

# **Trabalho Laboratorial**

## **Equações de Fresnel**

**João Figueirinhas e Raquel Crespo**

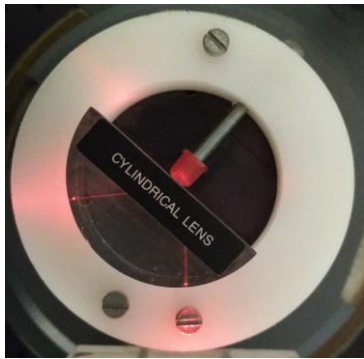
# Objetivos do trabalho

O objetivo do trabalho consiste em verificar as **Equações de Fresnel**. Estas equações relacionam as amplitudes dos **campos elétricos das ondas refletida e transmitida** com a amplitude do campo elétrico da onda incidente na passagem da radiação eletromagnética entre dois meios distintos.

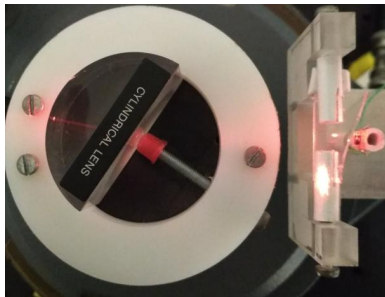
Mais concretamente:

Para uma superfície de separação entre dois meios transparentes, homogêneos e isotrópicos, o ar e o polímero, e para **dois alinhamentos distintos**, e **polarizações do feixe paralelo e perpendicular**

- Determinar os ângulos crítico e de Brewster
- Determinar o índice de refração do material do semi-cilindro transparente.
- Estudar a evolução da Refletância e da Transmitância da superfície de separação entre o ar e o polímero para dois alinhamentos distintos, e polarizações paralela e perpendicular do feixe incidente.
- Analisar o balanço energético



$$n_1 > n_2$$



$$n_1 < n_2$$

# Descrição da montagem experimental

Para estudar as **Equações de Fresnel** dispomos da montagem apresentada na figura 1, que inclui o seguinte equipamento:

1-Goniómetrometro  
Aparato.

1a-HeNe laser

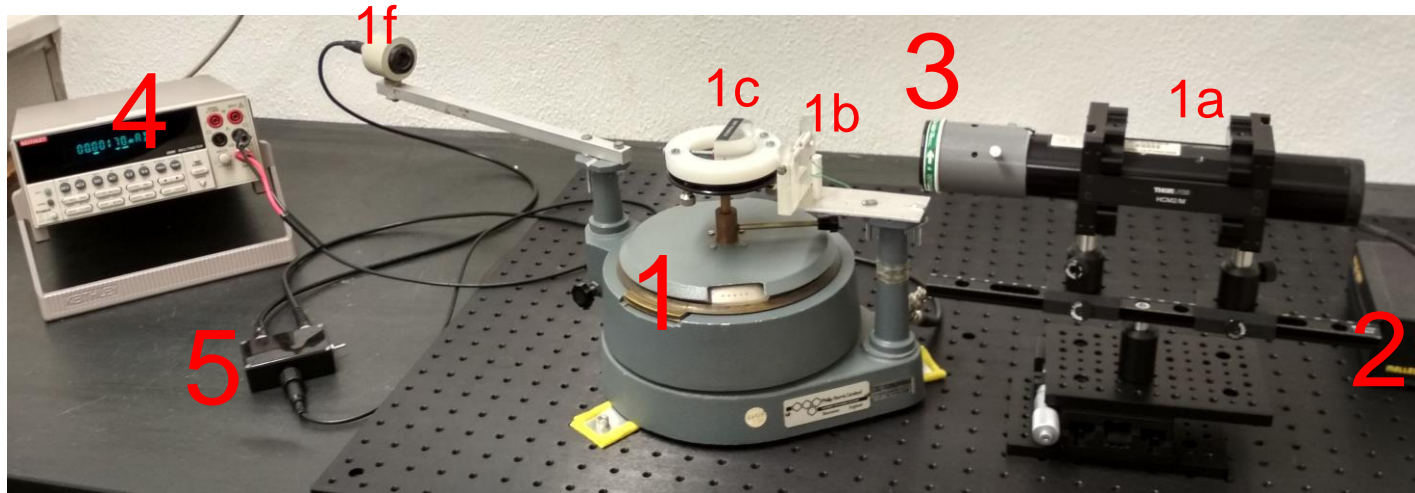
1b-separador feixe

1c-semi-cilindro

1d-detetor referência

1e-goniómetro

1f-foto detetor



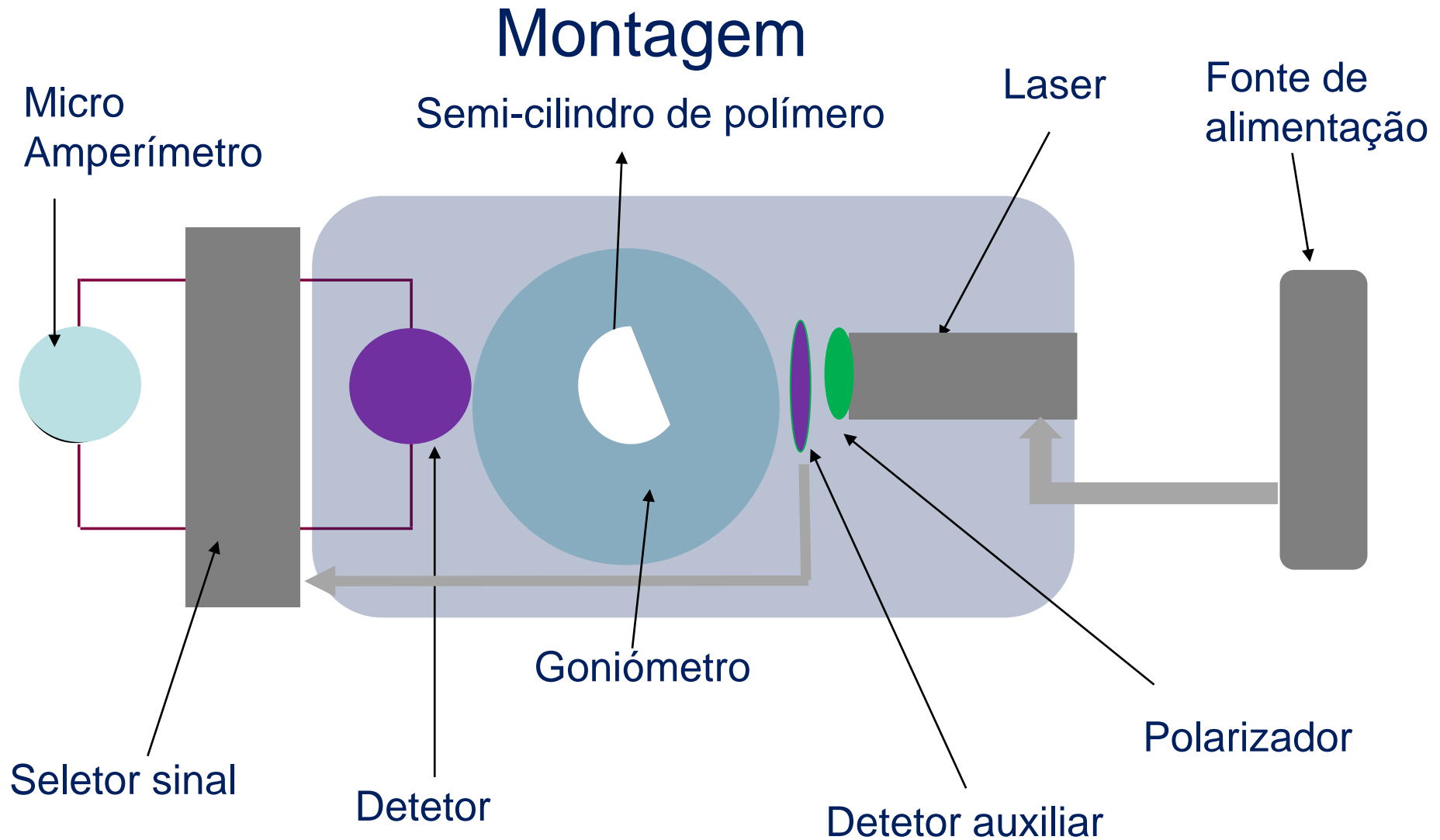
2-fonte de alimentação

3-Polarizador

Figura 1. Montagem experimental

4-Microamperímetro.

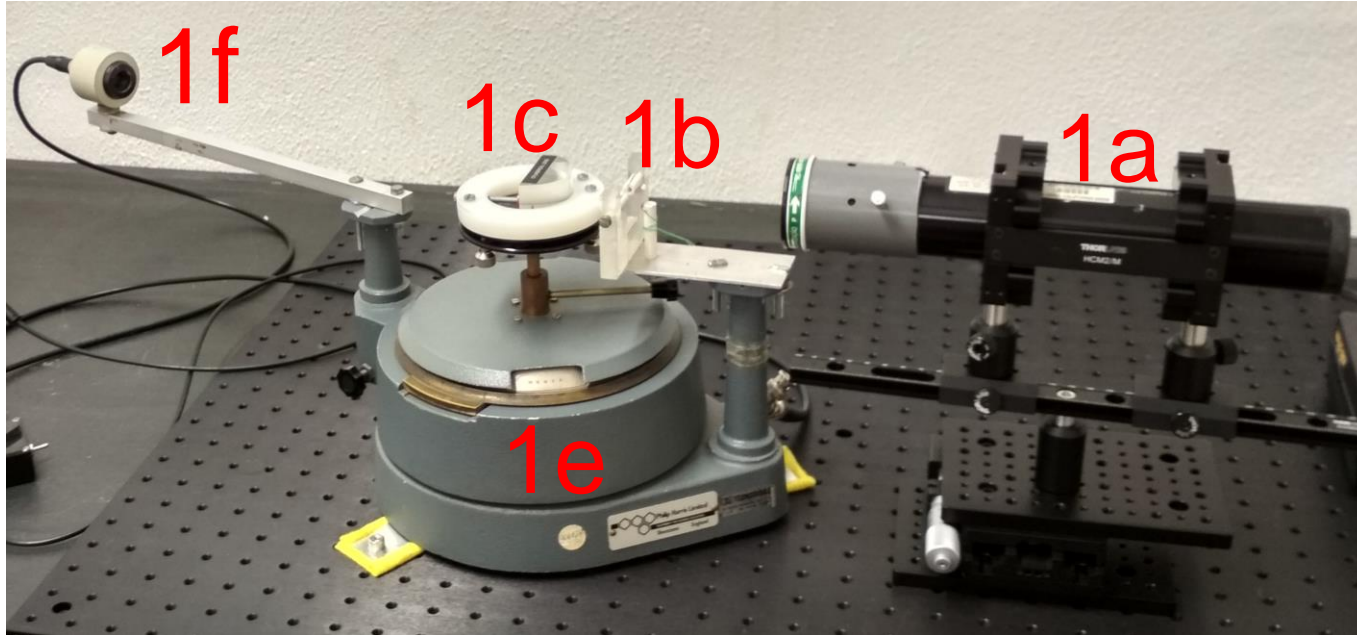
5-seletor de sinal



## Detalhes da montagem experimental

O goniómetro (1) é composto pelos seguintes elementos:

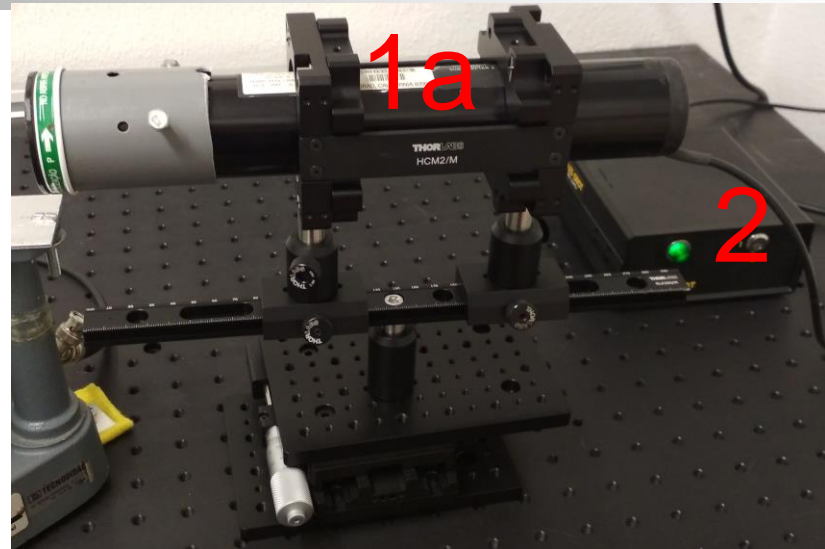
- Um **braço de incidência (BI)** com um laser de Hélio-Néon (1a).



- A luz do laser passa por um **separador** de feixe (1b) e incide no **semi-cilindro** (1c) colocado no centro do **goniómetro** (1e) .
- No **braço de refração (BR)** a luz refractada e reflectida pelo semi-cilindro vai incidir num **sensor de radiação** (1f).

## Detalhes da montagem experimental

- No braço de incidência, o **laser de Hélio-Néon** (1a) emite radiação com um comprimento de onda  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , estando ligado a uma fonte de alimentação (2).

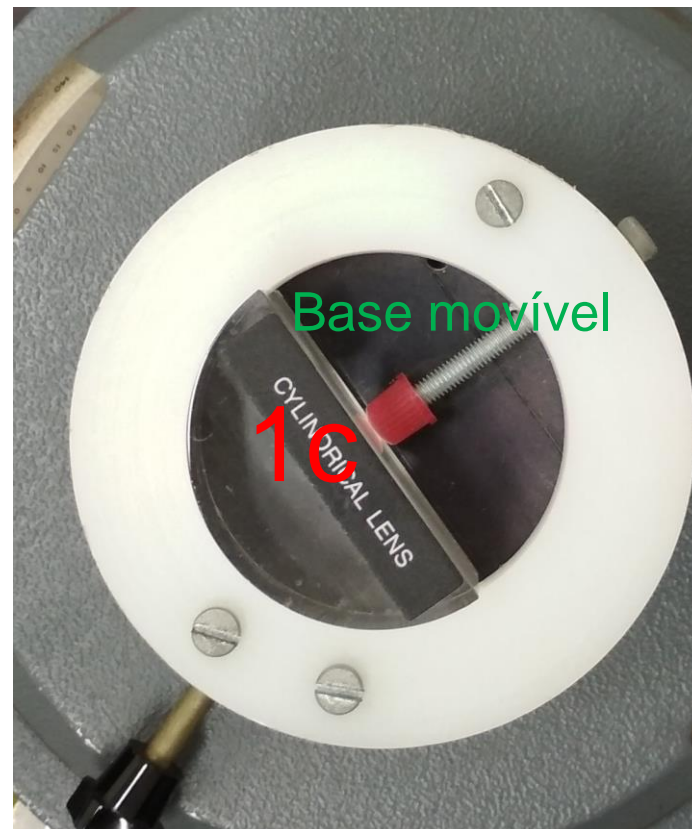


- O **laser** está acoplado a um polarizador (3) que polariza linearmente a radiação e permite alterar a direção de polarização desta.



## Detalhes da montagem experimental

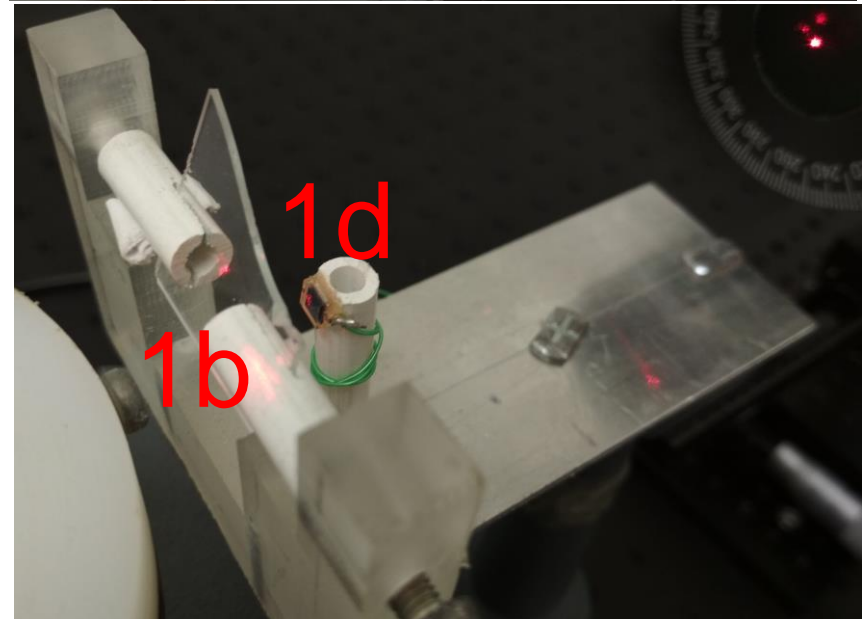
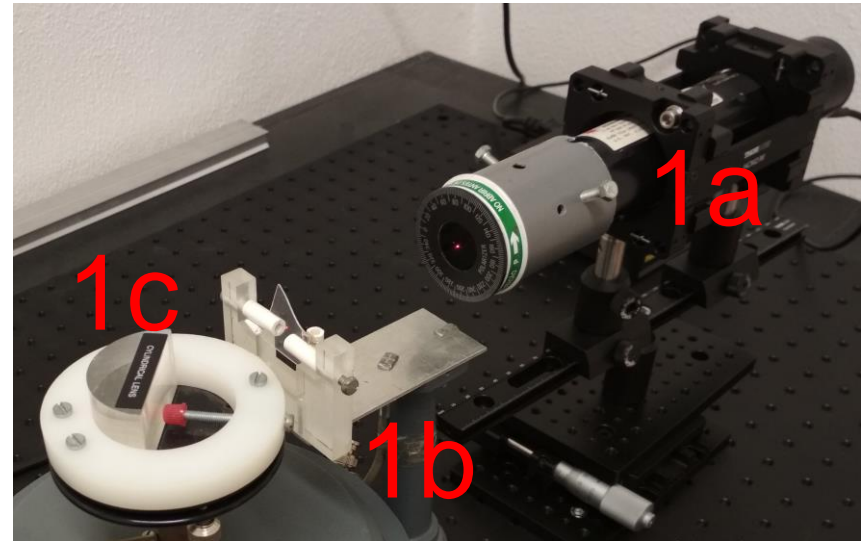
- O **semi-cilindro** (1c) de polímero transparente está colocado em cima de uma **base móvel** no topo do goniómetro.





## Detalhes da montagem experimental

- No braço de incidência, entre o **laser de Hélio-Néon** (1a) e o semi-cilindro de polímero transparente (1c) está colocado um separador de feixe (1b) e um detetor de referência (1d).





## Detalhes da montagem experimental-I

- O **goniómetro** (1e) é constituído por um **disco circular** dividido em  $360^\circ$ , sendo que a menor divisão da escala é de  $1/3^\circ (20')$ , e um **nónio**.
- O nóvio tem 20 divisões maiores que correspondem a  $1'$  cada. A menor divisão da escala do nóvio corresponde a  $30''$ .

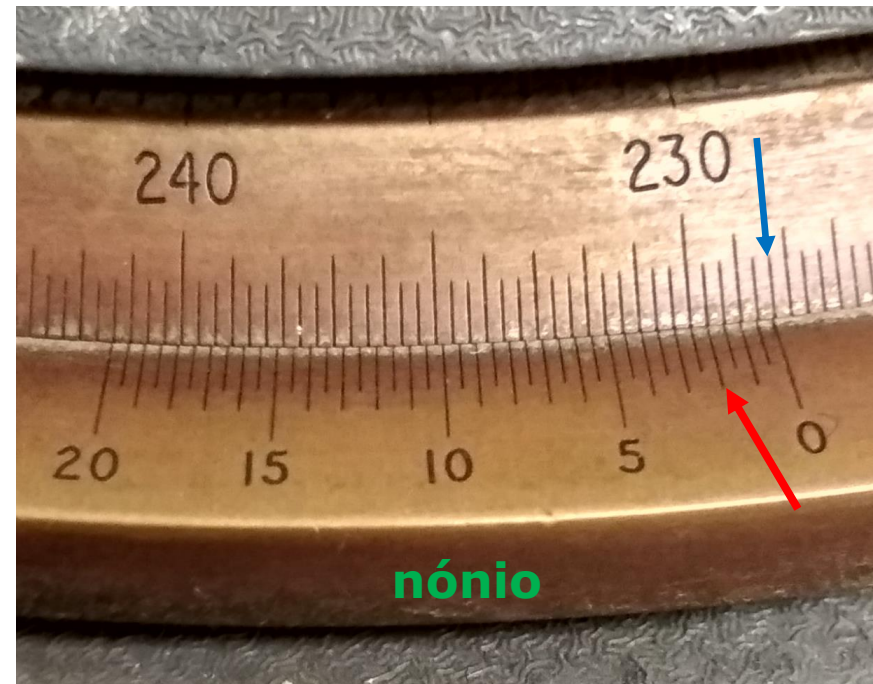


A leitura do goniómetro é dada pelo ângulo  $\theta$  para o qual os dois traços do disco circular e do nóvio coincidem:

$$\theta = 228^\circ + 20' + 2'$$

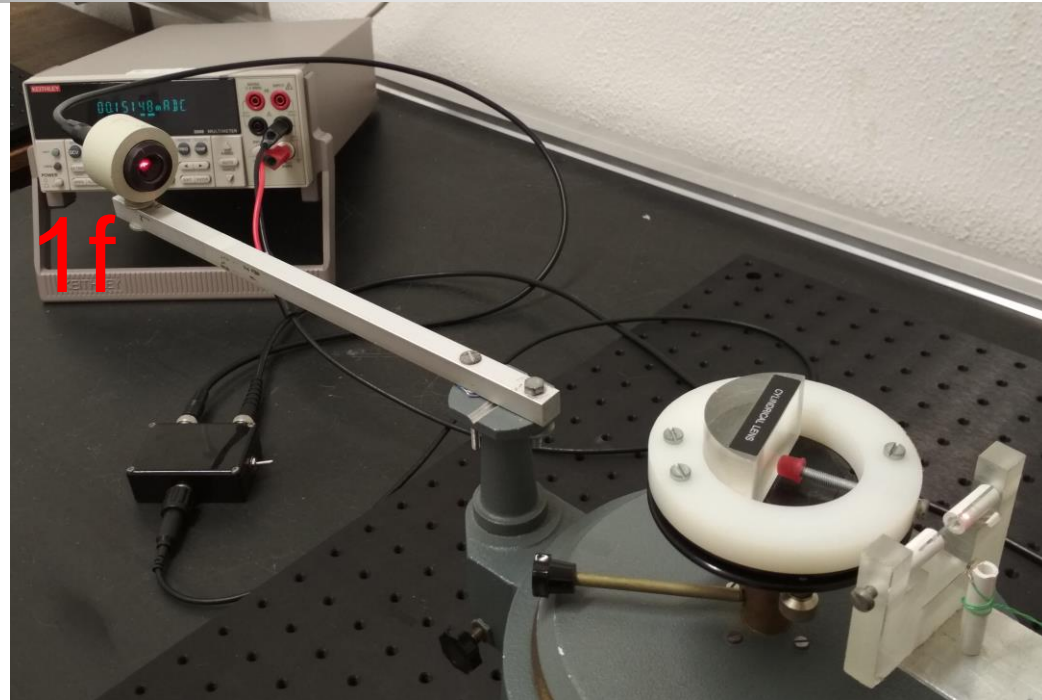
Leitura feita na  
escala superior

Leitura feita  
no nóvio



## Detalhes da montagem experimental-I

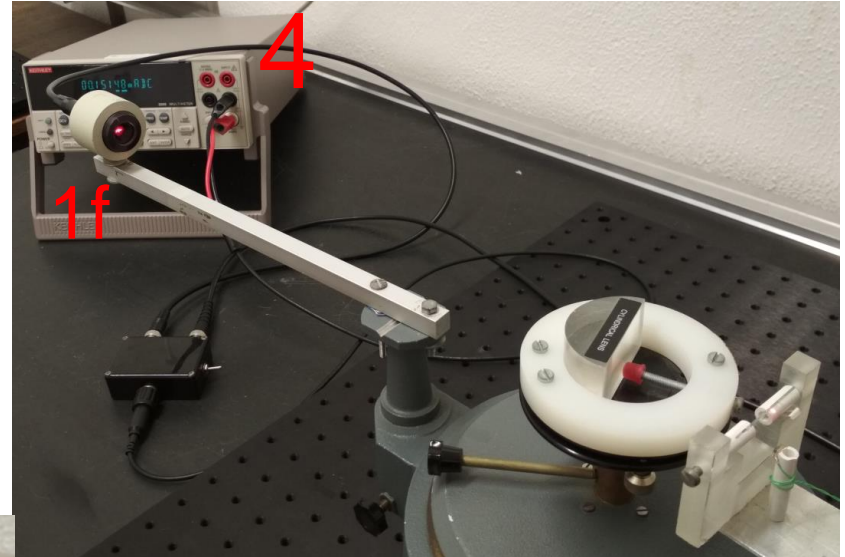
- O sensor de radiação (**1f**) é constituído por um material de estado sólido que produz uma corrente elétrica proporcional à potência da radiação visível que nele incide.



Para ângulos de incidência elevados, o feixe transmitido sofre dispersão angular e a sua largura excede a área útil do detetor, sendo registada pelo detetor uma amplitude de feixe inferior à real.

## Detalhes da montagem experimental-I

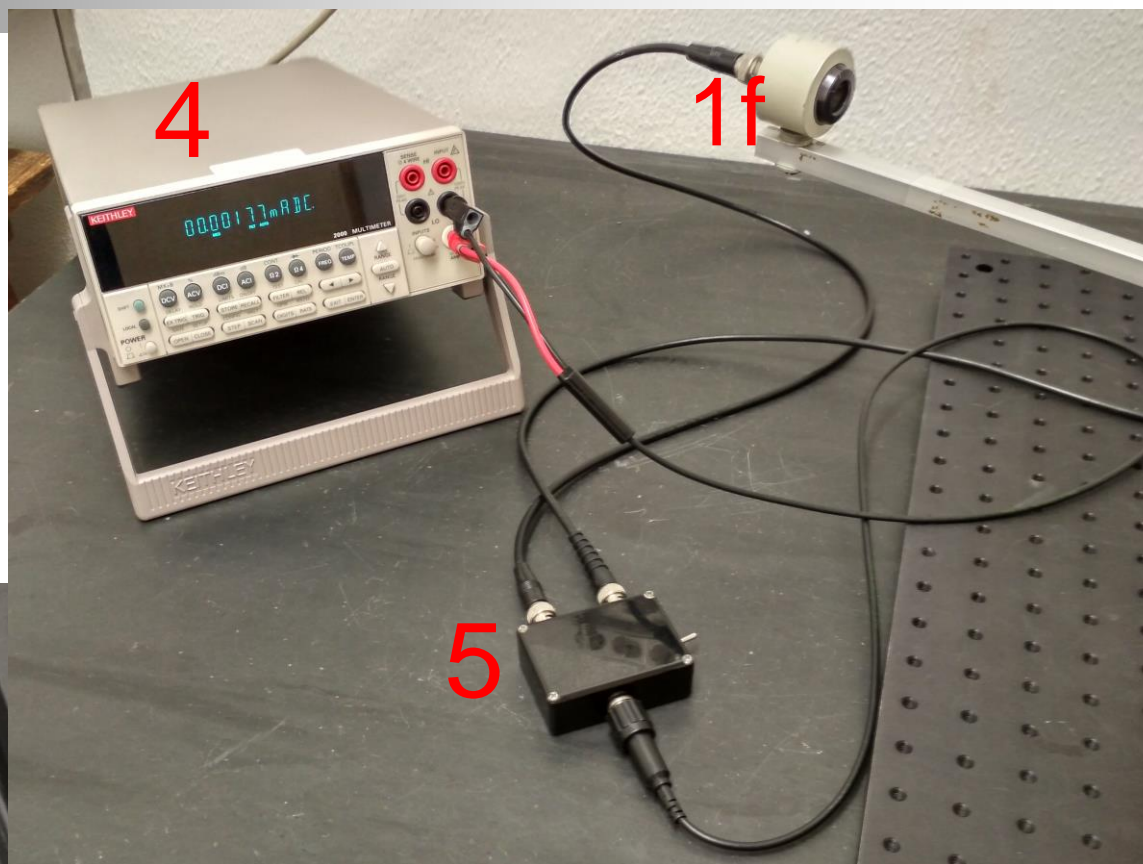
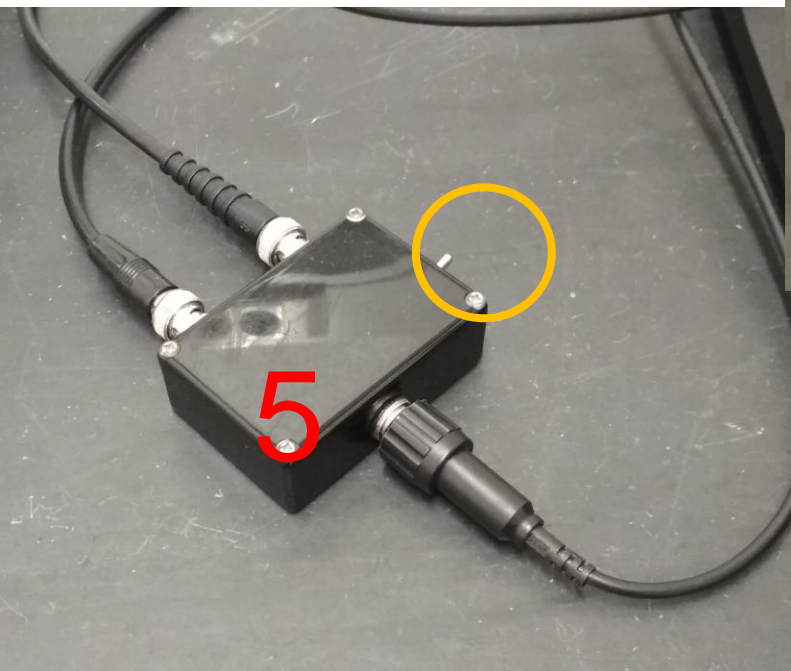
- A corrente elétrica produzida pelo detetor de estado sólido (1f) é lida no **microamperímetro** (4).





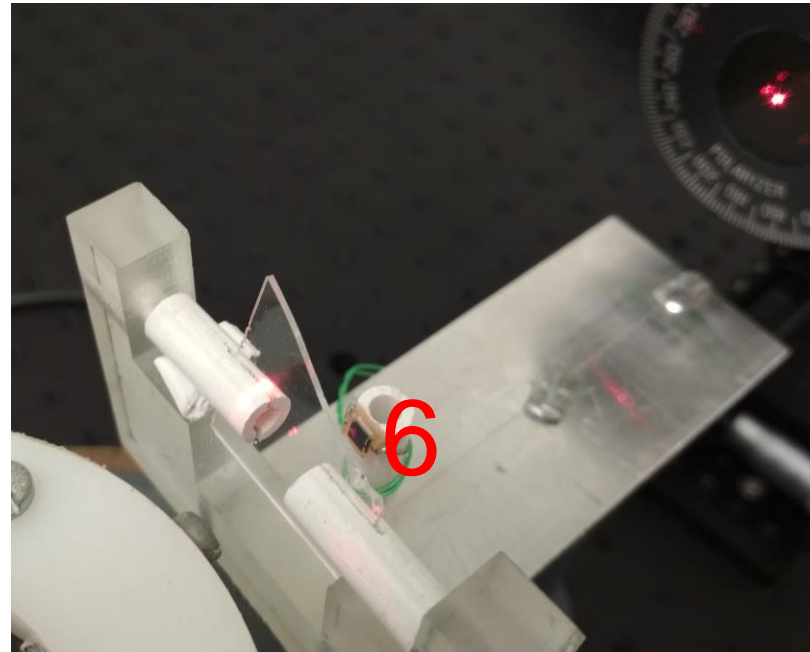
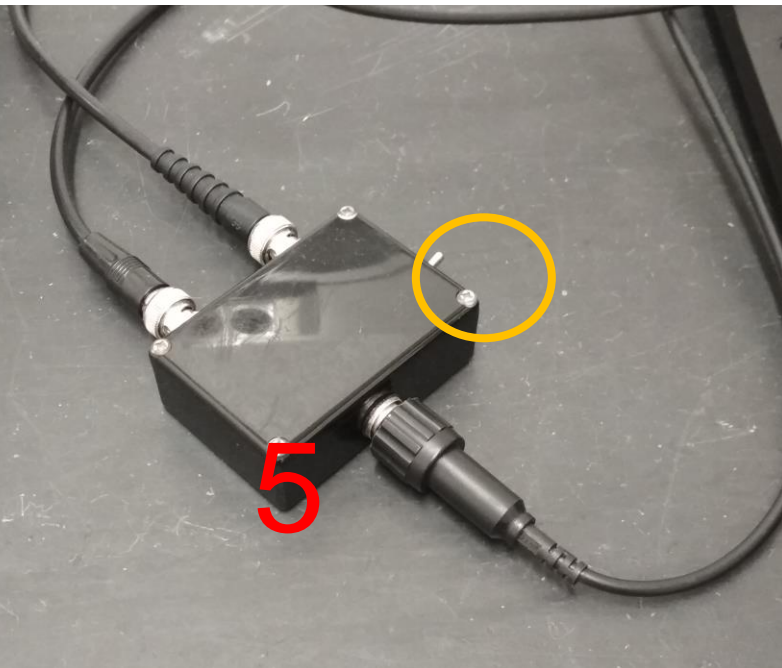
## Detalhes da montagem experimental-I

- O detector (1f) está ligado em série ao **microamperímetro** (4) através de um seletor de sinal (5).



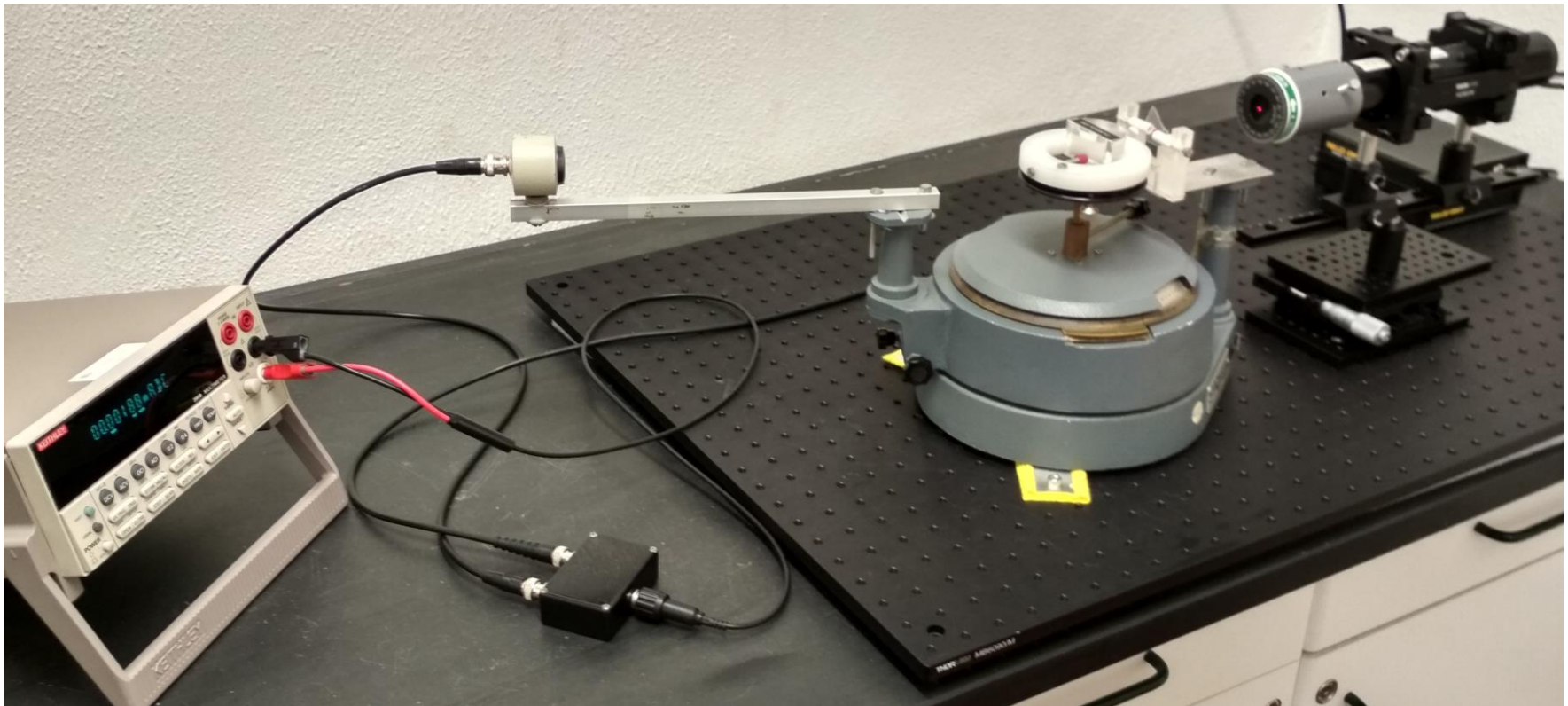
## Detalhes da montagem experimental-I

- O detector auxiliar (6) por sua vez também está ligado em série ao **microamperímetro** através do seletor de sinal (5), permitindo medir o sinal de referência.



## Execução da experiência

- 1) Montar o circuito de acordo com a representação esquemática da montagem, representada na Figura 2.
- 2) Colocar o laser em funcionamento e aguardar 15 minutos até que este atinja uma temperatura de funcionamento estável.

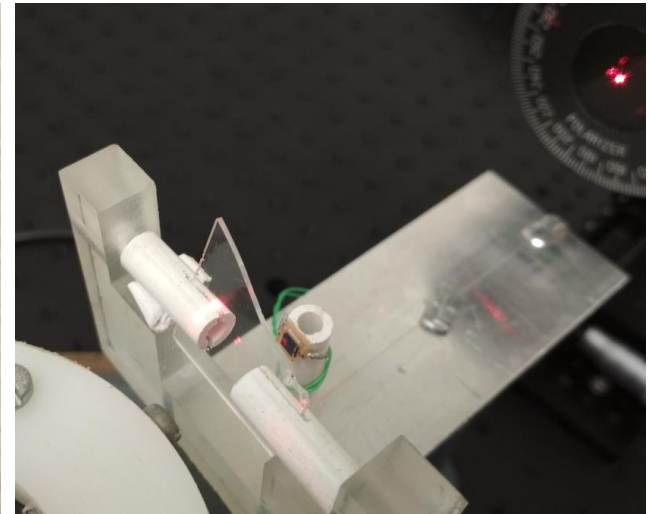




# Execução da experiência

## Conjunto de medidas

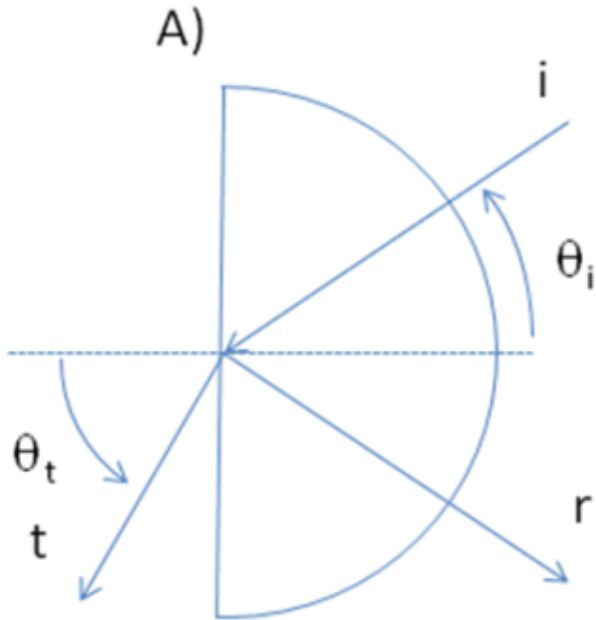
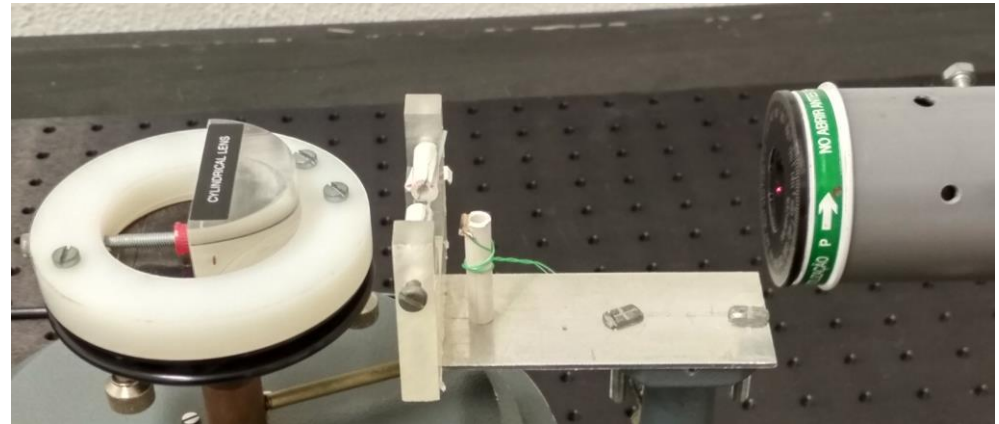
Para obviar o facto de que o laser disponível no laboratório apresentar algumas flutuações, para cada medida (quer do feixe transmitido quer do feixe refletido) efetua-se um conjunto de 3 medidas: **2 medidas** (M1, M2) do feixe (refletido ou transmitido) e **1 medida do feixe de referência** usando o detetor auxiliar (M3). A escolha do tipo de medida é feita com o seletor de sinal.



# Execução da experiência

## Alinhamento A

3) Verificar o alinhamento do semi-cilindro de forma a que a face curva se encontre virada para o laser ( **alinhamento A** )



# Execução da experiência

## Alinhamento A

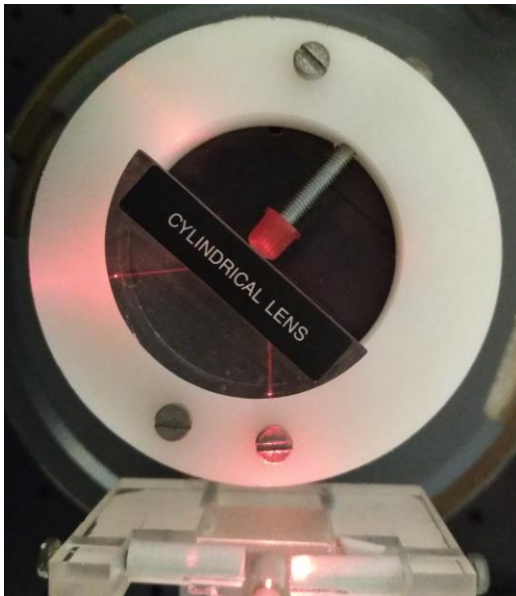
4) Alinhar o polarizador de modo a obter **a polarização paralela ou p**



5) Alinhar o detetor.

Variar o ângulo de incidência  $\theta_i$  desde 0 a  $85^\circ$  em passos de  $5^\circ$ , registrando as potências dos **feixes transmitido e refletido**.

## Execução da experiência



Alinhamento A



Polarização paralela

6) Medir o ângulo de incidência, para o qual a reflexão é total, isto é o ângulo crítico,  $\theta_C$ .

7) Medir o ângulo de incidência, para o qual existe uma diminuição acentuada da intensidade do feixe refletido, isto é o ângulo de Brewster,  $\theta_B$ .

# Execução da experiência

## Alinhamento A

8) Alinhar o polarizador de modo a obter a **polarização perpendicular ou s**

9) Repetir os procedimentos anteriores 5)-6)

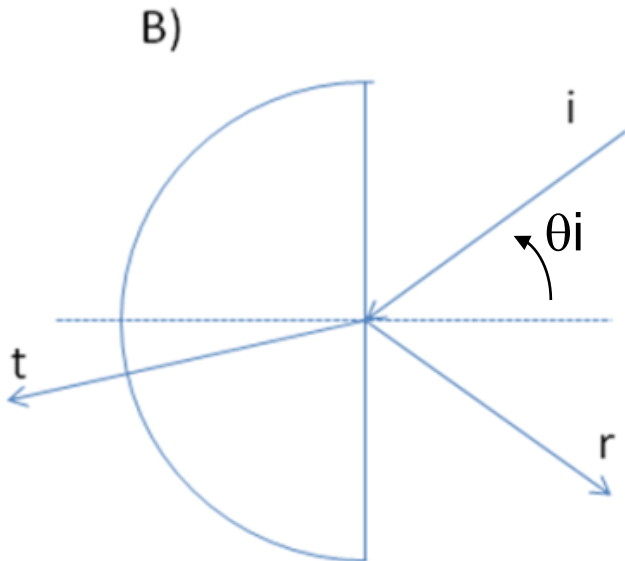
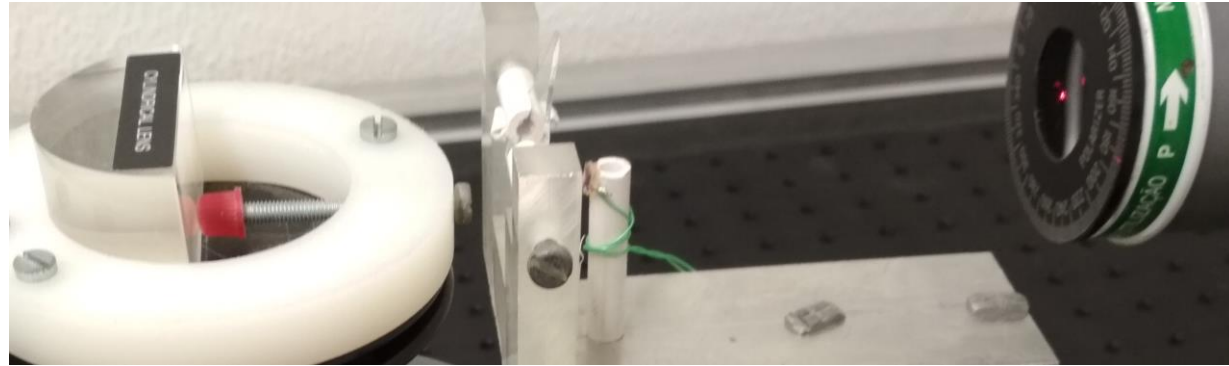




# Execução da experiência

## Alinhamento B

10) Verificar o alinhamento de forma a que a face plana se encontre virada para o laser ( alinhamento B)

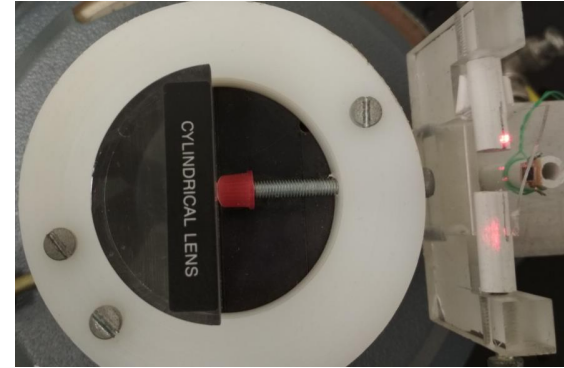




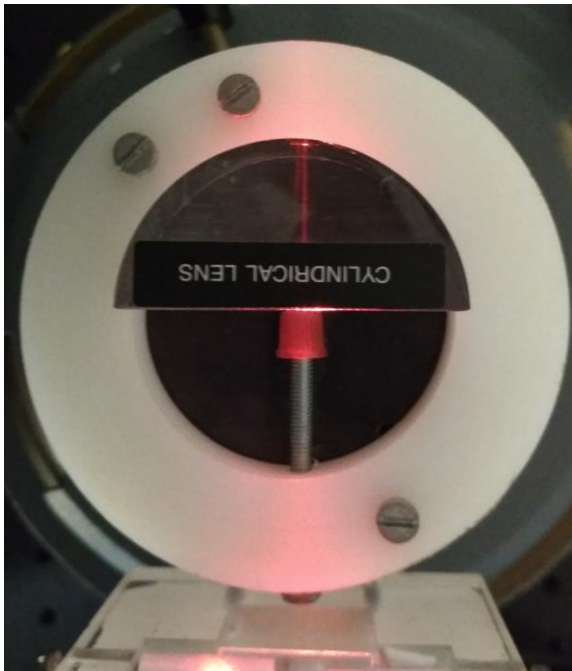
# Execução da experiência

## Alinhamento B

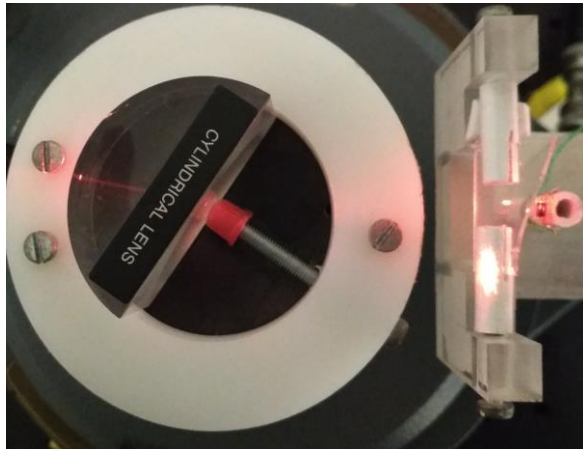
4) Alinhar o polarizador de modo a obter **a polarização paralela ou p**



5) Alinhar o detetor.  
Variar o ângulo de incidência  $\theta_i$  desde 0 a  $85^\circ$  em passos de  $5^\circ$ , registrando as potências dos **feixes transmitido e refletido**.

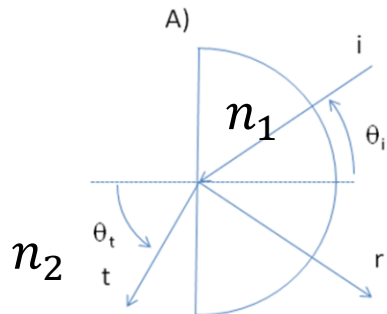


## Execução da experiência

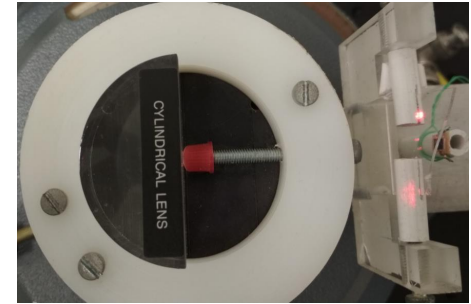
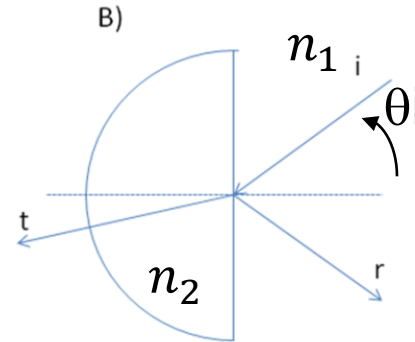


6) Medir o ângulo de incidência, para o qual existe uma diminuição acentuada da intensidade do feixe refletido, isto é o ângulo de Brewster,  $\theta_B$ .

## Sumário: equações de Snell-Descartes, ângulo crítico e ângulo Brewster



$n_1 > n_2$  **Alinhamento A**



$n_1 < n_2$  **Alinhamento B**

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad \cos \theta_t = \sqrt{1 - \left( \sin \theta_i \frac{n_1}{n_2} \right)^2}$$

**Ângulo crítico**  $\theta_c$  : ângulo incidente que marca o início da reflexão total, obtem-se para  $\theta_t = 90^\circ$ :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

**Alinhamento A**

**Polarização**  $\perp \parallel$

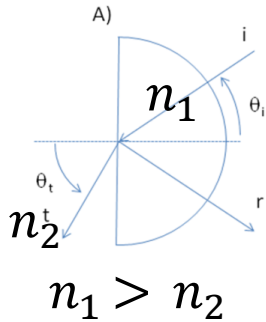
**Ângulo Brewster:**  $\theta_B$  : ângulo incidente para o qual o feixe refletido está completamente polarizado perpendicularmente ao plano de incidência devido à anulação total da sua componente horizontal.

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

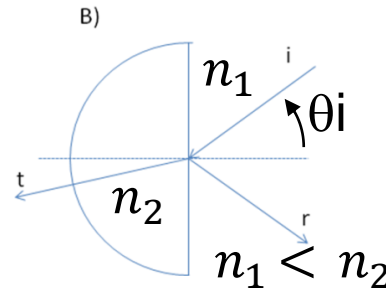
**Alinhamento A,B**

**Polarização**  $\parallel$

## Sumário: equações de Fresnel



**Alinhamento A**



**Alinhamento B**

$$r = \frac{E_r}{E_i}$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2(\theta_i) \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2}$$

$$t = \frac{E_t}{E_i}$$

$$t_{\perp} = 1 + r_{\perp}$$

$$\frac{n_2}{n_1} t_{\parallel} = 1 + r_{\parallel}$$

$\perp$  **Polarização perpendicular, s**

$\parallel$  **Polarização paralela, p**

**Transmitância T:** quociente entre a potência do feixe refratado e a potência do feixe incidente

$$T = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} t^2$$

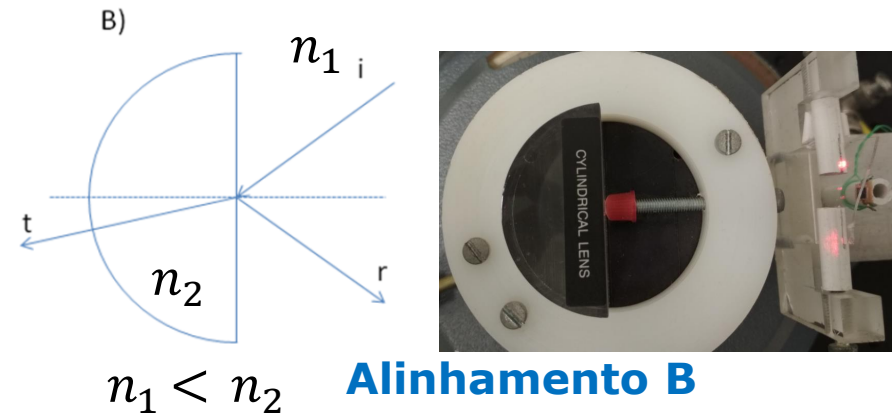
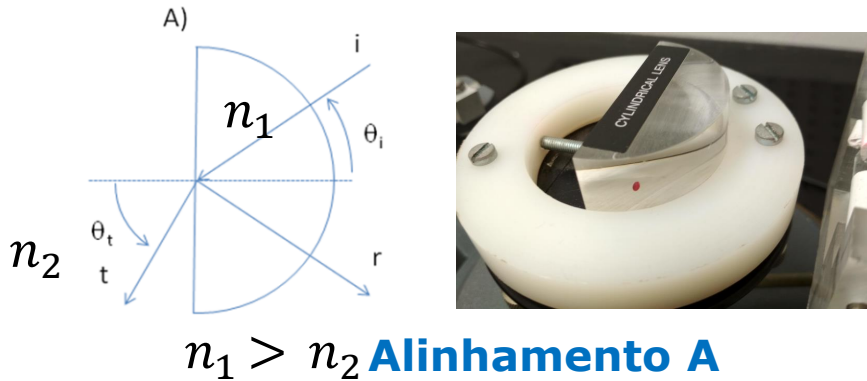
$\perp \quad \parallel$

**Refletância R :** quociente entre a potência do feixe refletido e a potência do feixe incidente

$$R = r^2$$

Atenuação do feixe no semi-cilindro, Lei de Lambert-Beer:  $I(d) = I_0 e^{-\alpha d}$

# Análise de dados



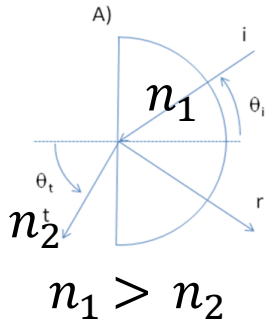
**1)** Determinar experimentalmente o **índice de refração do polímero** a partir dos resultados obtidos para:

**1a)** ângulo crítico  $\theta_c$  para **alinhamento A**,  
**polarização paralela e perpendicular**

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

**1b)** ângulo Brewster  $\theta_B$  para os **alinhamentos A e B** e  
**polarização paralela**.

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$



**Alinhamento A**

⊥ **Polarização perpendicular**

|| **Polarização paralela**

$$Rt = T_{21}(0)R_{12}(\theta i)T_{12}(0)$$

$$Tt = T_{21}(0)T_{12}(\theta i)$$

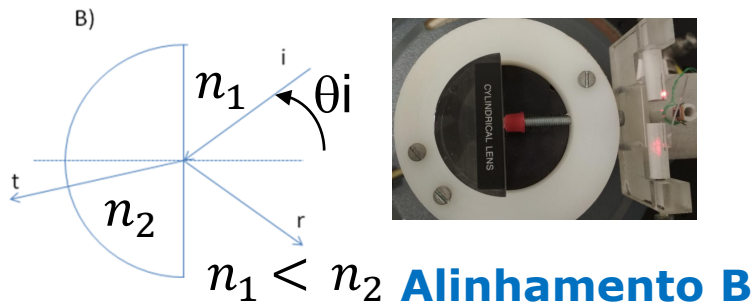
2) Para o **alinhamento A**, comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas obtidas pelas leis de Fresnel para a **Transmitância** total **Tt** e a **Refletância** total **Rt** normalizadas ao valor máximo, em função do ângulo de incidência

2a) para **polarização paralela**.

2b) para **polarização perpendicular**.

3) Para o **alinhamento A**, comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas obtidas pelas leis de Fresnel para o balanço energético **Rt+Tt**





⊥ **Polarização perpendicular**

|| **Polarização paralela**

$$R_t = R_{12}(\theta_i)$$

$$T_t = T_{12}(\theta_i) T_{21}(0)$$

4) Para o **alinhamento B**, comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas obtidas pelas leis de Fresnel para a **Transmitância total  $T_t$**  e a **Refletância total  $R_t$** , normalizadas ao valor máximo, em função do ângulo de incidência

2a) para **polarização paralela**.

2b) para **polarização perpendicular**.

3) Para o **alinhamento B**, comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas obtidas pelas leis de Fresnel para o balanço energético  **$R_t + T_t$**

FIM