

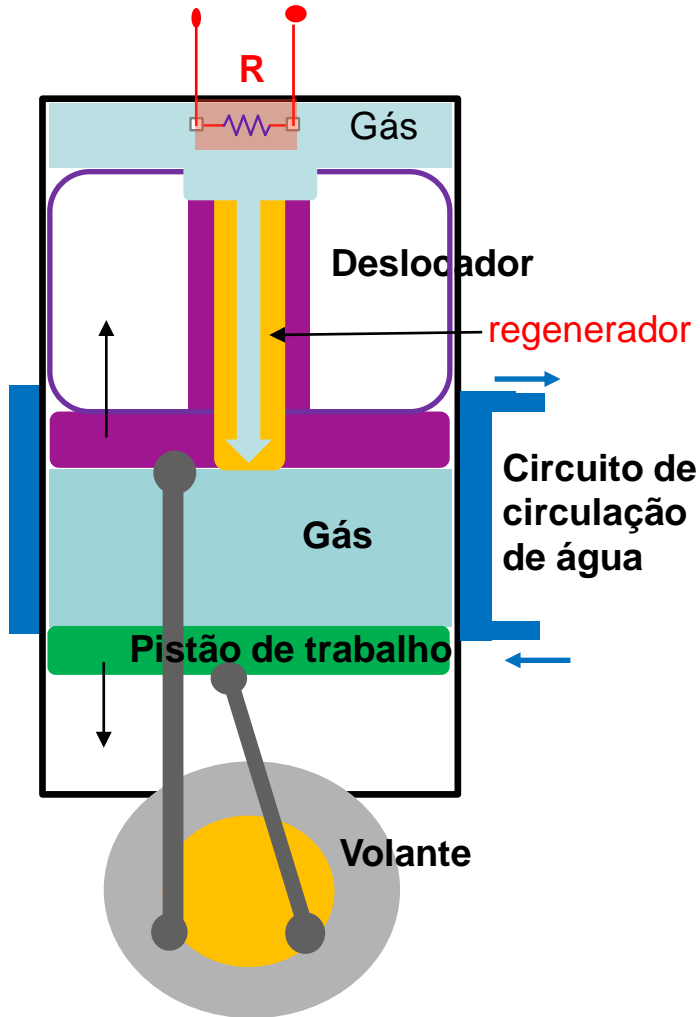
Trabalho Laboratorial

Motor de stirling

João Figueirinhas e Raquel Crespo

Objetivos do trabalho

O objetivo do trabalho consiste em estudar e caracterizar o **motor de Stirling (MS), do tipo β** que pode operar como **máquina térmica** ou como **bomba de calor**. Concretamente, vamos determinar:



1) máquina térmica:

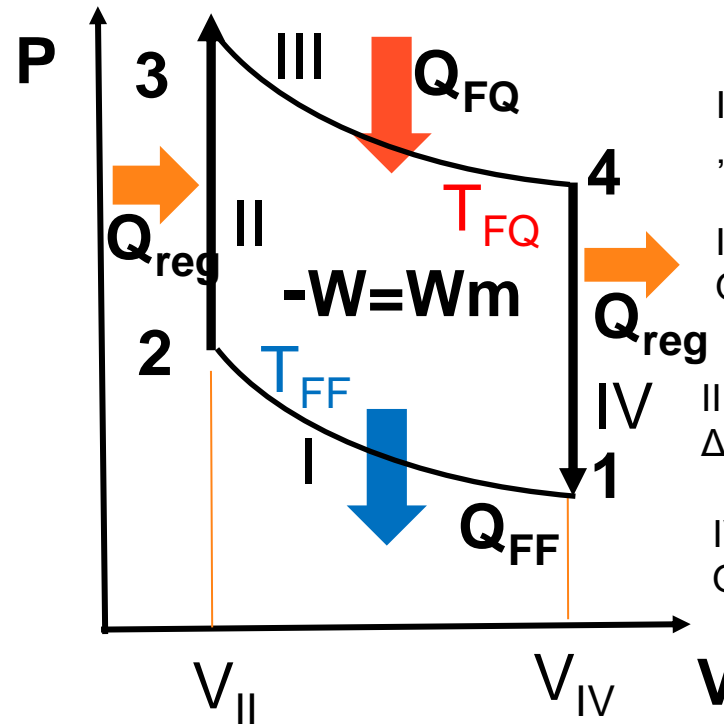
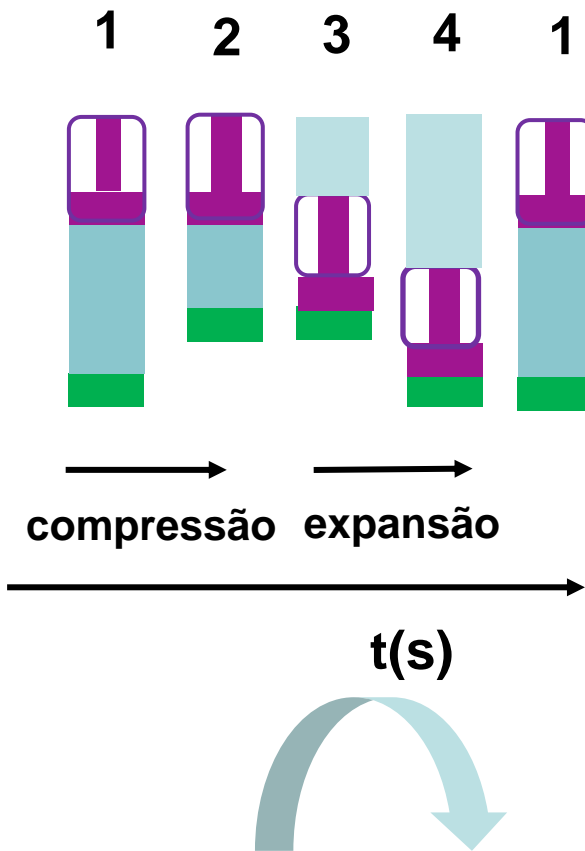
- Taxas de energia transferida ($P_{FQ}, P_{FF}, P_{gás}, P_{Wm}$),
- Potência de perdas energéticas total, $P_{perdas-tot}$, e por atrito, P_{atrito} .
- Rendimento real, η_1 , rendimentos corrigidos, e rendimento da máquina de Carnot, η_{Carnot} , e sua dependência na tensão da fonte de alimentação.

2) bomba de calor:

- Taxas de energia transferida ($P_{FQ}, P_{FF}, P_{gás}, P_{Wm}$),
- Potência das perdas energéticas total,
- Eficiência real, ε_1 , eficiência corrigida e de Carnot, ε_{Carnot}

Objetivos do trabalho

Ciclo de Stirling



$$\Delta U = Q + W$$

I-Compressão isotérmica
 $\Delta U = 0, Q_{FF} = -W_I = nRT_{FF} \ln(V_{II}/V_{IV})$

II-Aquecimento isocórico
 $Q_{reg} = \Delta U = nC_V(T_{FQ} - T_{FF})$

III-Expansão isotérmica
 $\Delta U = 0, Q_{FQ} = -W_{III} = nRT_{FQ} \ln(V_{IV}/V_{II})$

IV-Arefecimento isocórico
 $Q_{reg} = \Delta U = nC_V(T_{FF} - T_{FQ})$

Máquina térmica $W_m = -W_I - W_{III} > 0$

Bomba de calor $W_m < 0$

Descrição da montagem experimental-BC

Para estudar o **MS** como **bomba de calor**, dispomos da montagem apresentada na figura 1, que inclui o seguinte equipamento:

- 1 - Aparato do MS.
- 2 - Voltímetro.
- 3 - Amperímetro.
- 4 - Fonte de alimentação
- 5 - Sistema de detetores de Temperatura
- 6 - Detetores de Pressão
- 7 - Detetores de Volume
- 8 - Motor elétrico externo
- 9 - Sistema de aquisição dados ligado computador
- 10 - Sistema arrefecimento



Figura 1. Montagem experimental - MS como bomba de calor

Esquema de blocos da montagem-BC

Para realizar o estudo do **MS como Bomba de calor**, usou-se o esquema de blocos da montagem representado na figura anexa:

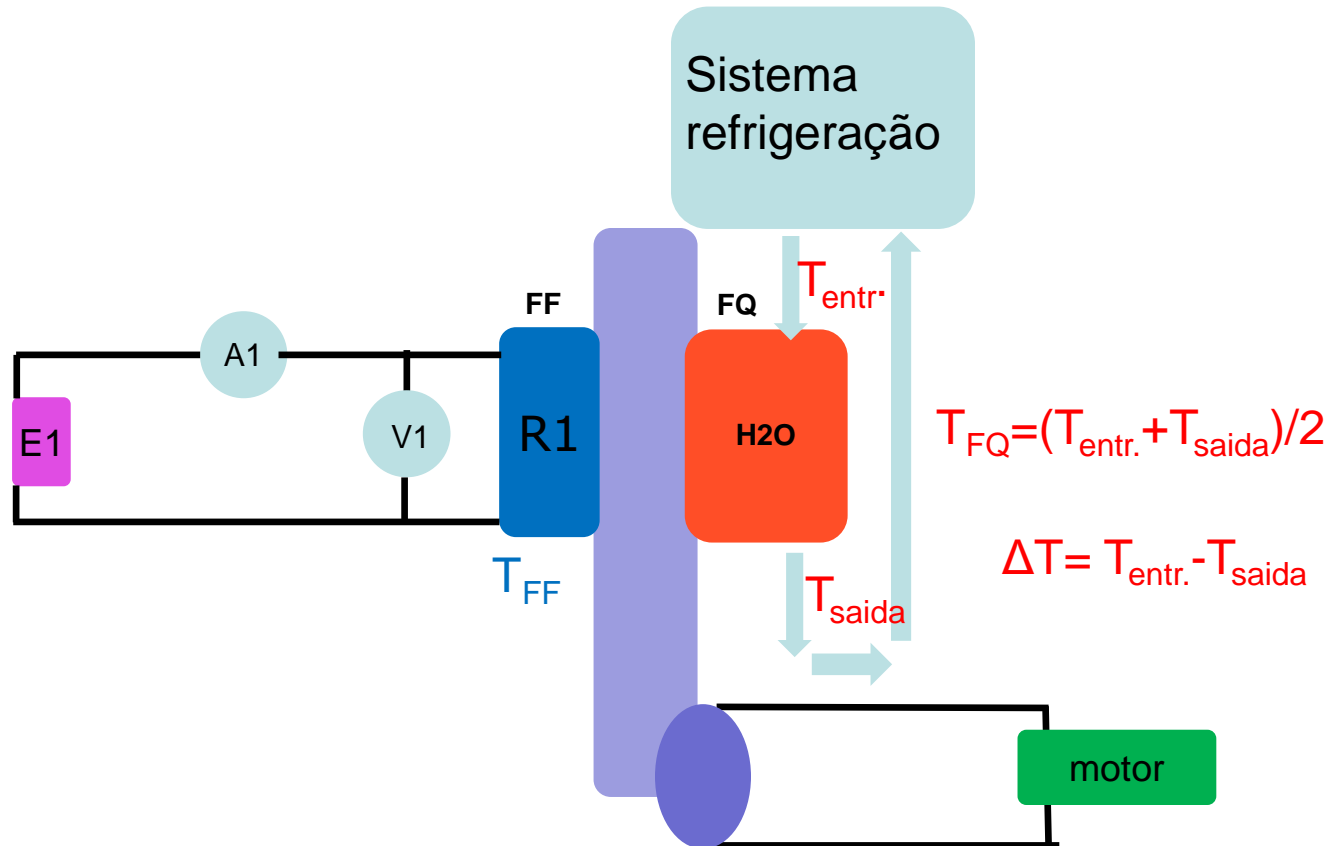
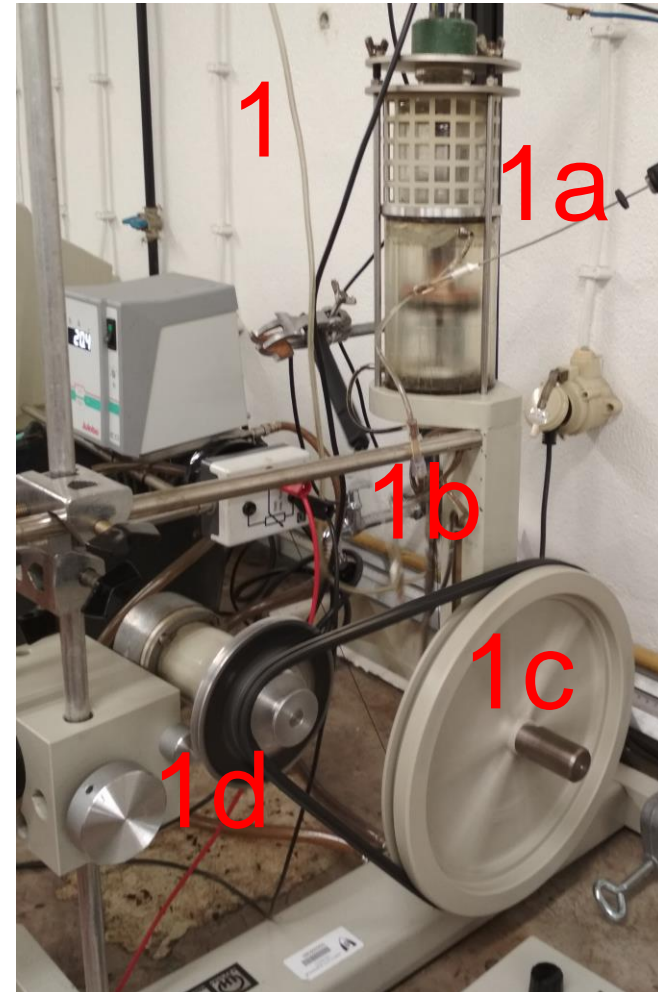


Figura 1: Esquema de blocos da montagem para estudo do Motor de Stirling como Bomba de Calor

Detalhes da montagem experimental-BC

- O **aparato do Motor de Stirling** (1) é constituído pelas seguintes componentes:
- A **unidade do motor de stirling** (1a),
- está associada a um sistema de hastes (1b), ligadas a uma manivela, (que permite transformar o movimento rectilíneo das hastes em movimento circular).
- A manivela está conectada com uma roda volante (1c).
- Motor exterior que atua a roda volante (1d)



Detalhes da montagem experimental-BC

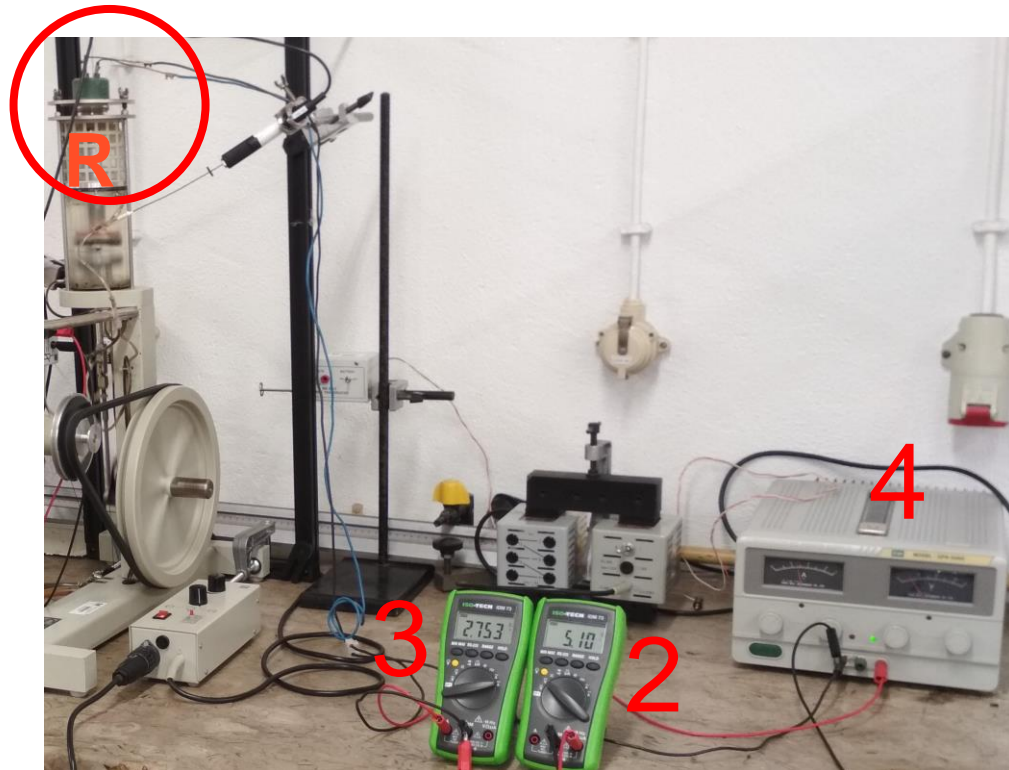
- A **unidade do motor de Stirling** (1a), é constituída por um cilindro de vidro dentro do qual se encontram:
- duas fontes térmicas: a **resistência, R**, e um **fluido de arrefecimento (água)**, que é feito circular por um sistema de circulação, que faz entrar a água em A e sair em B.
- dois pistões: um **pistão de trabalho** e um **pistão de deslocamento**.
- No pistão de deslocamento existe uma estrutura de cobre porosa, o **regenerador** (que funciona como barreira entre as duas fontes, e permite armazenar calor durante a compressão do gás e ceder calor durante a sua expansão)



Detalhes da montagem experimental-BC

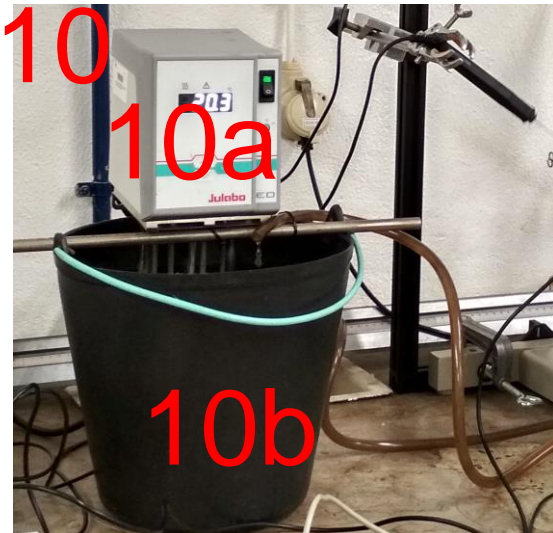
A **resistência R** da unidade do motor de stirling,

- Está ligada em paralelo com o **voltímetro** (2).
- e em série com a **fonte de alimentação** (4) e o **amperímetro** (3).

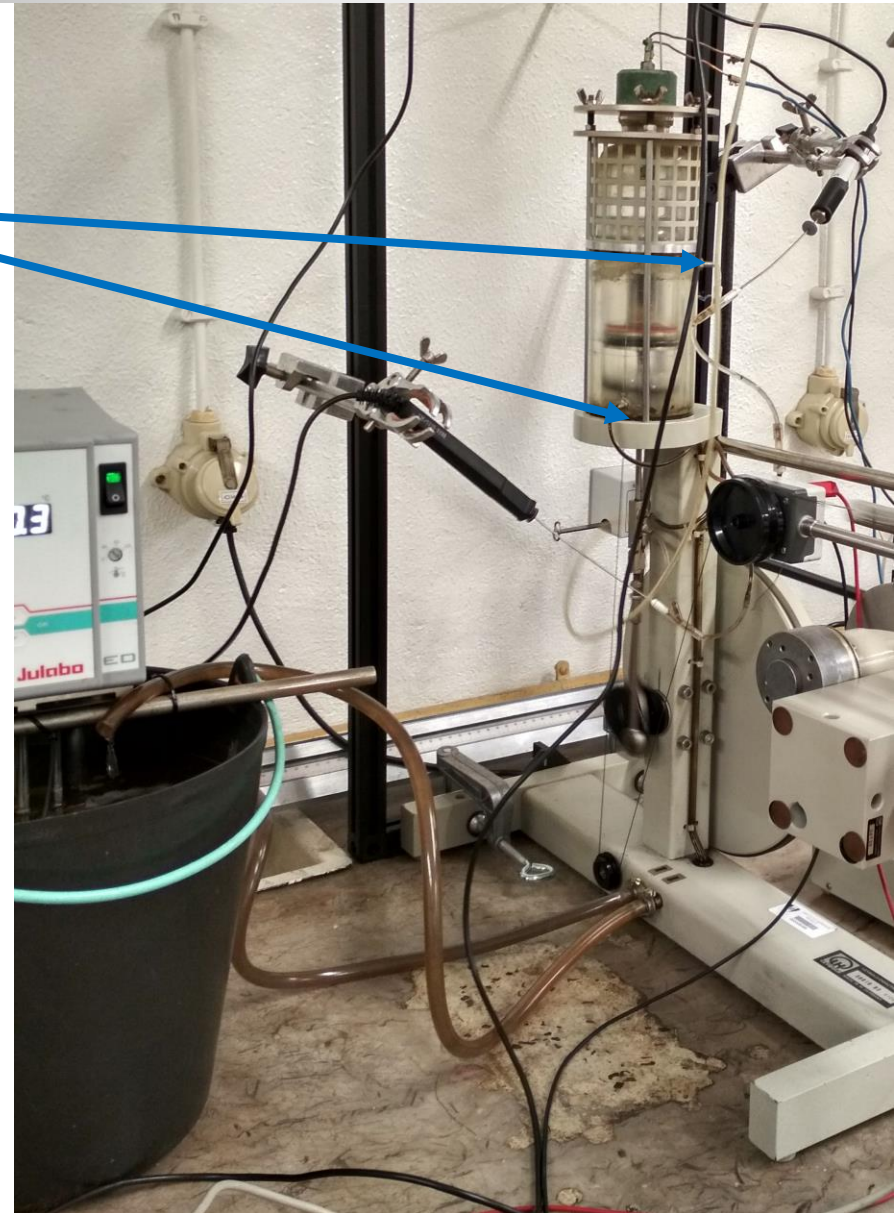


Detalhes da montagem experimental-BC

- O **fluido de arrefecimento (água)** do aparato do motor de Stirling
- está ligado a um **sistema de arrefecimento (10)**, constituído por uma bomba de circulação (10a), um depósito de água (10b) e uma proveta (10 c) para determinar o caudal.

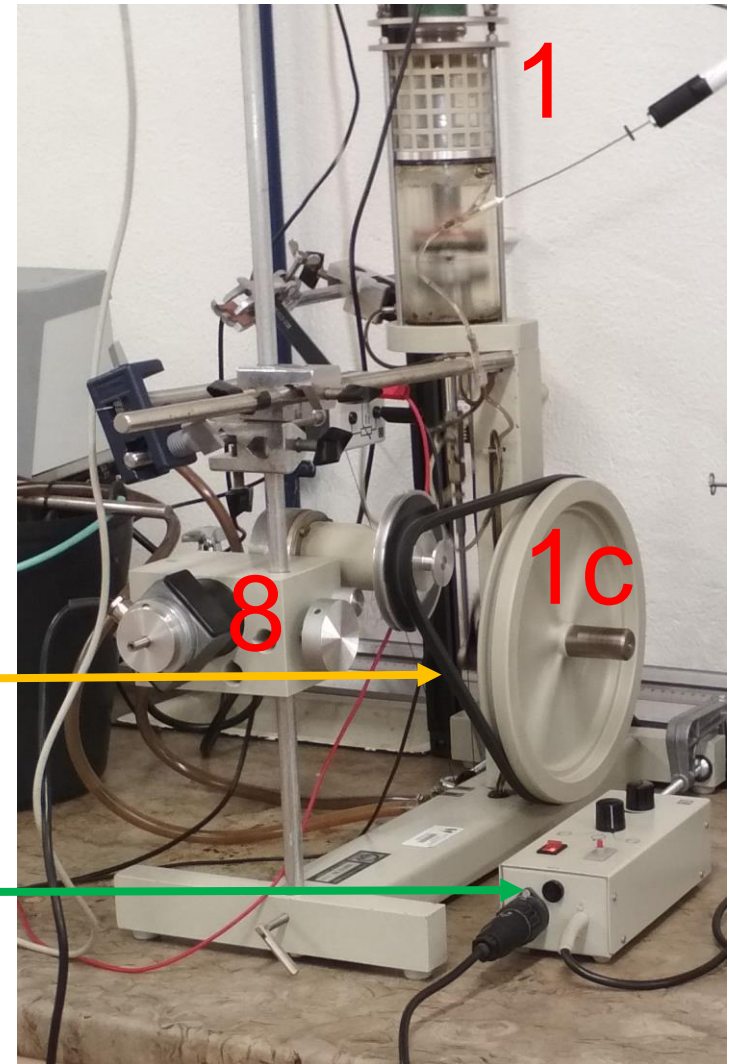


10c



Detalhes da montagem experimental-BC

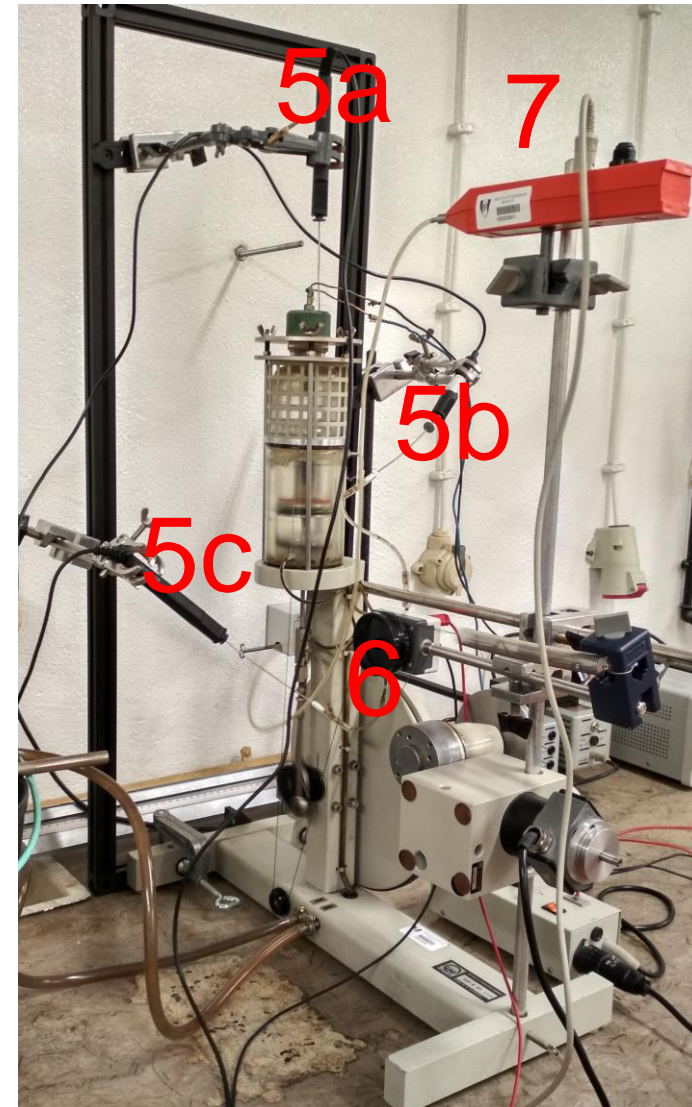
- O **Volante (1c)** do **aparato do motor de stirling (1)** é mantido em rotação, através de uma correia de transmissão.
- **Motor elétrico (8)** exterior que põe em movimento uma **correia de transmissão**.
- O motor elétrico é comandado por uma **unidade de alimentação**.



Detalhes da montagem experimental-BC

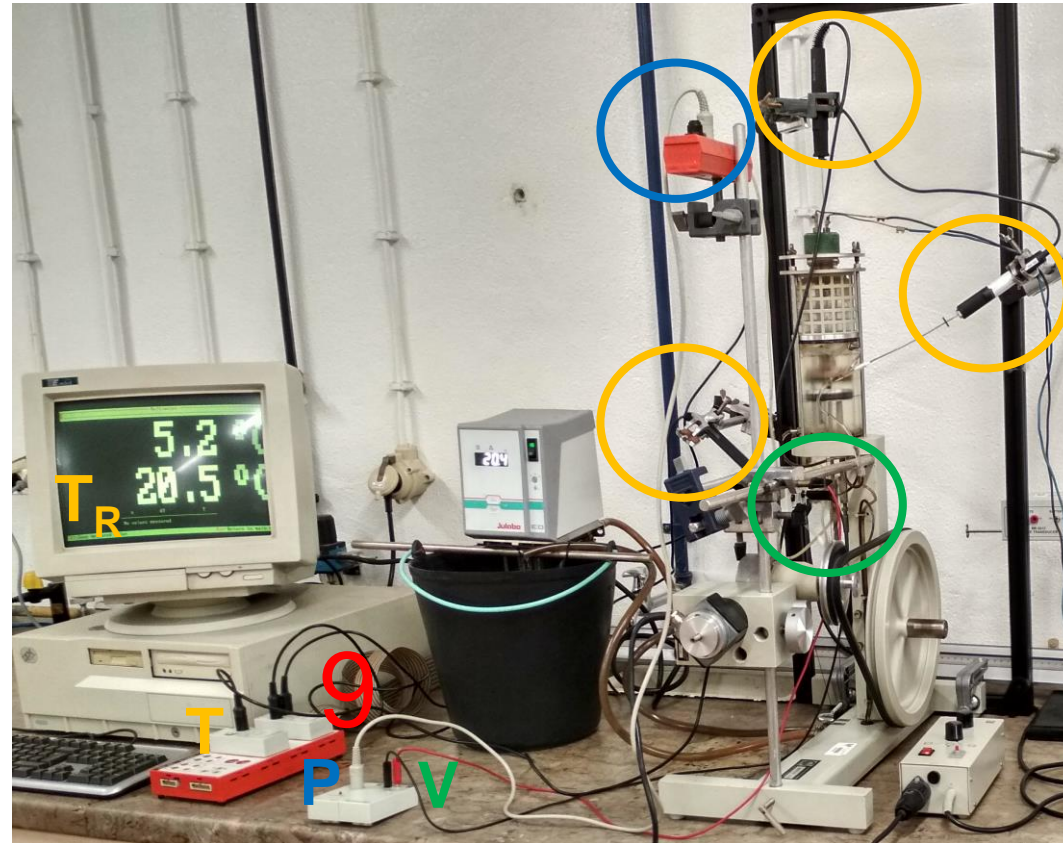
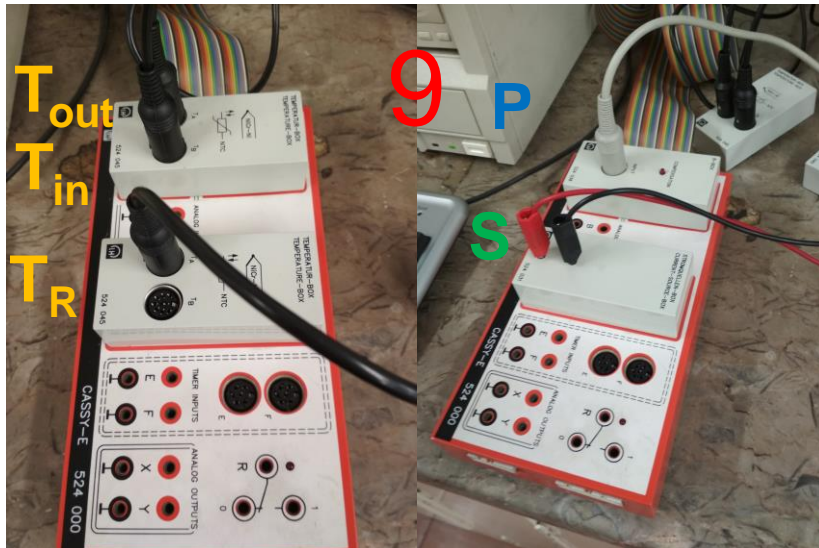
A montagem experimental inclui:

- um sistema detetor com sensores de **temperatura** (5) tipo termopar, para medir a temperatura da resistência R (5a), da água que entra (5b) e da água que sai (5c).
- Um sensor de **volume** (6) que mede o volume (ocupado pelo gás).
- Um sensor de **pressão** (7) que mede a pressão do gás.



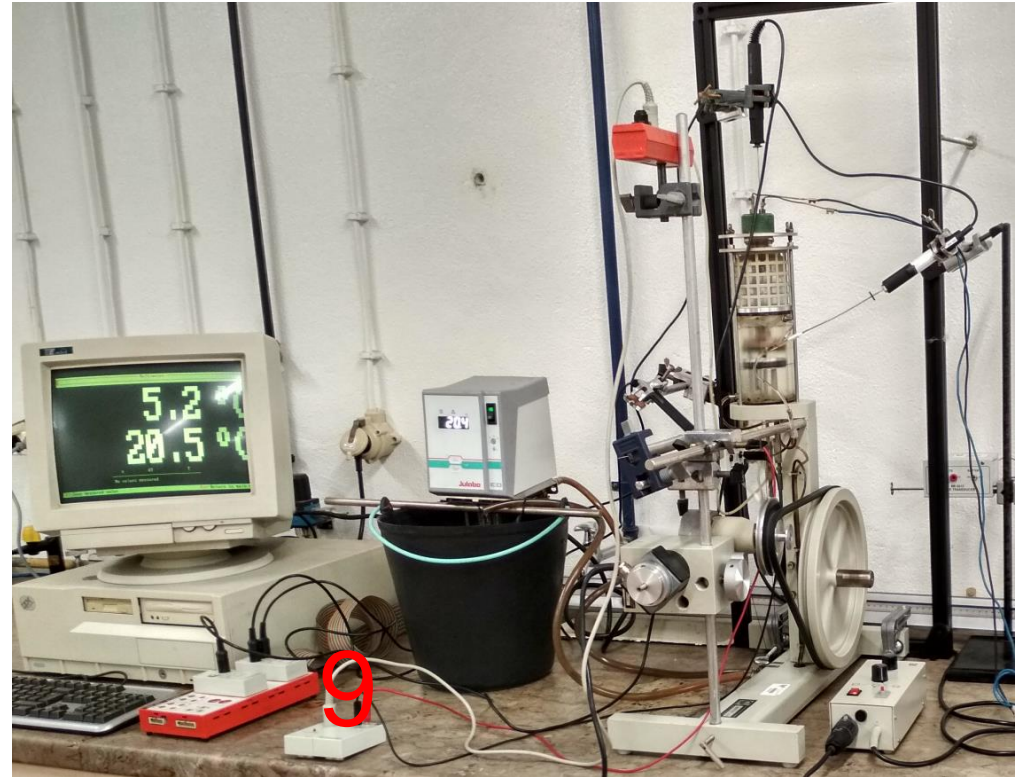
Detalhes da montagem experimental-BC

- Os sensores de temperatura (5) volume (6) e pressão (7) estão ligados a um sistema de aquisição de dados (9) que permite medir em alternativa as várias temperaturas ou a pressão e volume do gás ao longo do tempo.



Detalhes da montagem experimental-BC

- O sistema de aquisição de dados (9) está acoplado a um **computador** que com o software apropriado permite em tempo real registrar as **temperaturas** em função do tempo, bem como registrar os valores de **pressão** e **volume** do gás.



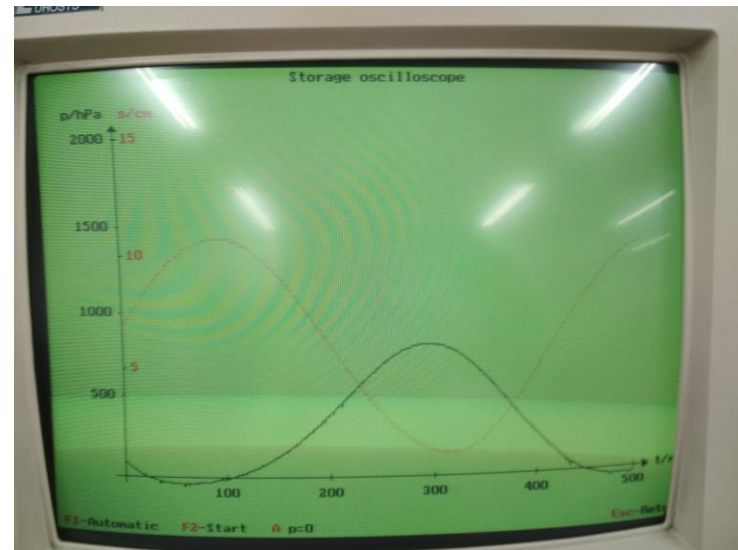
Programa de aquisição de dados

- Menu Principal

Secção de aquisição em modo **multímetro**:
Leitura das temperaturas das fontes quente e fria

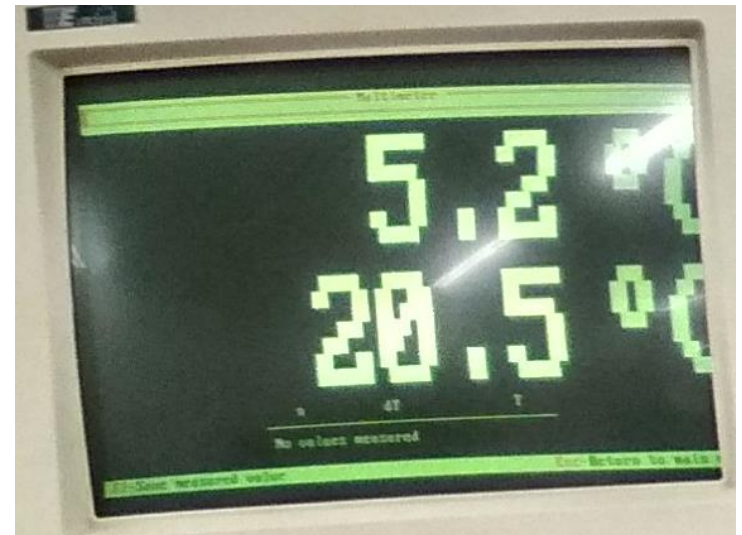
Secção de aquisição em modo **osciloscópio**:
Simula um osciloscópio digital e permite adquirir dados em função do tempo como a Pressão e o deslocamento do pistão de trabalho.

- Secção de aquisição em modo **osciloscópio**



Execução da experiência : BC

- Verificar o circuito do fluido de arrefecimento, (certificando-se que o nível do fluido (água) no depósito cobre as pás da bomba completamente) e colocar o fluido de refrigeração a circular ligando a bomba.
- Colocar a correia em posição (de modo a fazer rodar o volante) e **ligar o motor elétrico** de modo a que o **volante do MS rode no sentido dos ponteiros de relógio** sendo que a velocidade de rotação deverá ser da ordem de 5 rotações por segundo (podendo-se obter diretamente a partir da razão entre o numero total de rotações e o intervalo de tempo decorrido).
- Com a fonte de alimentação da resistência desligada, mantenha o motor a funcionar durante algum tempo e verificar que a temperatura desce, esperando que seja atingida uma temperatura 10° inferior á temperatura ambiente.

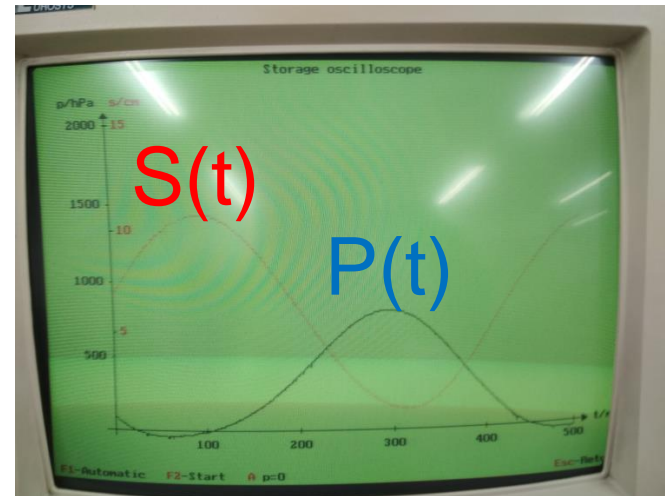


Execução da experiência : BC

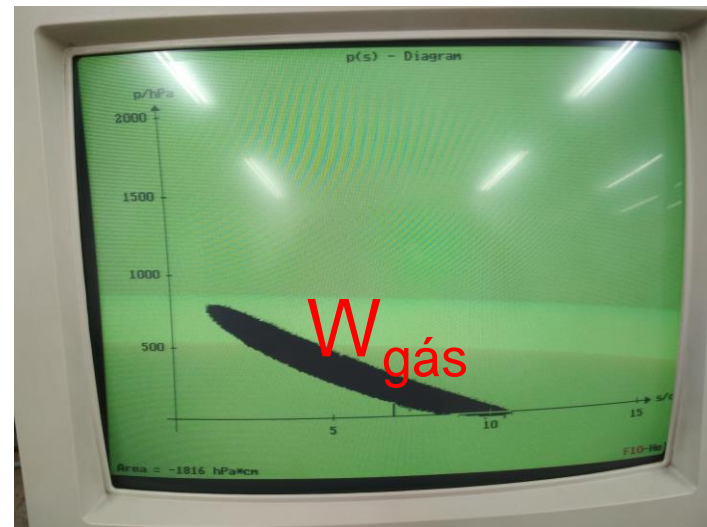
- Aplicar uma tensão de alimentação á resistência de cerca de 2V, e variar até que a temperatura da resistência (Fonte fria) suba até cerca de 15°C.
- Uma vez atingido o equilíbrio registar: Temperatura da resistência, T_R , Temperatura da água que entra, T_{in} , Temperatura água que sai T_{out} , Tensão na resistência, V_R , corrente na Resistência I_R , e o caudal da água, $\Delta m / \Delta t$.
- Preparar o computador para a aquisição em modo osciloscópio, para obter a pressão, $P(t)$ (hPa), e o deslocamento do gás, $S(t)$ (cm), em função do tempo, durante um intervalo maior do que um ciclo executado pelo MS .
- Os valores destas grandezas são recolhidas no disco rígido do computador e serão disponibilizados a cada grupo. Estes valores são distintos para cada grupo.

Análise de dados: BC

1-Representação gráfica $S(t)$ e $P(t)$ e determinação do período de um ciclo T .



2 - Representação gráfica do diagrama PV, durante um ciclo.



3 - Cálculo do trabalho executado pelo gás sobre o êmbolo, $W_{\text{gás}}$.

$$W_{\text{gás}} = (\text{Área diagrama PV})\pi R_{\text{êmbolo}}^2$$

$$D_{\text{êmbolo}} = 6.0 \text{ cm}, \quad W_{\text{gás}} < 0$$

4) Determinação das **taxas de transferência energia**, P_{FQ} , P_{FF} , $P_{wgás}$.

$$P_{FF} = P_1 = V_R I_R$$

Potência refrigeração ou arrefecimento - potência fornecida pela fonte de alimentação **E1** (que ao colocar a resistência R1, perto da temperatura ambiente vai tornar negligíveis as perdas por transferência de calor para o ambiente).

$$P_{FQ} = P_3 = C_{\text{água}} \frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta T$$

Potência cedida à fonte quente (depósito água)

$$P_{wgás} = P_2 = W_{gás} / \tau$$

Potência mecânica fornecida pelo gás ao êmbolo - Taxa de trabalho executado pelo gás durante um ciclo.

$(P_{wgás} = P_2 < 0)$

$$P_{motor} = -P_{wgás} + P_{\text{atrito interno}}$$

Potência mecânica fornecida pelo motor exterior.

5) Determinação dos **eficiências e potências de perdas**

$$P_{perdas-total} = P_{FF} + P_{motor} - P_{FQ}$$

Potência total de perdas

$$\varepsilon_1 = \frac{P_{FQ}}{P_{motor}} \approx \frac{P_3}{-P_2}$$

Eficiência real (desprezando o atrito interno na 2ª expressão)

$$\varepsilon_2 = \frac{P_3 + P_{perdas-total}}{-P_2} \approx \frac{P_1 - P_2}{-P_2}$$

Eficiência corrigida por perdas totais (desprezando o atrito interno na 2ª expressão)

$$\varepsilon_{C\alpha} = \frac{T_{FQ}}{T_{FQ} - T_{FF}} - \alpha \frac{C_V}{R \ln(V_{IV}/V_{II})}$$

Eficiência da bomba de calor de Stirling com regenerador imperfeito. $0 \leq \alpha \leq 1$

$$\varepsilon_C = \frac{T_{FQ}}{T_{FQ} - T_{FF}}$$

Eficiência da bomba térmica ideal

Sendo de esperar consistentemente:

$$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{C\alpha} \leq \varepsilon_C$$

Descrição da montagem experimental-MT

Para estudar o **MS** como **máquina térmica**, dispomos da montagem apresentada na figura 1, que inclui o seguinte equipamento:

- 1 - Aparato do MS.
- 2 - Fonte de alimentação.
- 3 - Amperímetro.
- 4 - Voltímetro
- 5 - Sistema de detetores de Temperatura
- 6 - Detetor de Volume
- 7 - Detetador de Pressão
- 8 - Aparato mecânico
- 9 - Sistema de aquisição dados ligado computador
- 10 - Sistema arrefecimento

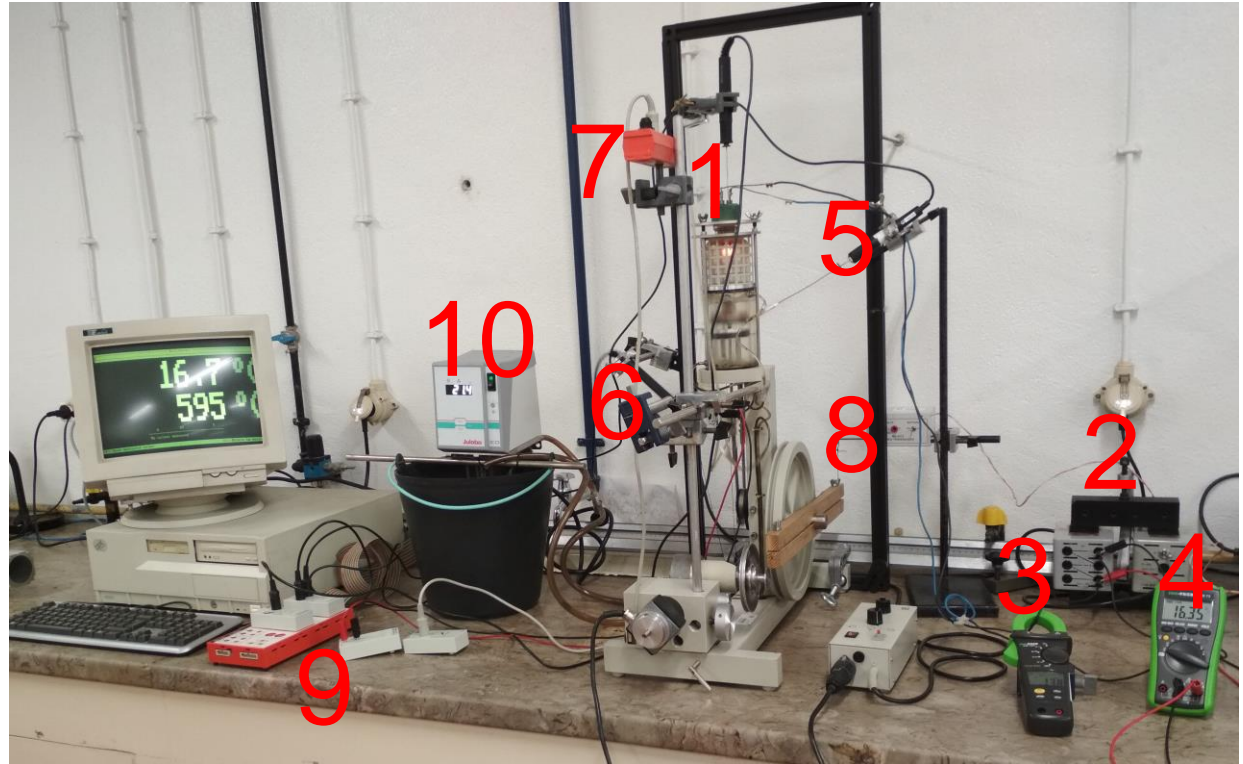


Figura 1. Montagem experimental - MS como máquina térmica

Esquema de blocos da montagem-MT

Para realizar o estudo do **MS como Máquina Térmica**, usou-se o esquema de blocos da montagem representado na figura anexa:

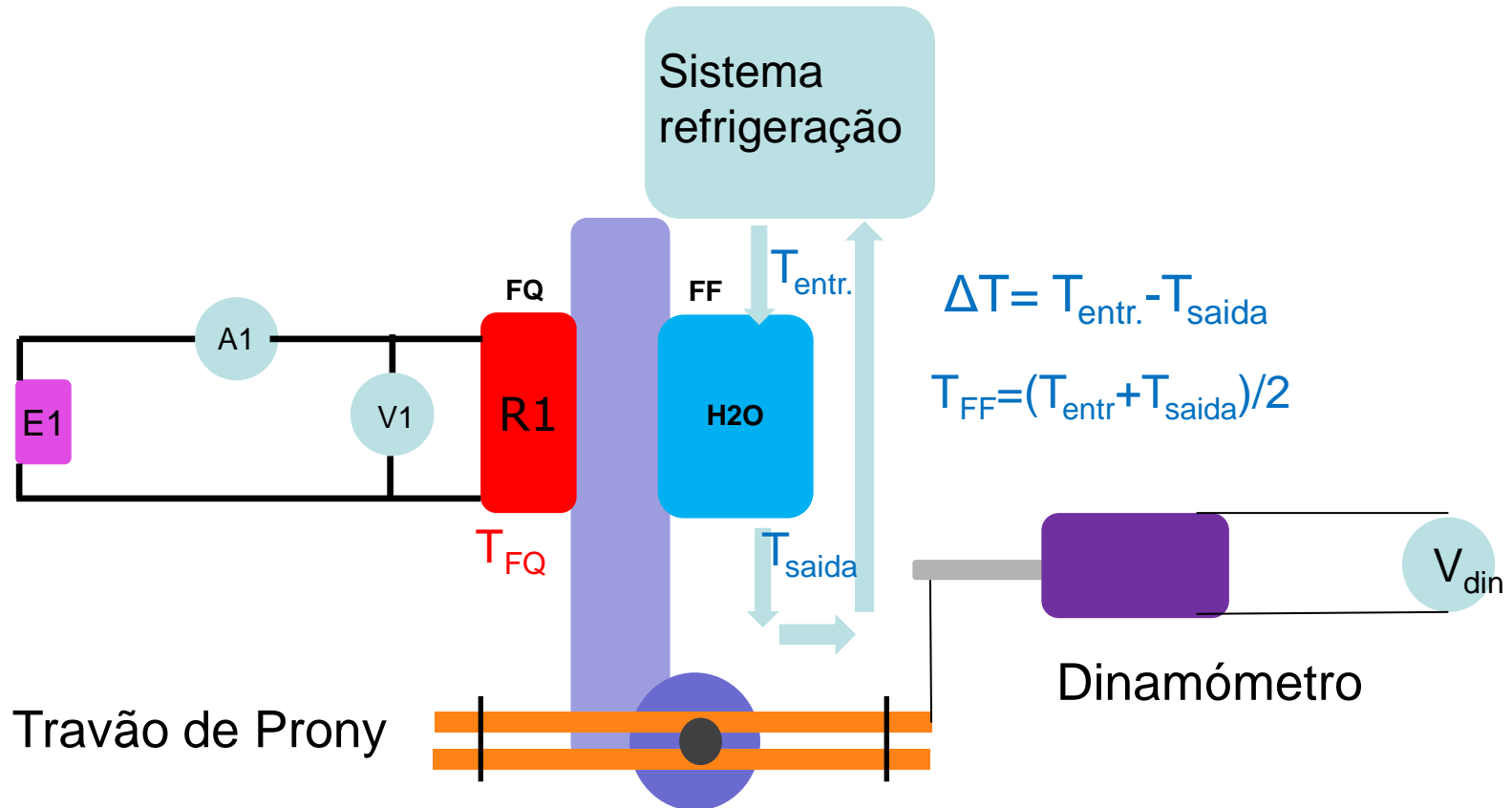
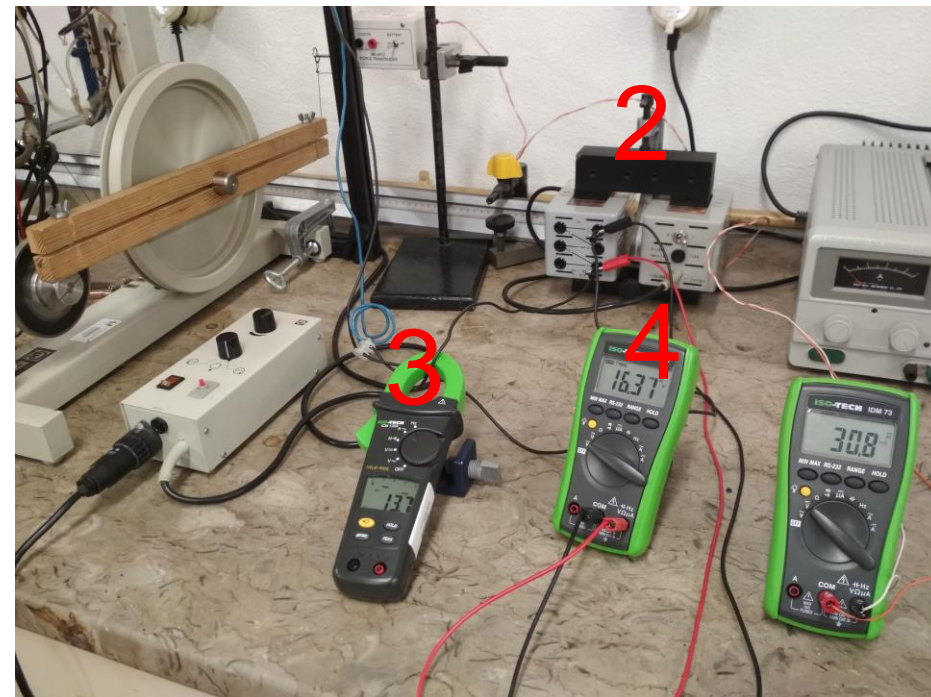


Figura 2: Esquema de blocos da montagem para estudo do MS como Máquina Térmica.

Detalhes da montagem experimental-MT

- A resistência do aparato do motor de stirling (1) está ligada a uma fonte de alimentação alternada (2-transformador), em série com uma pinça amperimétrica de medição de correntes alternas(3).
- O voltímetro (4) mede a tensão alternada aos terminais da resistência



Detalhes da montagem experimental-MT

- O **aparato mecânico** (8) é constituído pelas seguintes componentes:
- um **travão de Prony** (8a), constituído por duas barras de madeira ligadas entre si que apertam o eixo de rotação do prato do aparato do MS,
- um **dinamómetro** (8b), que mede a força aplicada pelo travão de Prony e a converte num sinal de tensão que é medido pelo **voltímetro** (8c).



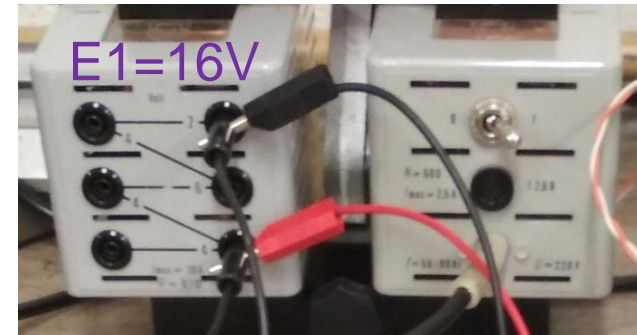
Execução da experiência : MT

- O travão de Prony deverá estar retirado para o arranque do motor. Inicie a execução da experiência:

- 1) Fornecer uma tensão de alimentação à resistência de aquecimento de cerca de **E1=16 V**, e logo que a resistência esteja ao rubro iniciar a rotação do volante do MS. Esperar cerca de 15 minutos até que o MS atinja um funcionamento regular caracterizado por uma velocidade de rotação do volante constante.

- 2) Ajustar o sistema de travagem (atuando sobre os **parafusos de aperto do travão**) de modo a que seja sensível a diminuição de velocidade do motor sem que a velocidade desça abaixo de 3 rotações por segundo.

- 3) **Ajustar a posição do dinamómetro** de modo a que as barras do travão fiquem horizontais.



Execução da experiência : MT

- 4) Registrar a temperatura da resistência, T_R , Temperatura da água que entra, T_{in} , Temperatura água que sai T_{out} , tensão na resistência de aquecimento, V_R , corrente que percorre a resistência I_R , e o caudal da água, $\Delta m / \Delta t$.
- 5) Preparar o computador para a aquisição em **modo osciloscópio**, para obter a pressão, $P(t)$ (hPa), e o deslocamento do gás, $S(t)$ (cm) em função do tempo, durante um intervalo maior do que um ciclo executado pelo MS e guardar os dados num ficheiro.
- 6) Registrar a velocidade de rotação do volante, $w = 2\pi/T$, (T -período de rotação medido no gráfico de $P(t)$ ou $S(t)$) e a tensão medida no voltímetro acoplado ao dinamómetro, V_{din} .
- Variar a tensão de alimentação para os valores **$E1=14$ e 18 (V)** e repetir novamente o procedimento, 1-6).
- Os valores das grandezas recolhidas no disco rígido do computador serão disponibilizados a cada grupo. Estes valores são distintos para cada grupo.



Calibração do dinamómetro.

- Colocar um conjunto de massas num cesto pendurado no dinamómetro e medir a tensão associada no voltímetro.
- Registrar os pares de valores (m_i , $V_{\text{din}}(i)$).

Análise de dados: MT

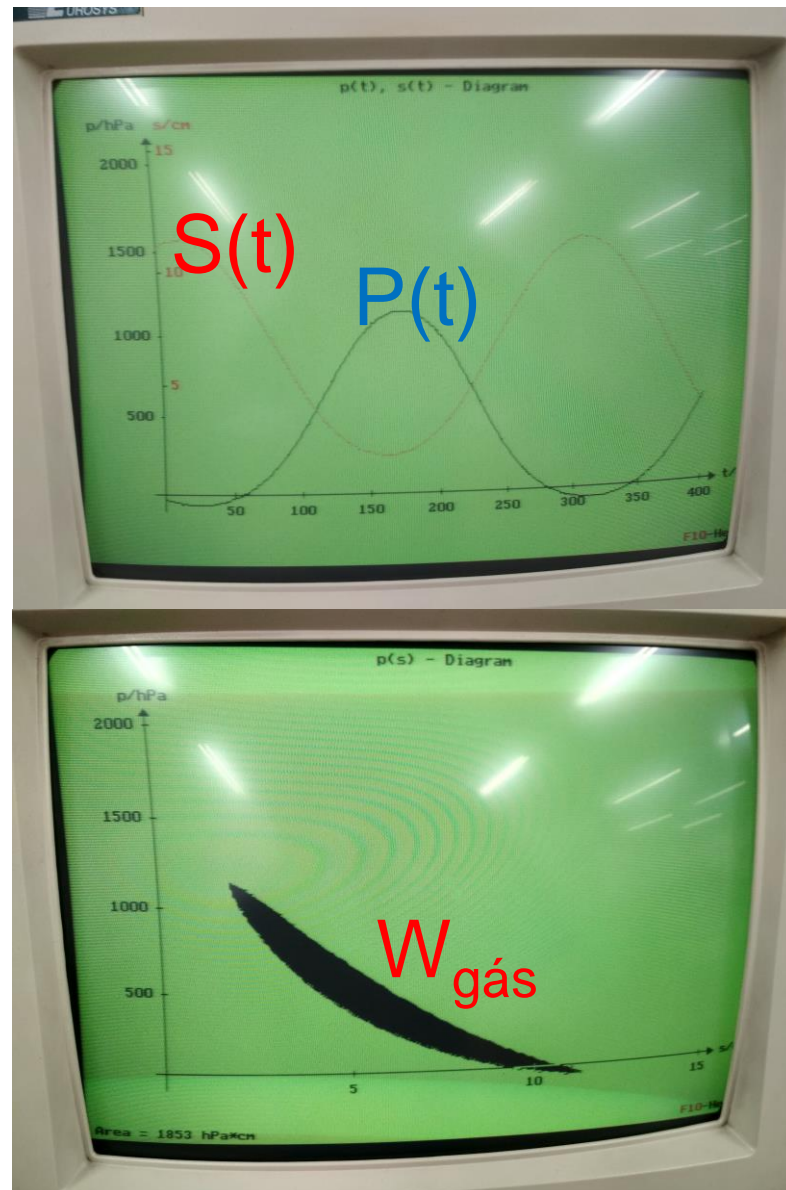
1-Representação gráfica $S(t)$ e $P(t)$ e determinação do período de um ciclo T .

2 - Representação gráfica do diagrama PV, durante um ciclo.

3 - Cálculo do trabalho executado pelo gás, $W_{\text{gás}}$.

$$W_{\text{gás}} = (\text{Área diagrama PV}) \pi R_{\text{êmbolo}}^2$$

$$D_{\text{êmbolo}} = 6.0 \text{ cm}, \quad W_{\text{gás}} > 0$$



I) Determinação da função linear de ajuste à calibração do dinamómetro: a partir dos valores experimentais, calcular os pares de pontos ($P_i, V_{din}(i)$) e determinar os parâmetros de ajuste:

$$F_{Din} = aV_{Din} + b$$

II) Determinação das **taxas de transferência energia**, $P_{FQ}, P_{FF}, P_{wgás}, P_{motor}$

E1=14,16,18 (V)

$$P_{FQ} = P_1 = V_R I_R$$

Potência térmica fornecida pela resistência R

$$P_{FF} = P_3 = C_{água} \frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta T$$

Potência cedida pelo MS à fonte fria (deposito àgua) e retirada pelo fluido

$$P_{Wgás} = W_{gás}/T$$

$(P_{Wgás} > 0)$

Potência fornecida pelo gás ao êmbolo

$$P_{motor} = 2 \pi f b F$$

Potência mecânica fornecida pelo MS ao travão (sendo f a frequência do movimento do volante do MS, b= braço do travão de Prony)

IV) Determinação dos **rendimentos e potências de perdas**

Para $E1=14,16,18$ (V):

$$P_{perdas-total} = P_{FQ} - P_{FF} - P_{motor} \quad \text{Potência total de perdas}$$

$$P_{perdas-atrito} = P_{wgás} - P_{motor} \quad \text{Potência de perdas por atrito}$$

$$\eta_1 = \frac{P_{motor}}{P_{FQ}} \quad \text{Rendimento real não corrigido}$$

$$\eta_2 = \frac{P_{motor}}{P_{FQ} - (P_{FQ} - P_{FF} - P_{motor})} = \frac{P_{motor}}{P_{FF} + P_{motor}} \quad \text{Rendimento corrigido por perdas totais}$$

$$\eta_3 = \frac{P_{wgás}}{P_{wgás} + P_{FF}} \quad \text{Rendimento corrigido descontando as perdas da fonte quente diretamente para o exterior e as perdas de atrito interno}$$

$$\eta_{C\alpha} = \left(1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}}\right) \frac{1}{1 + \alpha \frac{C_V}{R \ln(V_{IV}/V_{II})} \left(1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}}\right)} \quad \text{Rendimento do ciclo de Stirling com regenerador Imperfeito. } 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}} \quad \text{Rendimento da máquina térmica ideal}$$

Sendo de esperar consistentemente:

$$\eta_1 \leq \eta_2 \leq \eta_3 \leq \eta_{C\alpha} \leq \eta_C$$

FIM