

Trabalho Laboratorial

Radiação do Corpo Negro

João Figueirinhas e Raquel Crespo

Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho consiste em estudar a **radiação emitida por um modelo do corpo negro** (i.e um objeto ideal que absorve toda a radiação que nele incide).

Concretamente, vamos:

- 1) Estudar o **espectro de emissão de um modelo** do corpo negro, e verificar experimentalmente a lei de radiação de **Planck** e a **lei de deslocamento de Wien**, para vários valores da temperatura absoluta do corpo.
- 2) Estudar a **lei de Stefan**, isto é a intensidade da radiação emitida pelo corpo em função da sua temperatura.
- 3) Comparar a **emissividade** de diferentes superfícies para a mesma temperatura.

Descrição da montagem experimental-I

Para realizar o **estudo das leis de Planck e Wien**, dispomos da montagem apresentada na figura 1, que inclui o seguinte equipamento:

1-Lâmpada de filamento de tungsténio.

2-Fonte de alimentação.

3-Reóstato.

4-Voltímetro.

5-Amperímetro

6-Espectrómetro

7-Microvoltímetro.

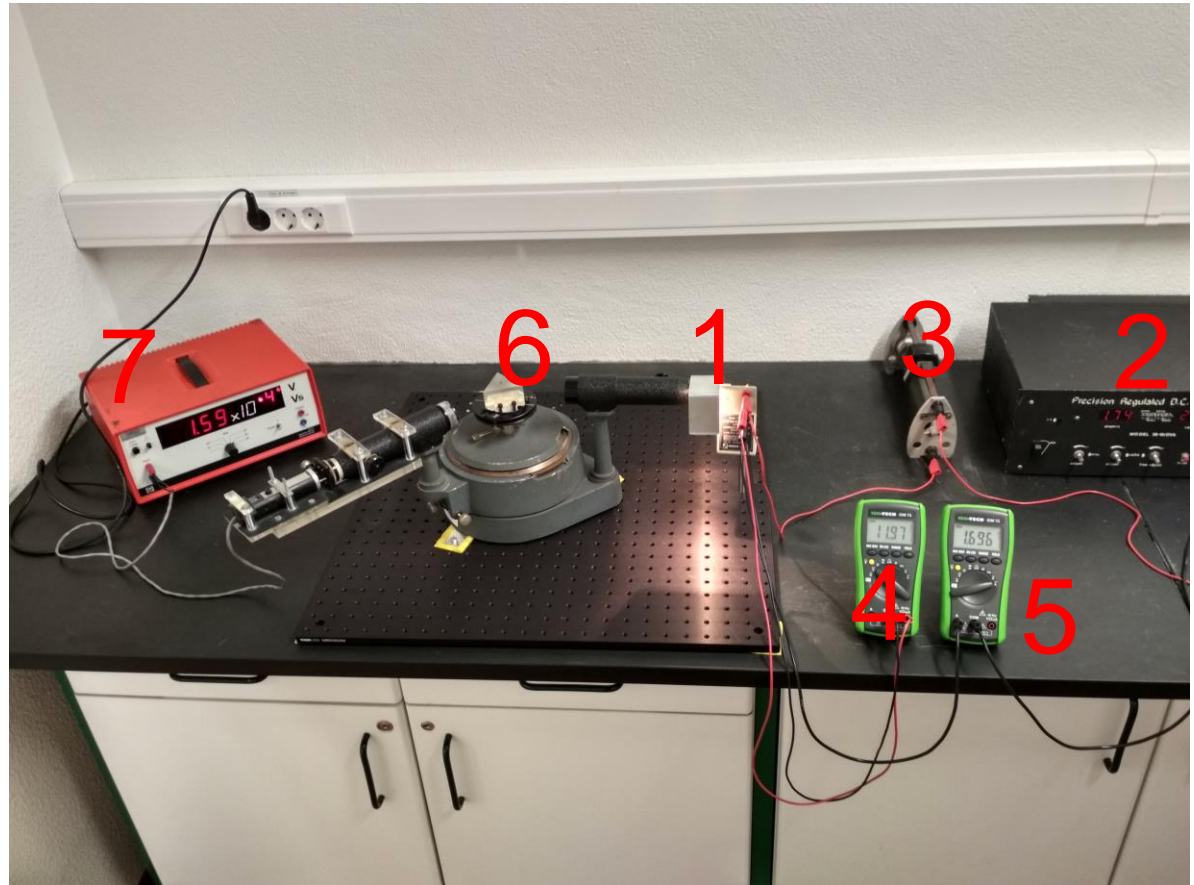
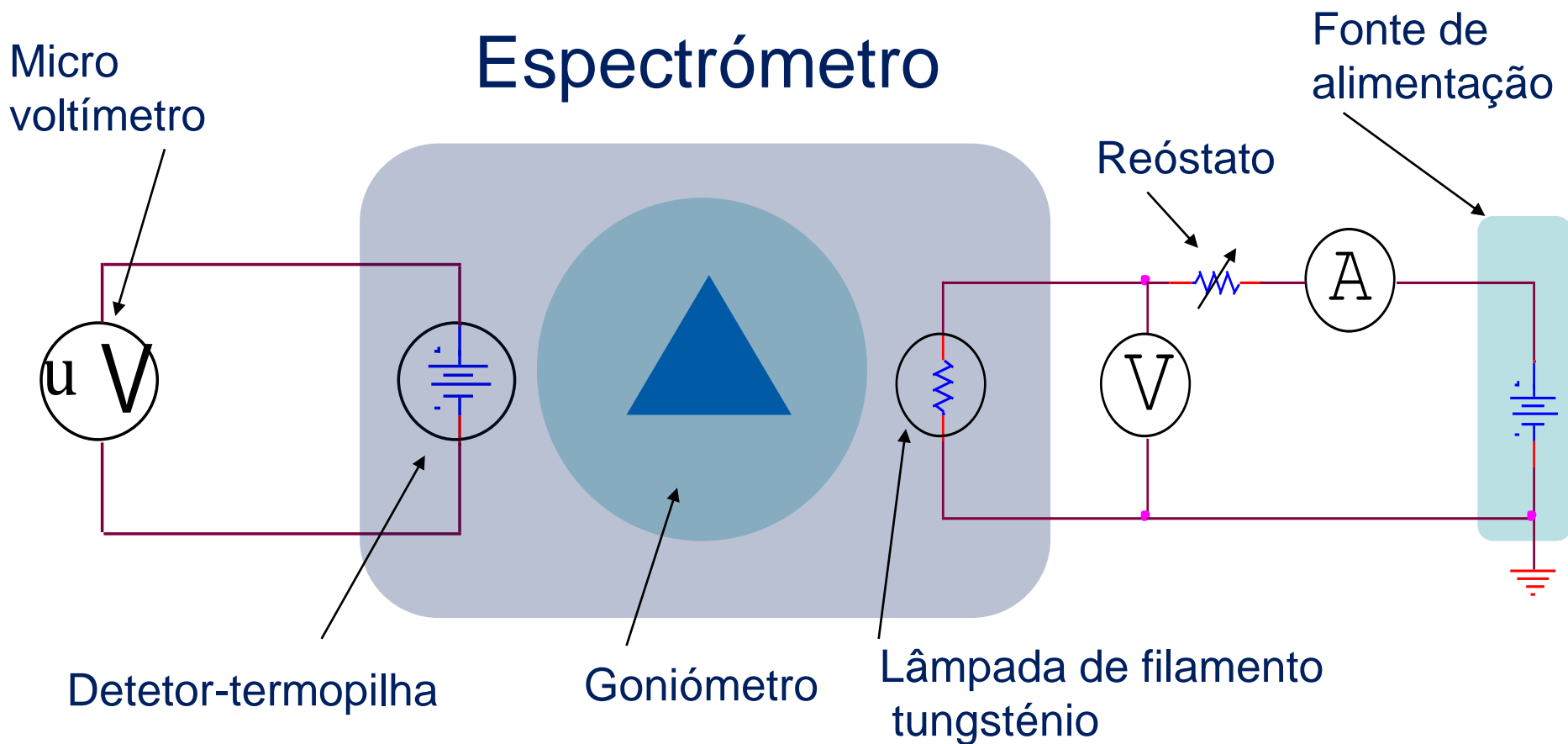


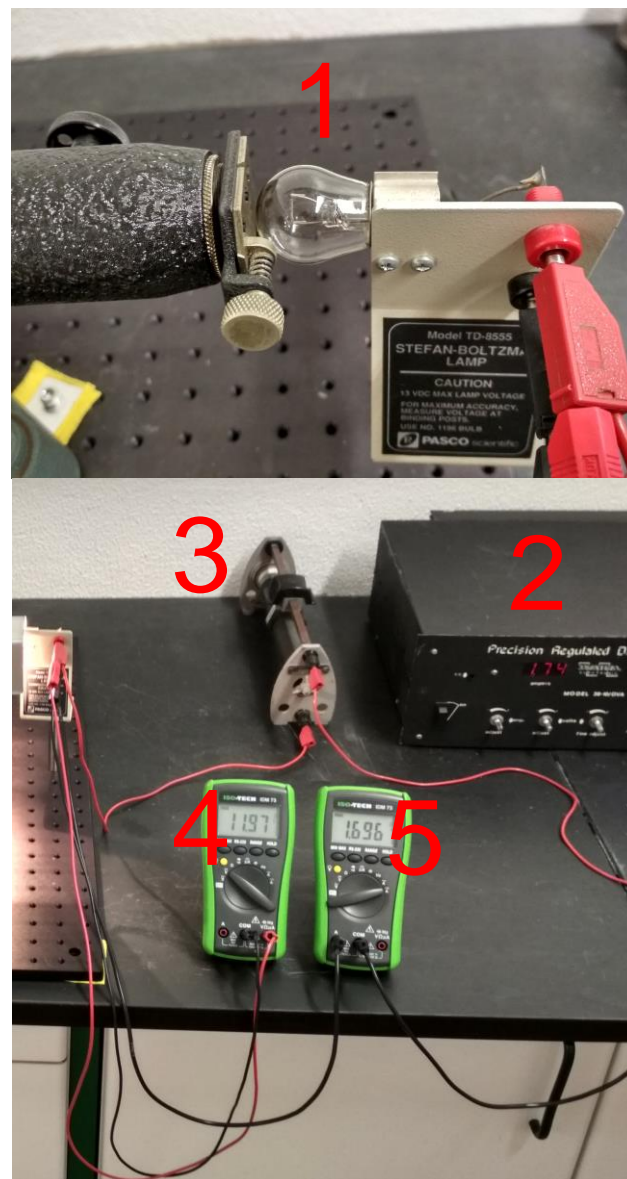
Figura 1. Montagem experimental-I

Esquema elétrico e diagrama de blocos da montagem-I



Detalhes da montagem experimental-I

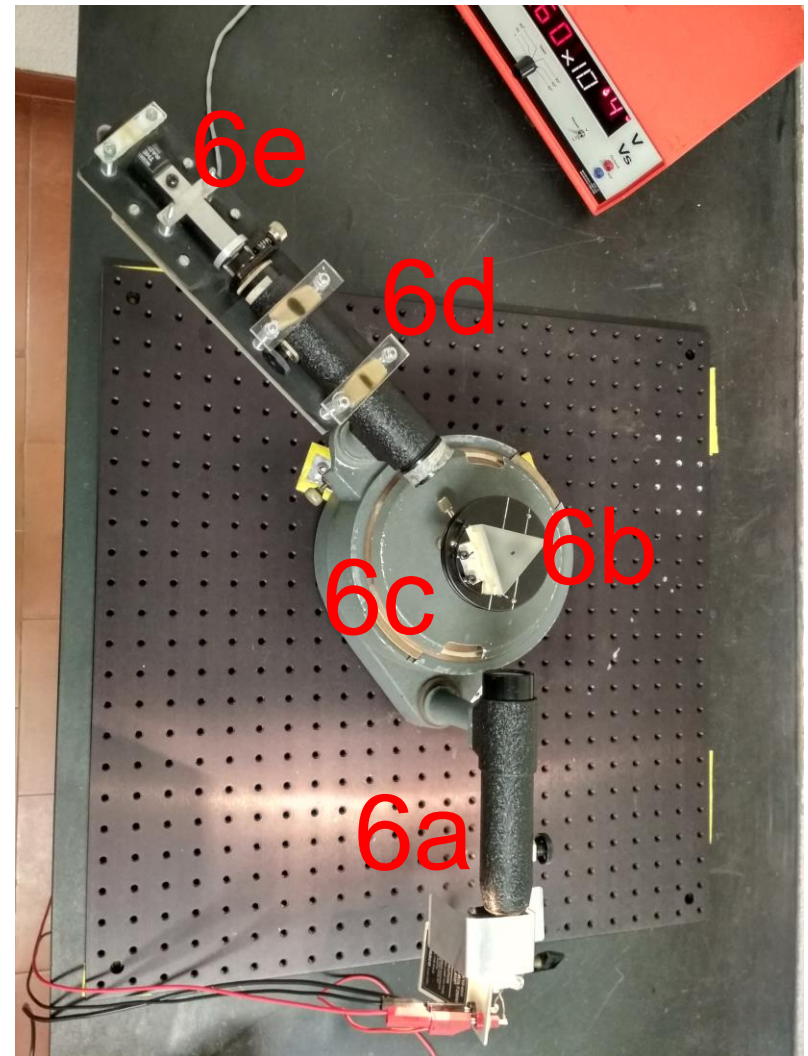
- A **lâmpada de filamento de tungsténio** (1) representa o nosso modelo de corpo negro.
- A lâmpada é alimentada por uma **fonte de alimentação** (2).
- O **reóstato** (3) colocado em série com a fonte de alimentação, impede a sobrecarga de tensão na lâmpada cujo máximo é de 13 V.
- O **Voltímetro** (4), em paralelo com a lâmpada, mede a tensão aos terminais da lâmpada.
- O **Amperímetro** (5), em série, mede a corrente que percorre o circuito da lâmpada.



Detalhes da montagem experimental-I

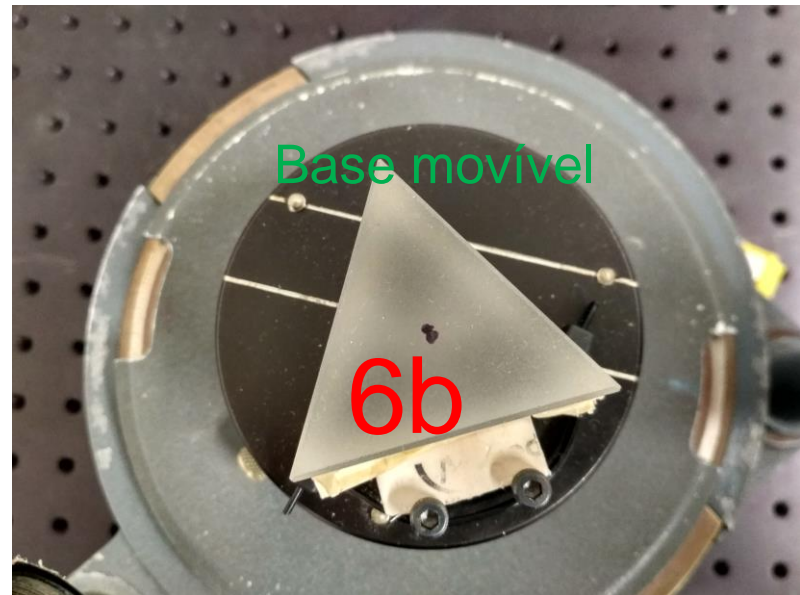
O espectrómetro (6). é composto pelos seguintes elementos:

- Um **braço de incidência (BI)** (6a) que recebe e colima a radiação da fonte incidente (lâmpada de tungsténio).
- A luz colimada incide no **prisma** (6b) colocado no centro do **goniómetro** (6c) .
- Um **braço de refração (BR)** (6d) recebe e colima a luz refractada do prisma fazendo-a incidir num **sensor de radiação - termopilha** (6e).



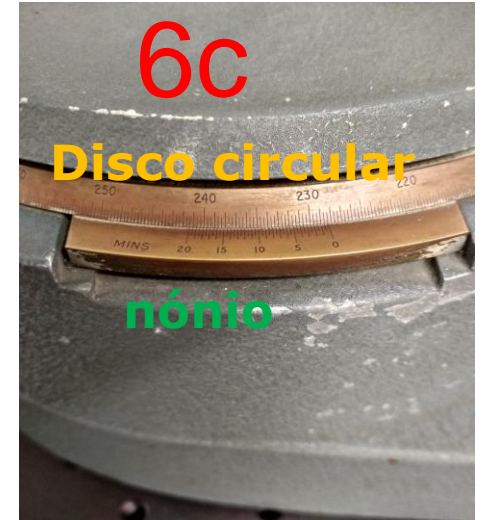
Detalhes da montagem experimental-I

- O **prisma** (6b) é um prisma equilátero que está colocado em cima de uma **base móvel** no topo do goniómetro.



Detalhes da montagem experimental-I

- O **goniómetro** (6c) é constituído por um **disco circular** dividido em 360° , 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 θ para o qual os dois traços do disco circular e do nóvio coincidem:

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

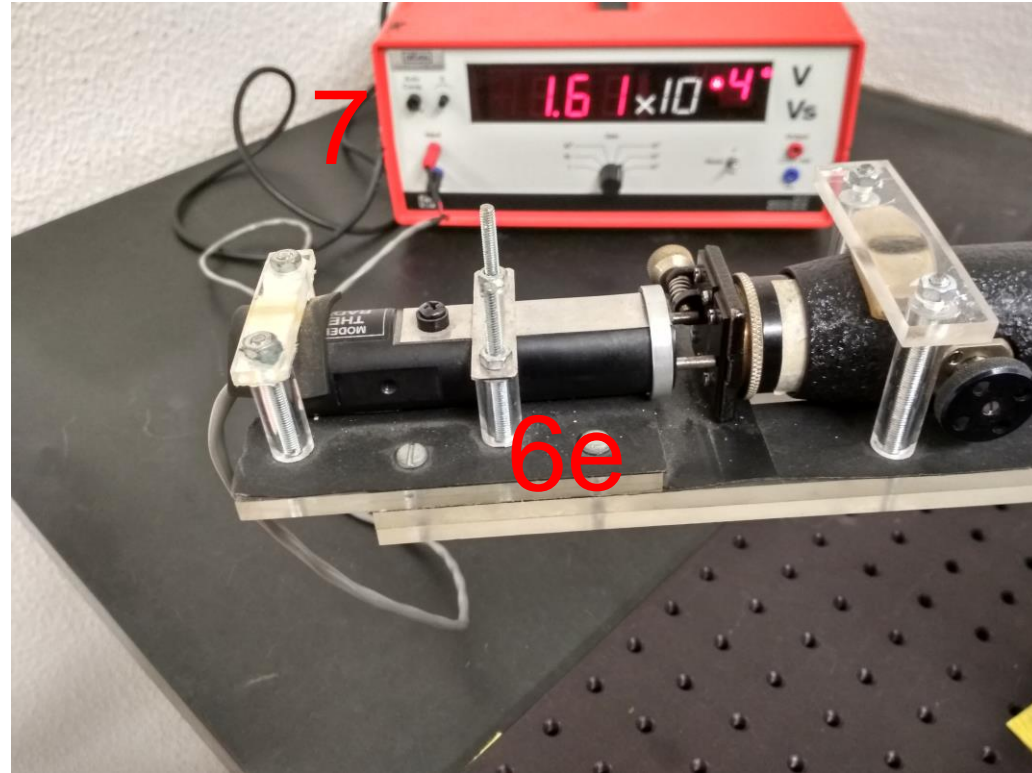
Leitura feita na
escala superior

Leitura feita
no nóvio



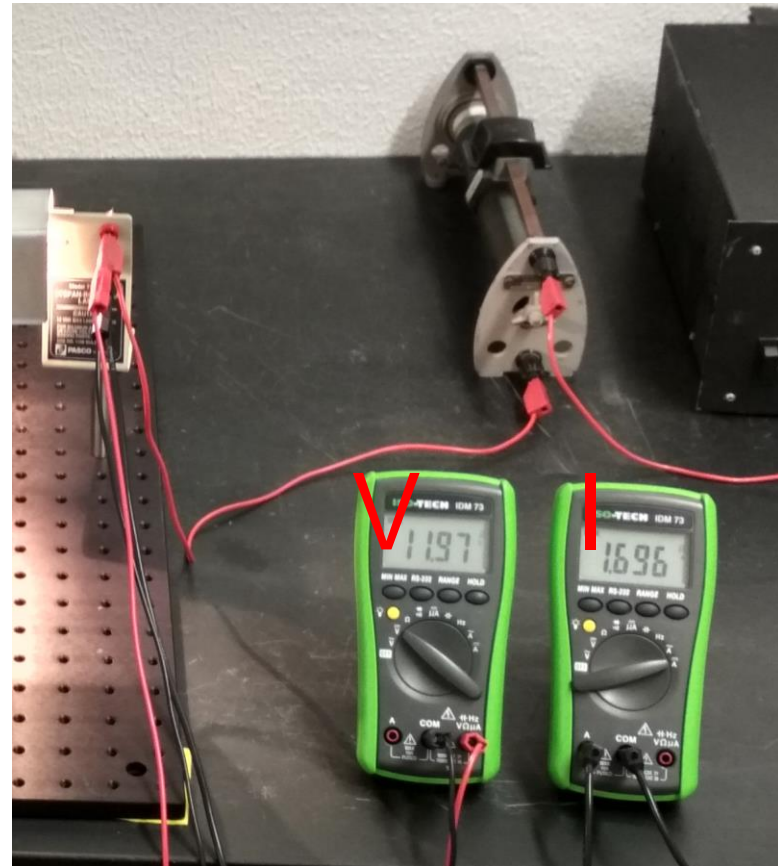
Detalhes da montagem experimental-I

- O sensor de radiação - **termopilha** (6e) mede a intensidade da radiação convertendo-a num sinal de tensão proporcional à intensidade incidente .
- O sinal de tensão registado na **termopilha** (6e) é lido no **microvoltmetro** (7) .



Execução da experiência I: leis de Planck, Wien

- **Ligar a lâmpada** de filamento de Tungsténio assegurando uma tensão máxima de alimentação de $V_{\text{max}} = 12 \text{ V}$.
- Verificar que lâmpada está bem alinhada com o braço de incidência.
- Registrar a tensão, **V**, aos terminais da lâmpada e a corrente, **I**, que a travessa.



Execução da experiência I: leis de Planck, Wien

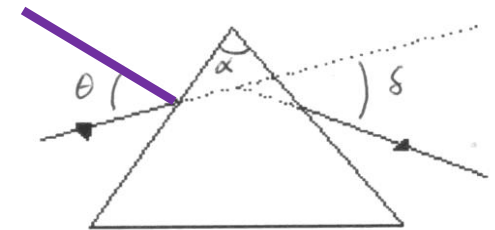
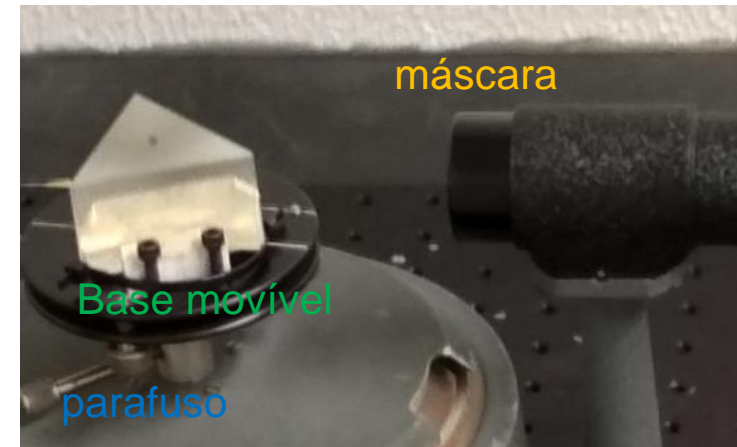
- Proceder à medição do **ângulo de incidência** θ do prisma:

* Escolher uma tensão de alimentação na lâmpada do fio de tungsténio, $V=12V$.

* Coloca-se sobre a lente de saída do **braço de incidência** do espectrómetro uma **máscara** com um fenda vertical e verifica-se se se observa a imagem da lâmpada.

* Roda-se a base móvel do prisma no sentido horário até que a fenda vertical reflectida coincida com a incidente, registando-se θ_1 no goniómetro.

* Retira-se a **máscara** e roda-se a base móvel do prisma no sentido anti-horário fazendo incidir a radiação refractada num alvo temporário de modo a ser bem visível o espectro da radiação incidente. Determinar a nova posição angular do prisma θ_2 .

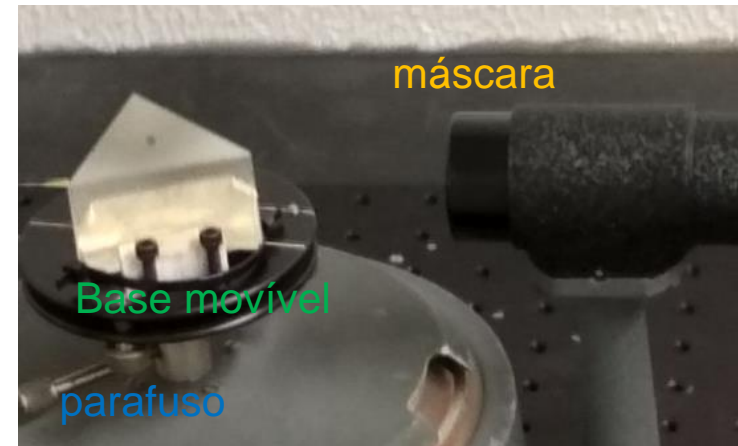


Execução da experiência I: leis de Planck, Wien

- Proceder à medição do **ângulo de incidência** θ do prisma:

* Determinar $\theta = \theta_1 - \theta_2$

* Fixar a base móvel do prisma, com o parafuso que se encontra debaixo da base.



$$\theta = \theta_1 - \theta_2$$

Execução da experiência I: leis de Planck, Wien

- Proceder à medição do **ângulo de refração** δ do prisma:



- * Retira-se a cobertura do detetor do BR (termopilha) e a cobertura entrada do BR. Roda-se o BR até observar a região verde do espectro visível a incidir na abertura do detetor e mede-se o ângulo correspondente à posição angular do braço BR, β .
- * Colocam-se de novo as **duas** coberturas anteriormente removidas e liga-se o microvoltímetro na escala mais sensível. Dado que o detetor é afetado pelo ruído térmico circundante, torna-se necessário fazer a sua compensação anulando a leitura do microvoltímetro pressionando o interruptor de ruído (IR).
- * Retira-se apenas a cobertura de entrada do BR e faz-se a leitura no microvoltímetro. Se ao colocar novamente a cobertura na entrada do BR, a leitura não for inferior a $3\text{ }\mu\text{V}$ deverá se repetir o processo de leitura.

Execução da experiência I: leis de Planck, Wien

- Proceder à medição do **ângulo de refração** δ do prisma:



- * Roda-se o BR no sentido horário fazendo-se medidas da tensão no microvoltímetro, **VD(i)** (traduz uma medida da emitância espectral) para cerca de 20 posições angulares do BR, separadas entre si de $1/3$ de grau e efectuando 3 medidas válidas para cada posição angular, β_i ($i=1,20$), para a tensão no microvoltímetro
- * Determinar a posição angular do máximo de intensidade luminosa, γ , para esta tensão de alimentação da lâmpada, com o auxílio do microvoltímetro.
- * Repetir as medidas para as 20 posições angulares distintas e as tensões de alimentação da lâmpada de **8.5V** e **5V**.
- * Retirar o prisma e alinhar os braços do goniómetro de modo a maximizar a leitura do microvoltímetro, registar a posição angular de BR, ε .

Análise de dados I: leis de Planck, Wien

2) Determinação dos comprimento de onda, λ_i , correspondentes a cada posição angular de BR, β_i , para cada valor de temperatura T , da lâmpada.

- Fazer a correcção do ângulo de refração:

$$\delta_i = \varepsilon - \beta_i$$

- Determinação do índice de refração :

$$n = \{ \sin^2(\theta) + [\sin(\delta - \theta + \alpha) + \cos(\alpha) \sin(\theta)]^2 / \sin(\alpha)^2 \}^{1/2}$$

sendo θ o ângulo de incidência no prisma e α o ângulo entre as faces do prisma.

- Determinação do comprimento de onda λ_i através da Tabela 2

Tabela 2: Valores do índice de refração do prisma em função do comprimento de onda da luz incidente.

| n | $\lambda(\text{nm})$ | n | $\lambda(\text{nm})$ | n | $\lambda(\text{nm})$ | n | $\lambda(\text{nm})$ | n | λ |
|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|-----------|
| 1.62420 | 515.1 | 1.61470 | 612.4 | 1.60540 | 795.1 | 1.59600 | 1227.9 | 1.58670 | 2455.8 |
| 1.62390 | 517.1 | 1.61450 | 615.5 | 1.60510 | 801.8 | 1.59580 | 1245 | 1.58650 | 2508.8 |
| 1.62370 | 519.2 | 1.61430 | 618.7 | 1.60490 | 808.7 | 1.59560 | 1262.5 | 1.58630 | 2563.6 |
| 1.62350 | 521.2 | 1.61400 | 621.9 | 1.60470 | 815.7 | 1.59530 | 1280.5 | 1.58610 | 2620.1 |
| 1.62320 | 523.3 | 1.61380 | 625.2 | 1.60440 | 822.8 | 1.59510 | 1299 | 1.58580 | 2678.5 |
| 1.62300 | 525.3 | 1.61360 | 628.5 | 1.60420 | 830.1 | 1.59490 | 1317.9 | 1.58560 | 2738.8 |
| 1.62280 | 527.4 | 1.61330 | 631.9 | 1.60400 | 837.6 | 1.59460 | 1337.4 | 1.58540 | 2801 |
| 1.62250 | 529.5 | 1.61310 | 635.4 | 1.60370 | 845.2 | 1.59440 | 1357.4 | 1.58510 | 2865.3 |
| 1.62230 | 531.6 | 1.61290 | 638.9 | 1.60350 | 853 | 1.59420 | 1377.9 | 1.58490 | 2931.7 |
| 1.62210 | 533.8 | 1.61260 | 642.5 | 1.60330 | 861 | 1.59390 | 1398.9 | 1.58470 | 3000.4 |
| 1.62180 | 535.9 | 1.61240 | 646.1 | 1.60300 | 869.2 | 1.59370 | 1420.5 | 1.58440 | 3071.3 |
| 1.62160 | 538.1 | 1.61220 | 649.8 | 1.60280 | 877.5 | 1.59350 | 1442.7 | 1.58420 | 3144.7 |
| 1.62130 | 540.3 | 1.61190 | 653.6 | 1.60250 | 886.1 | 1.59320 | 1465.5 | 1.58400 | 3220.5 |
| 1.62110 | 542.5 | 1.61170 | 657.5 | 1.60230 | 894.8 | 1.59300 | 1489 | 1.58370 | 3298.9 |
| 1.62090 | 544.7 | 1.61140 | 661.4 | 1.60210 | 903.7 | 1.59280 | 1513.1 | 1.58350 | 3380 |
| 1.62060 | 546.9 | 1.61120 | 665.4 | 1.60180 | 912.8 | 1.59250 | 1537.8 | 1.58330 | 3463.9 |
| 1.62040 | 549.2 | 1.61100 | 669.4 | 1.60160 | 922.2 | 1.59230 | 1563.3 | 1.58310 | 3550.8 |
| 1.62020 | 551.4 | 1.61070 | 673.6 | 1.60140 | 931.7 | 1.59210 | 1589.4 | 1.58280 | 3640.7 |
| 1.61990 | 553.7 | 1.61050 | 677.8 | 1.60110 | 941.5 | 1.59180 | 1616.3 | 1.58260 | 3733.7 |
| 1.61970 | 556.1 | 1.61030 | 682.1 | 1.60090 | 951.5 | 1.59160 | 1643.9 | 1.58240 | 3830 |
| 1.61950 | 558.4 | 1.61000 | 686.5 | 1.60070 | 961.8 | 1.59140 | 1672.4 | 1.58210 | 3929.8 |
| 1.61920 | 560.8 | 1.60980 | 690.9 | 1.60040 | 972.3 | 1.59110 | 1701.6 | 1.58190 | 4033.1 |
| 1.61900 | 563.2 | 1.60960 | 695.5 | 1.60020 | 983 | 1.59090 | 1731.7 | 1.58170 | 4140.1 |
| 1.61870 | 565.6 | 1.60930 | 700.1 | 1.60000 | 994 | 1.59070 | 1762.6 | 1.58140 | 4251.1 |
| 1.61850 | 568.1 | 1.60910 | 704.8 | 1.59970 | 1005.2 | 1.59050 | 1794.5 | 1.58120 | 4366 |
| 1.61830 | 570.6 | 1.60890 | 709.7 | 1.59950 | 1016.8 | 1.59020 | 1827.2 | 1.58100 | 4485.2 |
| 1.61800 | 573.1 | 1.60860 | 714.6 | 1.59930 | 1028.6 | 1.59000 | 1861 | 1.58070 | 4608.8 |
| 1.61780 | 575.7 | 1.60840 | 719.6 | 1.59910 | 1040.6 | 1.58980 | 1895.7 | 1.58050 | 4737 |
| 1.61760 | 578.3 | 1.60820 | 724.7 | 1.59880 | 1053 | 1.58950 | 1931.5 | 1.58030 | 4869.9 |
| 1.61730 | 580.9 | 1.60790 | 730 | 1.59860 | 1065.7 | 1.58930 | 1968.3 | 1.58010 | 5007.9 |
| 1.61710 | 583.5 | 1.60770 | 735.3 | 1.59840 | 1078.7 | 1.58910 | 2006.2 | 1.57980 | 5151.1 |
| 1.61690 | 586.2 | 1.60750 | 740.7 | 1.59810 | 1092 | 1.58880 | 2045.3 | 1.57960 | 5299.7 |
| 1.61660 | 589 | 1.60720 | 746.3 | 1.59790 | 1105.7 | 1.58860 | 2085.6 | 1.57940 | 5454 |
| 1.61640 | 591.7 | 1.60700 | 752 | 1.59770 | 1119.6 | 1.58840 | 2127.1 | 1.57910 | 5614.2 |
| 1.61620 | 594.6 | 1.60680 | 757.7 | 1.59740 | 1134 | 1.58810 | 2169.8 | 1.57890 | 5780.6 |
| 1.61590 | 597.4 | 1.60650 | 763.7 | 1.59720 | 1148.7 | 1.58790 | 2213.9 | 1.57870 | 5953.5 |
| 1.61570 | 600.3 | 1.60630 | 769.7 | 1.59700 | 1163.7 | 1.58770 | 2259.3 | 1.57840 | 6133.2 |
| 1.61540 | 603.3 | 1.60610 | 775.8 | 1.59670 | 1179.2 | 1.58740 | 2306.2 | 1.57820 | 6320 |
| 1.61520 | 606.2 | 1.60580 | 782.1 | 1.59650 | 1195 | 1.58720 | 2354.5 | 1.57800 | 6514.2 |
| 1.61500 | 609.3 | 1.60560 | 788.6 | 1.59630 | 1211.2 | 1.58700 | 2404.3 | 1.57780 | 6716.1 |

Análise de dados I: leis de Planck, Wien

1) Determinação da temperatura, T_1 , do filamento de Tungsténio da lâmpada usada como modelo do Corpo Negro.

- é feita por interpolação dos dados representados na Tabela 1, sabendo que o valor de referência para a resistência do filamento com temperatura de $T=292.35$ K é $R(292.35)=0.4911 \Omega$.

- Tomando como exemplo de referência os resultados para a tensão de alimentação de 12V, para determinar a temperatura T_1 da lâmpada, começa-se por fazer o cálculo da resistência do filamento da lâmpada a partir da tensão, V_1 , medida aos seus terminais, e da corrente, I_1 , que a percorre.

$$R(T_1) = V_1/I_1$$

$$Y_1 = R(T_1)/R(292.35)$$

- Determina-se o declive da recta, m , usando os pontos da tabela em redor de Y_1 .

$$Y(T) = m T + b$$

E determina-se T_1

| T/K | R(T)/R(292.35) |
|--------|----------------|
| 292,35 | 1 |
| 300 | 1,036625 |
| 400 | 1,522336 |
| 500 | 2,021194 |
| 600 | 2,533535 |
| 700 | 3,059699 |
| 800 | 3,600023 |
| 900 | 4,154845 |
| 1000 | 4,724503 |
| 1100 | 5,309336 |
| 1200 | 5,909679 |
| 1300 | 6,525873 |
| 1400 | 7,158254 |
| 1500 | 7,807161 |
| 1600 | 8,472932 |
| 1700 | 9,155904 |
| 1800 | 9,856415 |
| 1900 | 10,5748 |
| 2000 | 11,31141 |
| 2100 | 12,06657 |
| 2200 | 12,84061 |
| 2300 | 13,63389 |
| 2400 | 14,44674 |
| 2500 | 15,27949 |
| 2600 | 16,13248 |
| 2700 | 17,00605 |
| 2800 | 17,90054 |
| 2900 | 18,81629 |
| 3000 | 19,75363 |
| 3100 | 20,71291 |
| 3200 | 21,69445 |
| 3300 | 22,69861 |
| 3400 | 23,72571 |
| 3500 | 24,77609 |
| 3600 | 25,8501 |

Tabela 1: Valores da resistência relativa do filamento em função da temperatura

Análise de dados I: leis de Planck, Wien

2) Efectuar a representação gráfica da Intensidade espectral experimental $I_{\text{exp}}(\lambda, T)$ (ou seja a intensidade da radiação emitida por unidade de área numa determinada direcção) e comparar com a Intensidade teórica dada pela lei de Planck, normalizando as duas curvas pelo valor correspondendo à intensidade máxima, isto é, nomeadamente $I_{\text{exp}}(\lambda, T) / I_{\text{exp}}(\lambda_{\text{max}}, T)$.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad \text{Lei de Planck}$$

- Representar graficamente o comprimento de onda correspondente ao máximo da intensidade λ_{max} em função do inverso da temperatura, $\lambda_{\text{max}} = B/T$ comparando o valor encontrado para B com a constante de Wien, ω .

$$\lambda_{\text{max}} = \omega / T \quad \omega = 2.8977729 \times 10^{-3} \text{ (m} \cdot \text{K)}$$

Descrição da montagem experimental-II

Para realizar o **estudo experimental da lei de Stefan**, dispomos da montagem apresentada na figura 3, que inclui o seguinte equipamento:

- 1- Lâmpada de filamento de tungsténio.
- 2- Termopilha.
- 3- Voltímetro
- 4- Circuito de alimentação da lâmpada

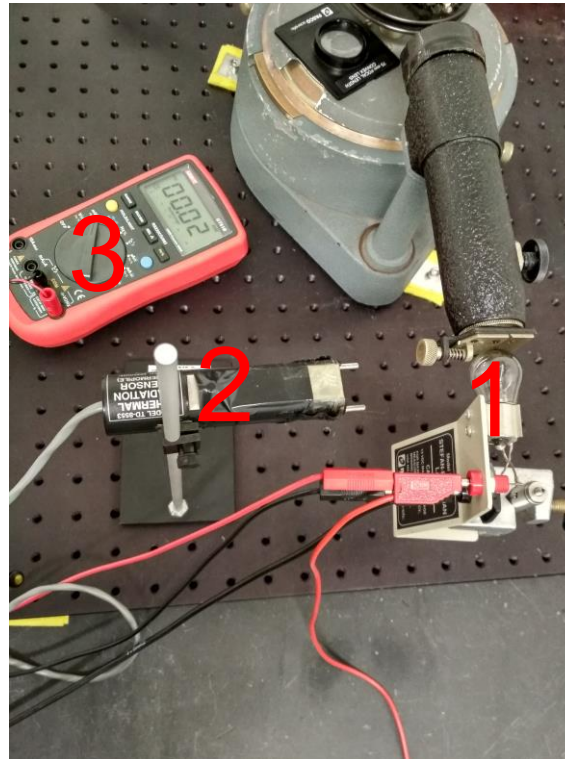


Figura 3. Montagem experimental-II

Esquema elétrico da montagem-I

Para realizar o **estudo das leis de Stefan**, o esquema elétrico e blocos de montagem está representado na figura 4:

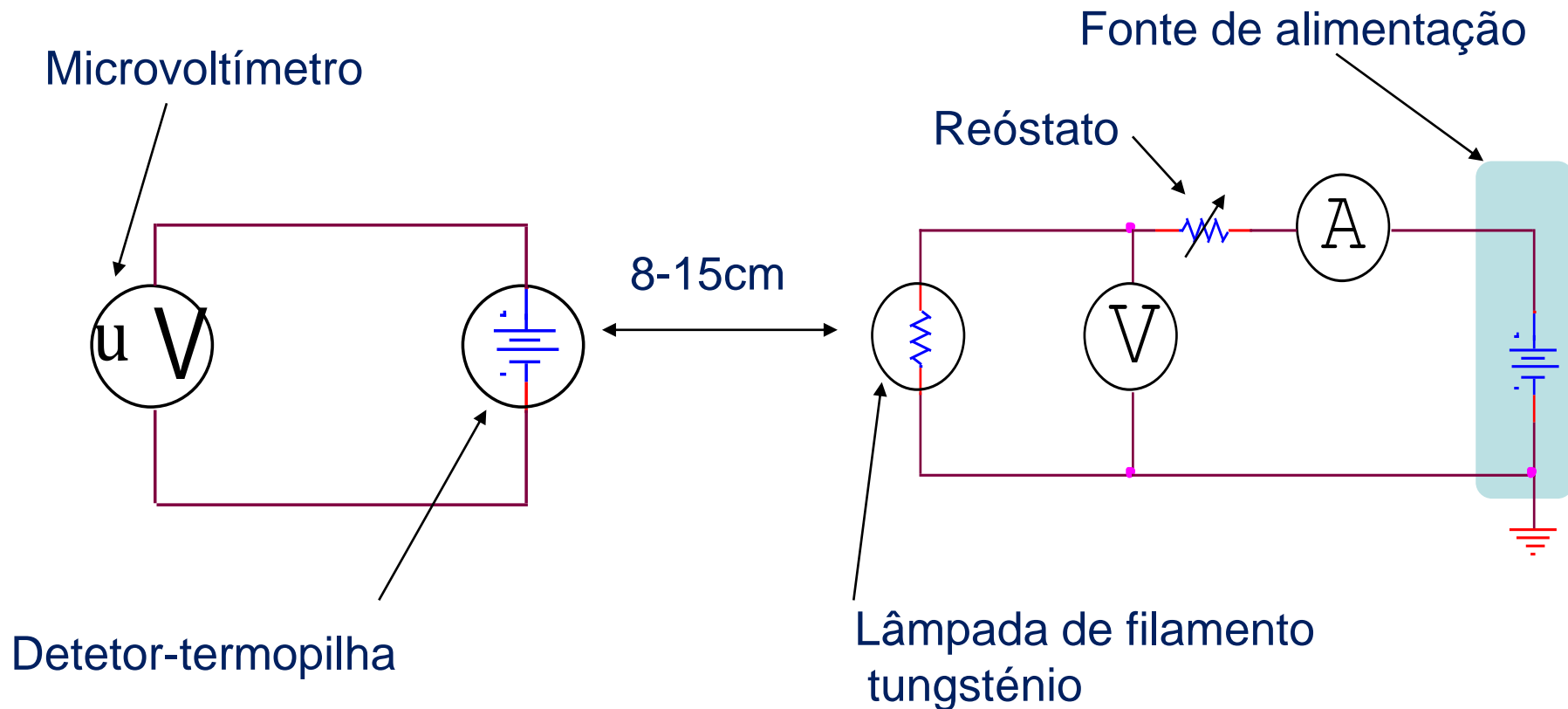


Figura 2: Esquema elétrico de montagem

Detalhes da montagem experimental-II

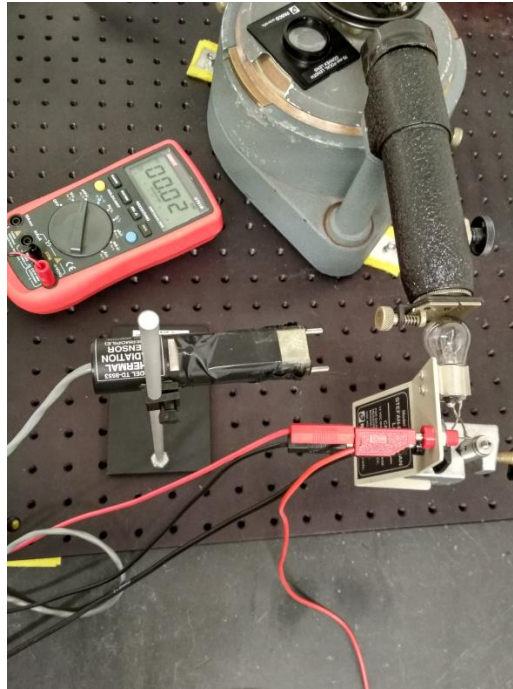
A **termopilha** (2) é um sensor de radiação que produz uma tensão lida por um **voltímetro** (3) que é proporcional à intensidade da radiação incidente.

A resposta da termopilha é essencialmente constante na região dos infravermelhos, variando a tensão de saída entre 0.002 e 100 mV:



Execução da experiência II: lei de Stephen

Colocar a termopilha a cerca de 8-15 cm da lâmpada



- 1) Colocar a tensão de alimentação da lâmpada a 5 V
- 2) Medir a Temperatura de trabalho de forma análoga a I
- 3) Medir a tensão no voltímetro
- 4) Variar unitariamente a tensão de alimentação até 12V e repetir 2 e 3

- 1) Representar graficamente o logaritmo da intensidade da radiação emitida versus o logaritmo da temperatura absoluta
- 2) Determinar o declive da reta
- 3) Comparar este valor com o previsto pela lei de Stephen
- 4) Relacionar com os resultados obtidos em I

$$F = e\sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{)}$$

Descrição da montagem experimental-III

Para realizar o **estudo das emissividades de diferentes superfícies**, dispomos da montagem apresentada na figura 3, que inclui o seguinte equipamento:

- 1- Cubo de Leslie.
- 2- Termómetro de termopar.
- 3-Sensor de radiação (Termopilha).
- 4- Voltímetro
- 5- Termómetro ótico

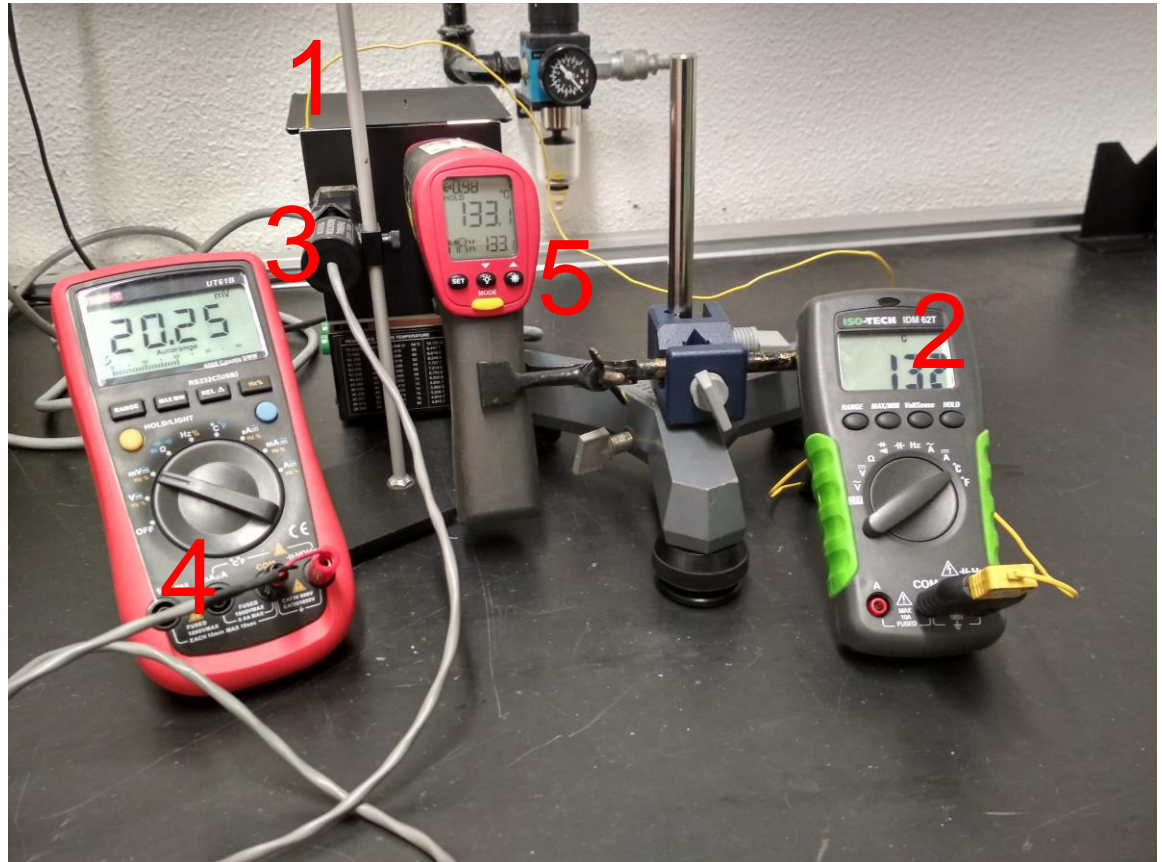


Figura 3. Montagem experimental-II

Detalhes da montagem experimental-III

Para realizar o estudo das emissividades, a fonte de radiação a estudar é um cubo de metálico, **cubo de Leslie**, com quatro faces de superfícies distintas (10cmx10cm):

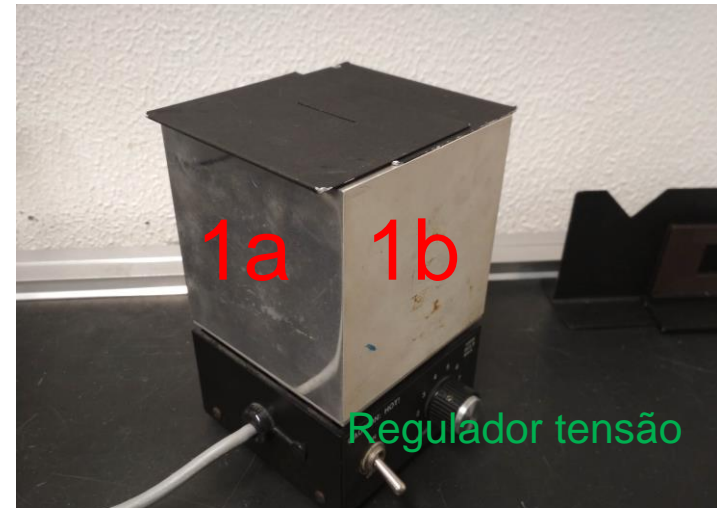
(1a)- Espelhada.

(1b)- Branca .

(1c)- Cinzenta .

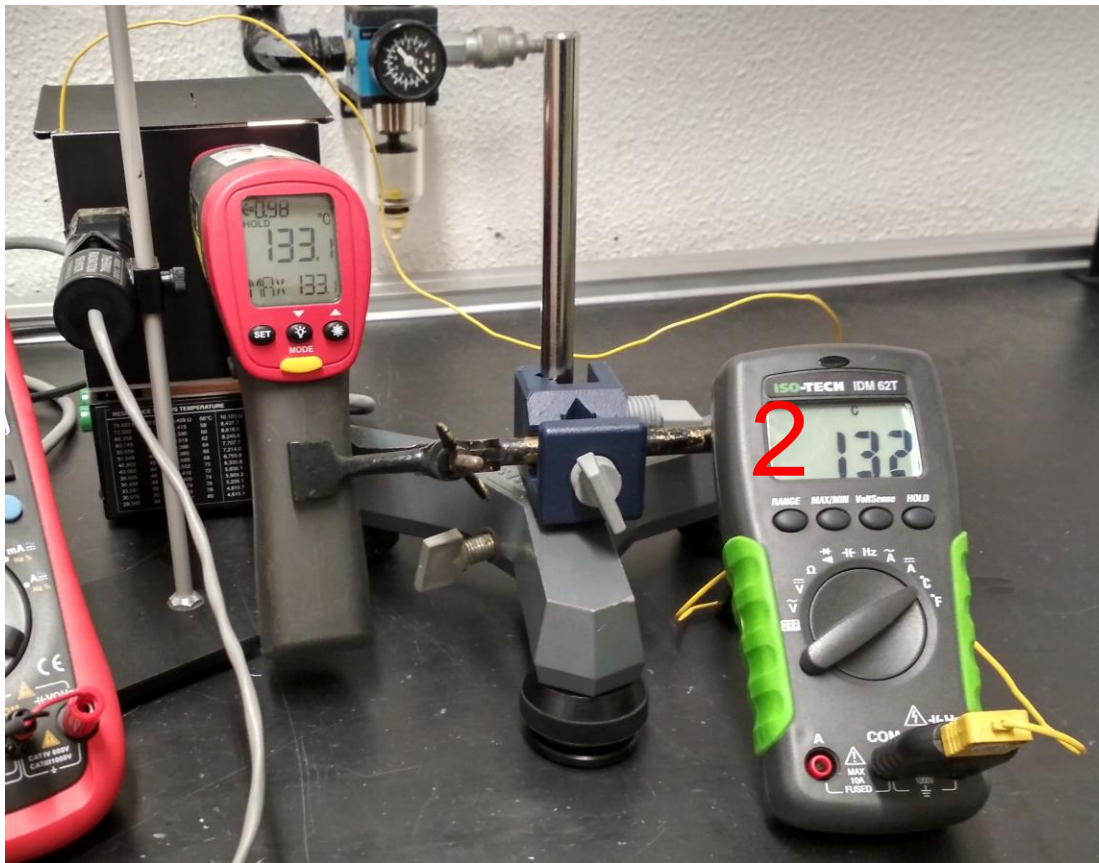
(1d)- Preta

O fonte de calor colocada dentro do cubo de Leslie é uma lâmpada de incandescencia alimentada por uma **fonte de tensão regulável**.



Detalhes da montagem experimental-III

A temperatura das faces do **cubo de Leslie**, é medida diretamente pelo termómetro de termopar (2):



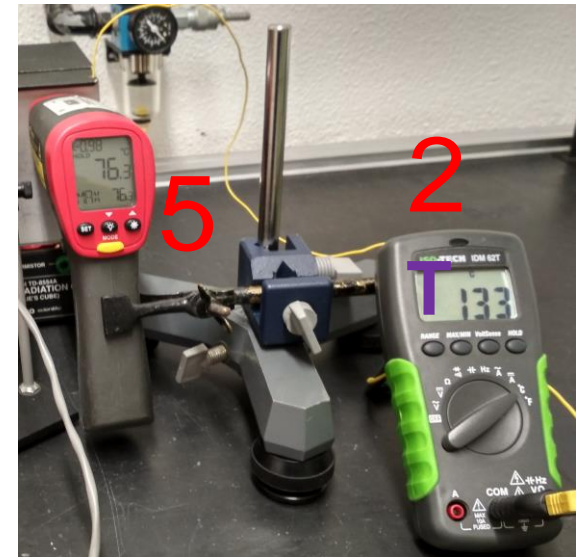
Detalhes da montagem experimental-III

A **termopilha** (3) produz uma tensão lida por um **voltímetro** (4) que é proporcional à intensidade da radiação incidente.



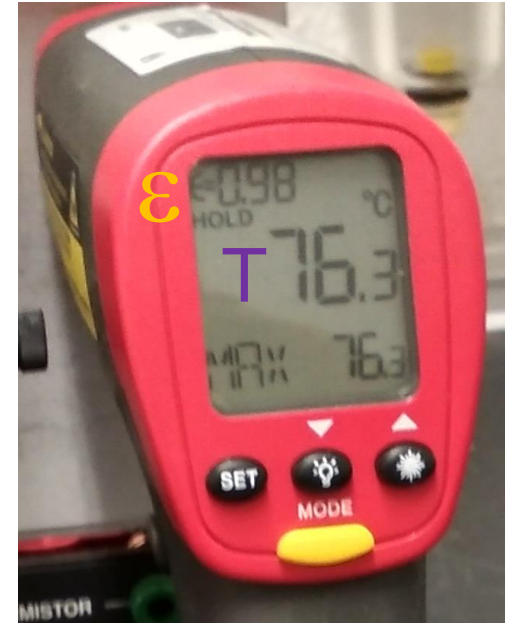
Detalhes da montagem experimental-III

- A emissividade de cada superfície, **S**, do cubo de Leslie é determinada usando um **termómetro ótico no infravermelho** (5).
- Este termómetro ótico deverá ser colocado, sem contacto e perpendicularmente à superfície **S** do cubo de Leslie que está em equilíbrio térmico à temperatura **T** medida pelo termopar (2).
- A superfície **S** recebe a radiação **I**: no caso geral, parte é reflectida, **R**, e parte é absorvida, **A**.
A radiação emitida pela superfície à temperatura T , é ϵI sendo ϵ emissividade.
(para o caso do corpo negro, objeto ideal que absorve toda a radiação que nele incide, $\epsilon=1$)



Detalhes da montagem experimental-III

- O termómetro ótico permite medir temperaturas, T , sem contacto direto com o objeto. Este emite radiação no domínio do infravermelho, dependendo da emissividade, ε do corpo que é analisada pelo dispositivo e convertida numa informação de temperatura.



Esquema de blocos da montagem-III

Para realizar o **estudo das emissividades**, o esquema de blocos de montagem está representado na figura 5:

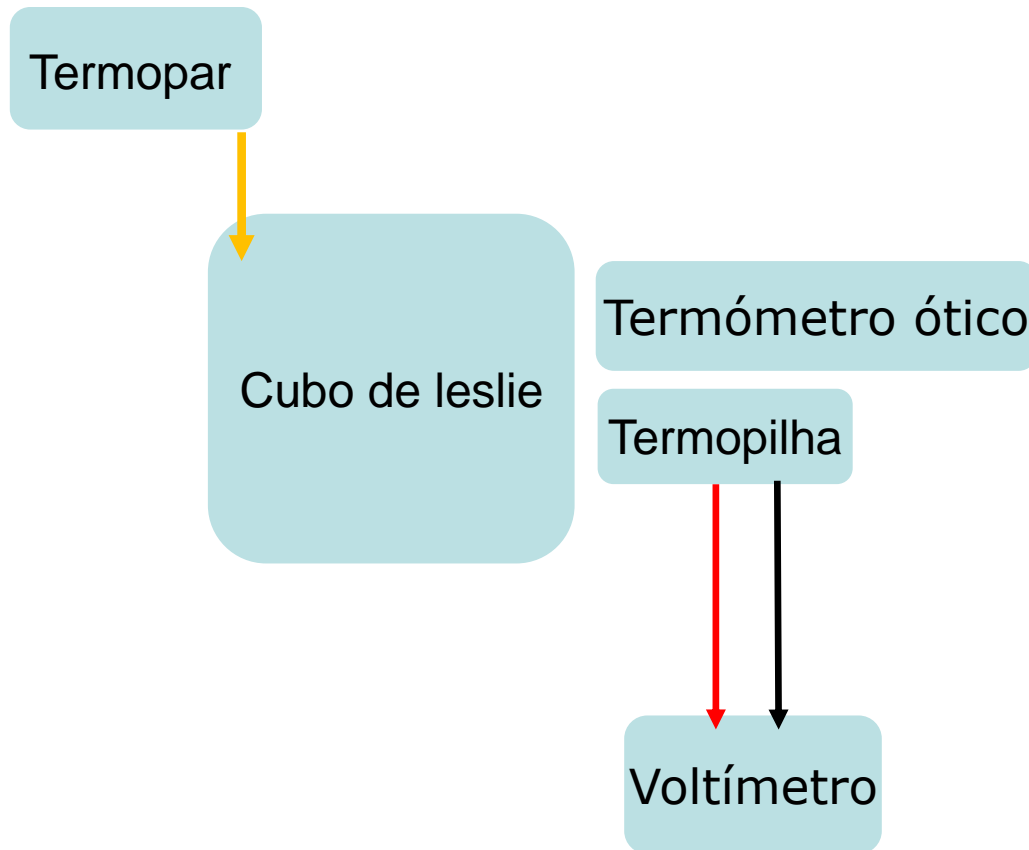


Figura 5: Esquema de blocos de montagem III

Execução da experiência III: Estudo das emissividades

Medida usando **termómetro ótico** :

- Colocar a ponta do **Termopar** dentro do cubo de Leslie

I) Alimentar o **cubo de Leslie** com $V_1 = V_{\max}$ deixando estabilizar a temperatura no termopar.

- Colocar o **termómetro ótico** a um dedo da **face i do cubo de Leslie**. Carregar em SET e mudar a emissividade ϵ_i , de modo a que a temperatura registada, T_i , seja igual á temperatura medida pelo termopar.

- Repetir este procedimento para cada face.

Obtem-se então o conjunto de medidas para cada face **(i , ϵ_i , T_i)** com $i=1,4$



Execução da experiência III: Estudo das emissividades

Medida usando **termopilha**:

- Colocar o fio do **termopar** dentro do cubo de Leslie

I) Alimentar o **cubo de Leslie** com $V_1 = V_{\max}$ deixando estabilizar a temperatura.

- Colocar o **termopilha** a cerca de 3 dedos da **face i do cubo de Leslie** e registrar o sinal de tensão no Voltímetro, V_i .

Repetir este procedimento para cada face.

Obtém-se então o conjunto de medidas para cada face (i, V_i, T_i) com $i=1,4$



Análise dados da experiência III: Estudo das emissividades

Análise dos resultados:

A tensão lida no Voltímetro ligado à termopilha é proporcional à intensidade da radiação I . Para cada face i tem-se:

$$I_i = \varepsilon_i \sigma T^4$$

A tensão lida no Voltímetro ligado à termopilha é proporcional à intensidade da radiação pelo que:

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} = \frac{I_i}{I_j} = \frac{V_i}{V_j}$$

- Comparar estas razões com os valores obtidos usando o termómetro ótico.
- Discutir o princípio de funcionamento do termómetro ótico.



FIM