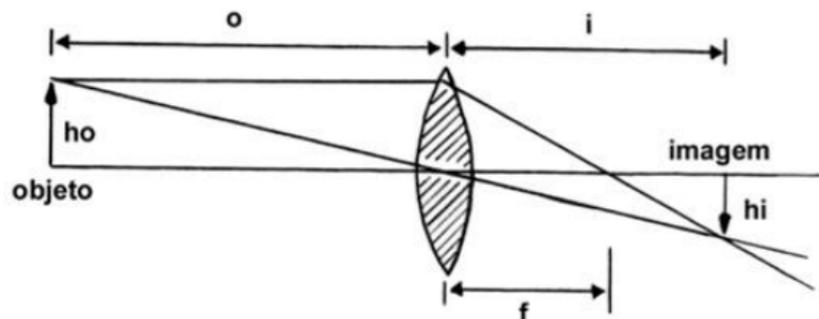
# Transformação completa



$$r_2 = \left(1 - \frac{i}{f}\right) r_1 + \left(o - \frac{io}{f} + i\right) \varphi_1$$

$$\varphi_2 = -\frac{1}{f} r_1 + \left(1 - \frac{o}{f}\right) \varphi_1$$

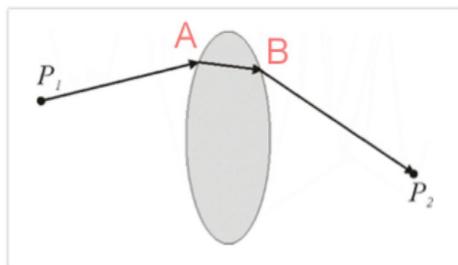
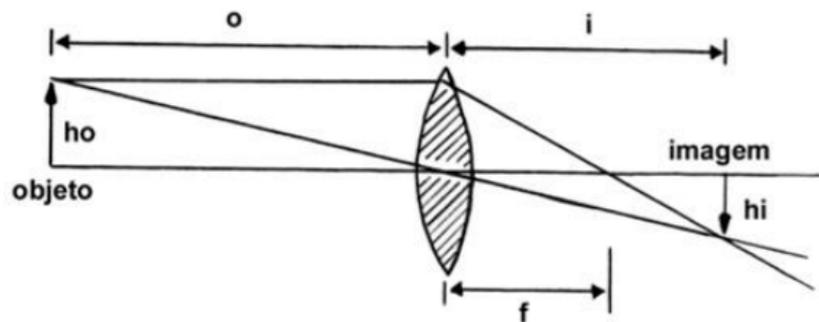
# Transformação completa



- Como todos os raios que saem de  $P_1$  devem chegar em  $P_2$ ,  $r_2$  não pode depender do ângulo  $\varphi_1$

$$r_2 = \left(1 - \frac{i}{f}\right) r_1 + \left(o - \frac{io}{f} + i\right) \varphi_1$$

# Transformação completa

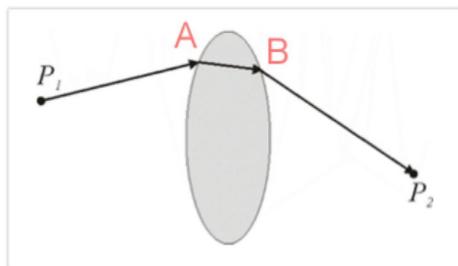
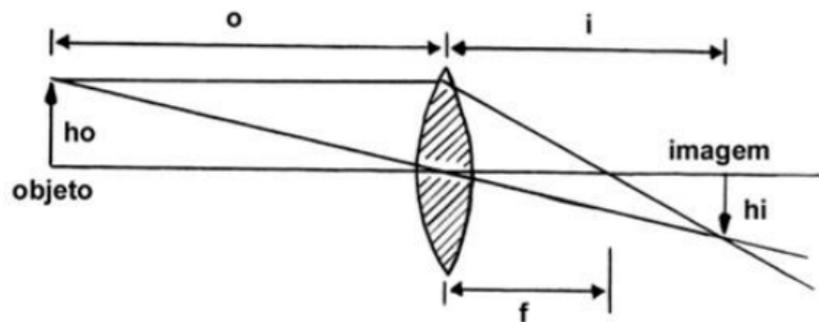


- Como todos os raios que saem de  $P_1$  devem chegar em  $P_2$ ,  $r_2$  não pode depender do ângulo  $\varphi_1$

$$r_2 = \left(1 - \frac{i}{f}\right) r_1 + \left(o - \frac{io}{f} + i\right) \varphi_1$$

$$\left(o - \frac{io}{f} + i\right) = 0$$

# Transformação completa



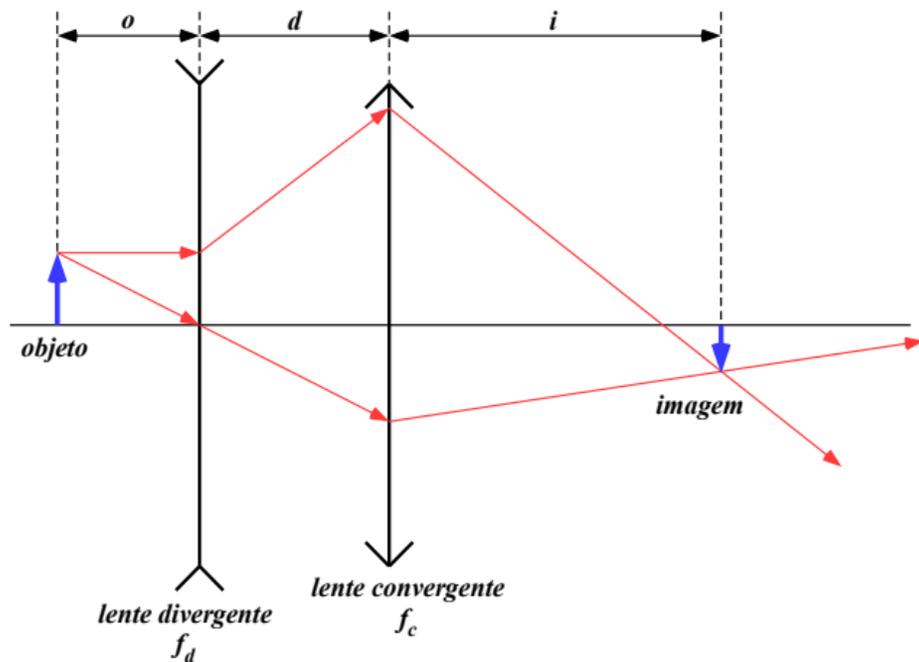
- Como todos os raios que saem de  $P_1$  devem chegar em  $P_2$ ,  $r_2$  não pode depender do ângulo  $\varphi_1$

$$r_2 = \left(1 - \frac{i}{f}\right) r_1 + \left(o - \frac{io}{f} + i\right) \varphi_1$$

$$\left(o - \frac{io}{f} + i\right) = 0 \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}$$

# Objetivos da atividade

- Estudar uma associação de lentes
  - ▶ Lente convergente + lente divergente

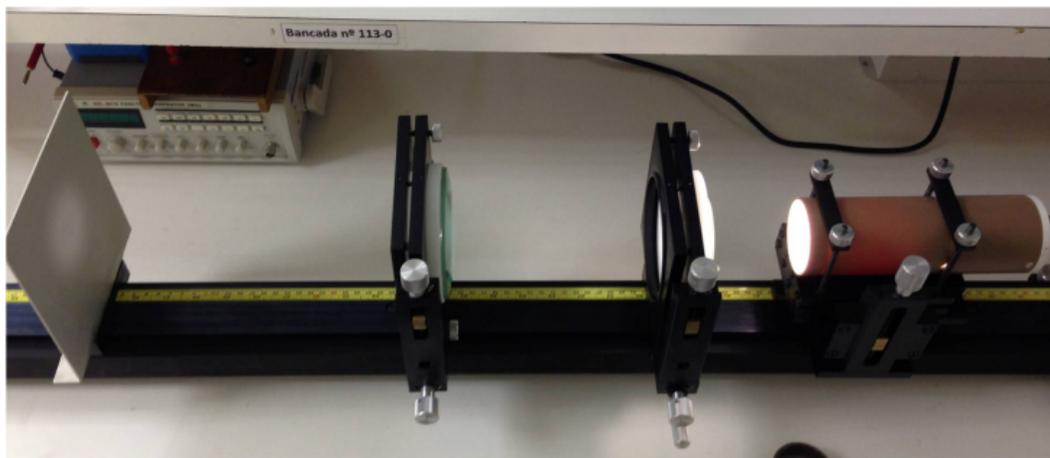


## Atividade pré-lab: construção de um modelo físico adequado

- Encontrar a relação entre a posição da imagem gerada ( $i$ ) em função da posição do objeto ( $o$ ), mantendo fixa a distância entre as lentes ( $d$ )
  - ▶ **DICA:** use o método matricial
- Supondo  $f_d = -10$  cm,  $f_c = 20$  cm,  $o = 50$  cm e  $i = 75$  cm, calcule  $d$ .

# Medida posição da imagem em função da posição do objeto

- Para cada posição do objeto ( $o$ ) foi medida a posição da imagem ( $i$ ) correspondente



- Aplicar o modelo construído aos dados experimentais
  - ▶ Ajuste de dados. Avalie o  $\chi^2$  e resíduos do ajuste. É um bom ajuste?
  - ▶ Obter as distâncias focais das lentes convergente e divergente