

Professor: Valter Salles do Nascimento Jr  
email: nascimento.valter@usp.br

1º Semana

- Introdução da disciplina e metodologia / Sist. Termodinâmicos e Definições de propriedade, estado, processo e equilíbrio / Volume específico, pressão e temperatura / Metodologia e solução de problemas

# Calendário

## fevereiro

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
1	2	3	4	5	6	7

24 - Carnaval

## março

d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

## abril

d	s	t	q	q	s	s
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	1	2
3	4	5	6	7	8	9

06 e 09 - Semana Santa

20 - Tiradentes

## maio

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31	1	2	3	4	5	6

## junho

d	s	t	q	q	s	s
31	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

11 - Corpus Chisti

## julho

d	s	t	q	q	s	s
28	29	30	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8

Período para realização de recuperação

Semana	Conteúdos Programáticos	Descrição das atividades a serem realizadas pelo aluno antes da aula	Procedimentos metodológicos: situações de aprendizagem	Procedimentos, instrumentos e Critérios de avaliação		Materiais de apoio (Recursos)
				Critérios de avaliação	Peso	
17/02 20/02	Introdução da disciplina e metodologia / Sist. Termodinâmicos e Definições de propriedade, estado, processo e equilíbrio / Volume específico, pressão e temperatura / Metodologia e solução de problemas	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
27/02 02/03	1° Lei e Conceitos Mecânicos de Energia / Transferência de energia através de trabalho / Transferência de energia através de calor	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
05/03 09/03	Balço de energia para sistemas fechados / Análise de energia para ciclos / Revisão e exercícios	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
12/03 16/03	Propriedades de substância pura compressível / Princípio de estado, relação p-v-t / Energia int. específica e entalpia, calores específicos / Propriedades de líquidos e sólidos	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
19/03 23/03	Diagrama de Compressibilidade / Equações de estado, e equação de estado para gases reais / Conservação de massa para volumes de controle	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
26/03 30/03	Formas de balanço de massa e aplicações em termos de taxa / Conservação de energia para um volume de controle em regime permanente	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
02/04 13/04	Análise de volumes de controle em regime permanente / Análise energética de volumes de controle em regime transiente	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
16/04 23/04	<b>Prova 1</b> / Processos Reversíveis e Irreversíveis / Corolários: 2° Lei para Ciclos Termodinâmicos	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção, participação, e avaliação escrita	<b>30%</b>	Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
27/04 30/04	Escala de temperatura Kelvin e internacional / Desempenho máx. para ciclos entre 2 reservat. / Ciclo de Carnot e Desigualdade de Clausius / Definições de variação de entropia	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>
04/05 07/05	Variação de entropia para uma substância incomp. / Variação de entropia de um gás ideal / Variação de entropia em proc. Int. reversíveis	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <a href="#">WiFi</a>

Semana	Conteúdos Programáticos	Descrição das atividades a serem realizadas pelo aluno antes da aula	Procedimentos metodológicos: situações de aprendizagem	Procedimentos, instrumentos e Critérios de avaliação		Materiais de apoio (Recursos)
				Critérios de avaliação	Peso	
11/05 14/05	Balço de entropia para sistemas fechados e para Volumes de controle / <b>Aula prática e definição de trabalho no EES</b>	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação	10%	Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
18/05 21/05	Processos isentrópicos / Eficiência isentrópica de turbinas, bocais, compressores e bombas / Calor e trab. em processos de esc. int. revers. em reg. permanente	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
25/05 28/05	<u>Exergia</u> / Balço de <u>exergia</u> termomecânica para sistemas fechados / <u>Exergia</u> de escoamento	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
01/06 04/06	Balço de <u>exergia</u> termomecânica para volumes de controle, Eficiência <u>Exergética</u> / Exercícios	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção e participação		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
08/06 15/06	Ciclos de potência	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção, participação, e avaliação escrita		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
18/06 22/06	Ciclos de refrigeração	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção, participação, e avaliação escrita		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
25/06 29/06	Exercícios / <b>Prova 2</b>	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção, participação, e avaliação escrita	50 %	Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
02/07	Sobra substitutiva	Leitura da bibliografia sugerida e revisão	Sala de aula, exercícios e enquetes	Atenção, participação, e avaliação escrita		Quadro, computador, projetor e <u>WiFi</u>
	<u>Avaliação</u> semanal via ferramenta de interatividade <u>socrative</u>			Participação via enquetes	10%	Computador, projetor e <u>WiFi</u>

# Avaliação

Aulas Teóricas:

Avaliação através de provas e atividades de participação.

Será exigido no mínimo 70% de presença, conforme regulamento.

A nota será composta da seguinte forma:

		$MS = P1 \times 0,3 + P2 \times 0,5 + AS \times 0,1 + TE \times 0,1$	
Prova teórica 1	(30%)	}	$MS > 5,0 \rightarrow MS=MF$ Aprovado
Prova teórica 2	(50%)		$3,0 < MS < 5,0$ Recuperação
Avaliações Semanais	(10%)		$MF = 5$ se $5 \leq MR \leq (10 - MS)$ Aprovado
Trabalho EES	(10%)		$MF = (MS + MR) / 2$ se $MR > (10 - MS)$ Aprovado
			$MF = MS$ se $MR < 5$ Reprovado

MS = Média do semestre

MF = Média Final

MR = Média da recuperação

# Bibliografia

## Básica:

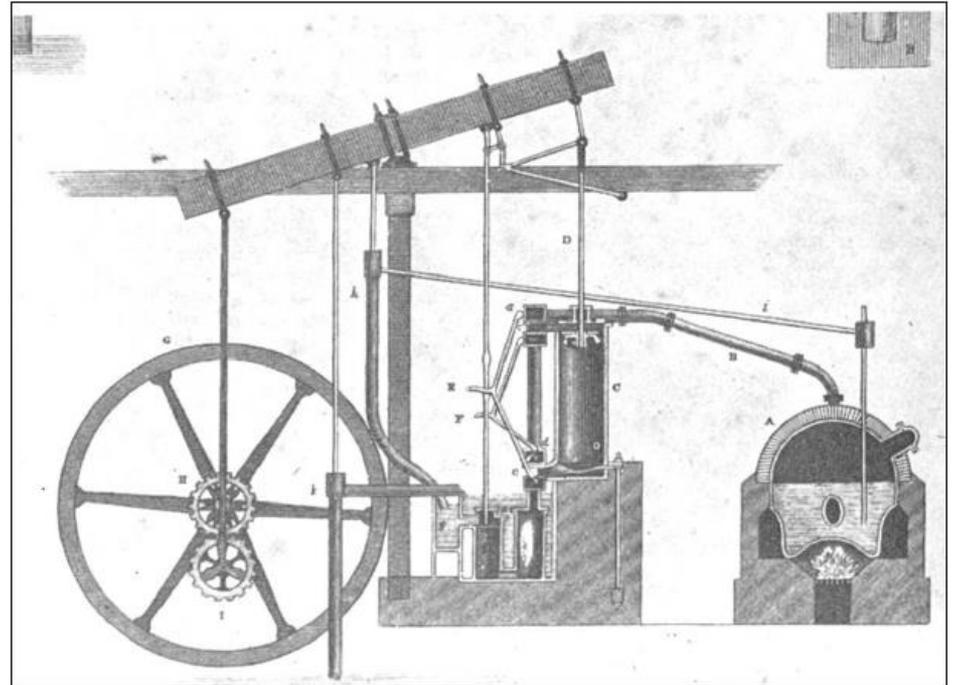
1. M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** (7ª. edição), Editora LTC, Rio de Janeiro, 2014.
2. G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag e C. Borgnakke, **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** (4ª. edição), Editora Edgard Blücher Ltda, 1995.
3. ÇENGEL, Y.A., Boles, M. A. **Termodinâmica.** (7ª. edição), Editora McGrawHill, São Paulo, 2013.

# Calendário



- Do grego, therme = calor, dynamis = potência

Reflete os esforços em converter calor em trabalho mecânico



# Calorimetria



Em 1593 na cidade de Florença Galileo Galilei propôs a construção de um termômetro sendo este um dos primeiros esforços para quantizar a temperatura.

Ele registrava mudanças de temperatura pela elevação e queda das bolas de vidro no interior de tubos com água.

# Termometria

## HISTÓRIA

**Termometria:** tentativas de medir o grau de calor.

Invento do termómetro: Robert Fludd, Cornelius Drebbel, Santorio

1624 – J. Leurechon descreve um termómetro de ar. Seus defeitos foram levantados por Pascal (1648) e Boyle (1662)

1694 – Renaldini: pontos fixos - a fusão do gelo e a ebulição da água

1632 - Jean Rey: primeira menção a um termómetro de líquido

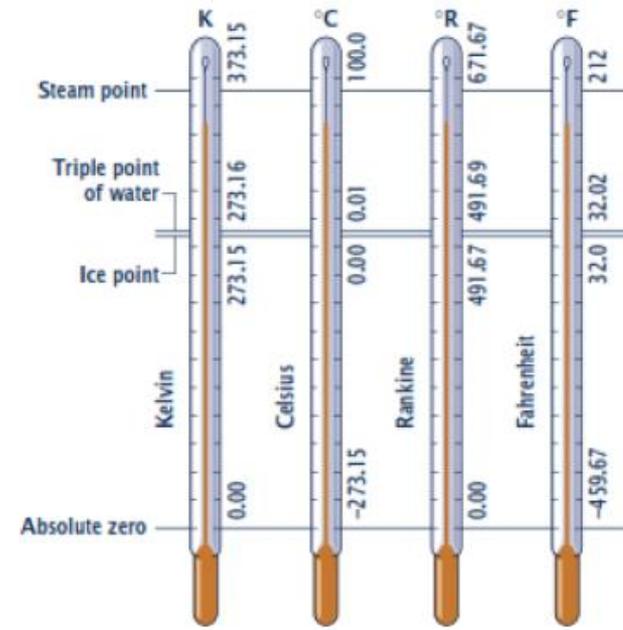
1708 - Ole Römer e Daniel Fahrenheit. Termómetros com dois pontos de referência e o emprego do mercúrio como líquido termométrico

1743 – J.P. Christin e Andres Celsius: termómetro de mercúrio com a escala centígrado. Adoptada mais tarde pela Comissão de Pesos e

Medidas criada pela revolução francesa em 1794

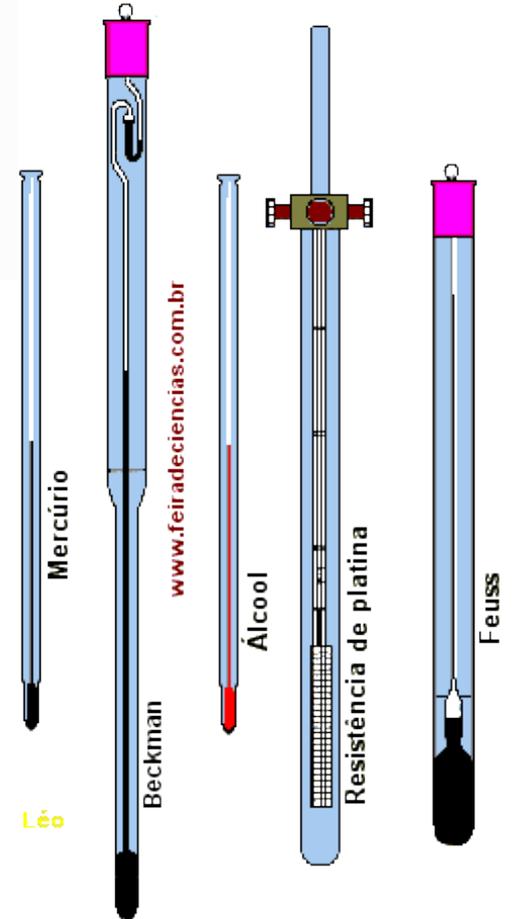
# Temperatura

- Surgiu com base na noção de frio e calor
- Macroscopicamente é difícil de ser definida, mas, podemos dizer que se dois corpos estão em equilíbrio térmico eles têm a mesma temperatura. Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, todos os corpos estão em equilíbrio térmico (Lei zero da Termodinâmica)
- Microscopicamente descreve a “agitação das moléculas” – Energia cinética



# Termometria

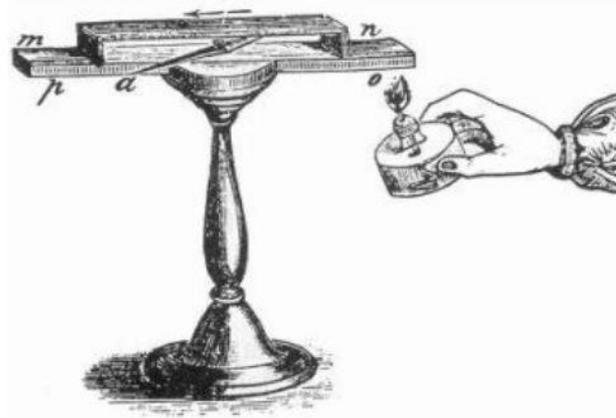
## Termometria moderna



# Termometria

## Termopares:

Seu princípio de funcionamento é baseado no efeito Seebeck (**Thomas Johann Seebeck**), que observou que a junção entre duas ligas metálicas de constituição diferente geram um diferencial de tensão (Força Eletromotriz Térmica). Posteriormente Peltier observou que o efeito contrário também é válido.

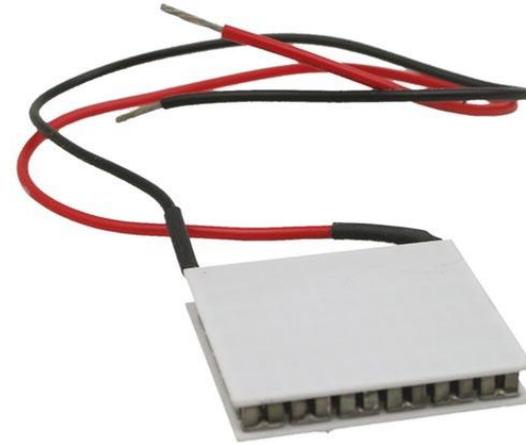
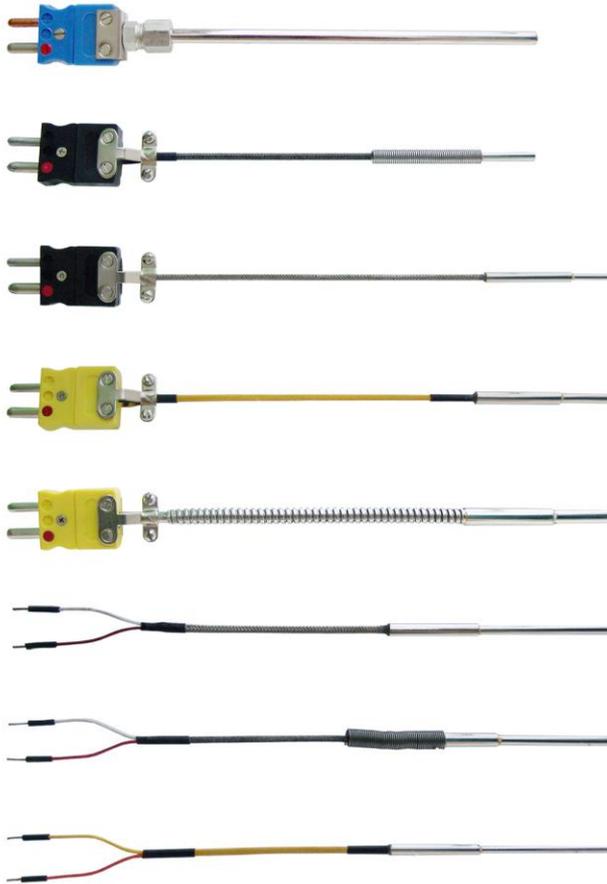


Seebeck's instrument (*left*) and its experimental use (*right*)



# Termometria

## Tipos de Termopares:



Tipo de Termopar	Faixa de Temperatura	
T	0 a 350°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$
J	0 a 750°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$
E	0 a 900°C	$\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,5\%$
K	0 a 1250°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$
Se R	0 a 1450°C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,25\%$
B	800 a 1700°C	$\pm 0,5\%$
T	-200 a 0°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1,5\%$
E	-200 a 0°C	$\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%$
K	-200 a 0°C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$

# Calor

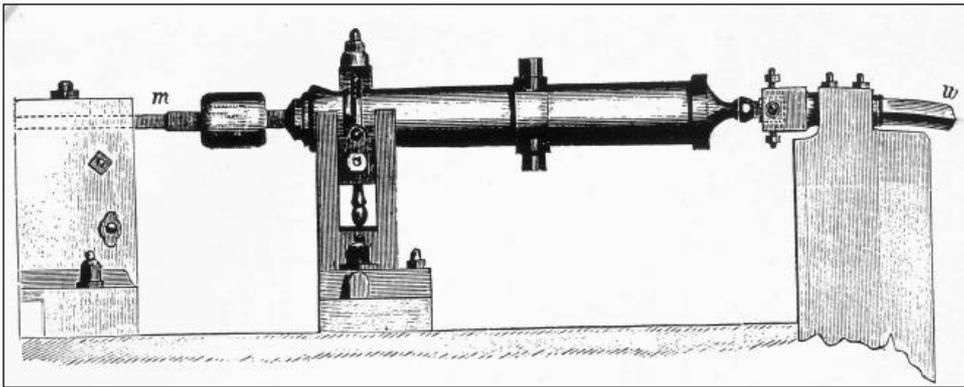
## Natureza do Calor:

**Teoria do calórico:** o calor como um fluido imponderável: Pierre Gassendi (astrónomo e filósofo francês), Lavoisier e Bertholet (químicos franceses), William Thomson (Lord Kelvin), William Cleghorn (Edimburgh, 1779)

**Mecanicistas:** o calor resulta do movimento das partículas: Francis Bacon e Robert Hooke

1798 - Benjamin Thompson (conde Rumford): observa a produção de calor na perfuração dos canos para canhões (calor gerado pela fricção). Suas experiências forneceram um argumento contra a hipótese do calórico.

Percebeu que enormes quantidades de calor eram geradas por atrito entre os torneadores e os canos metálicos das armas



Rumford concluiu que o calor devia ser uma forma de movimento

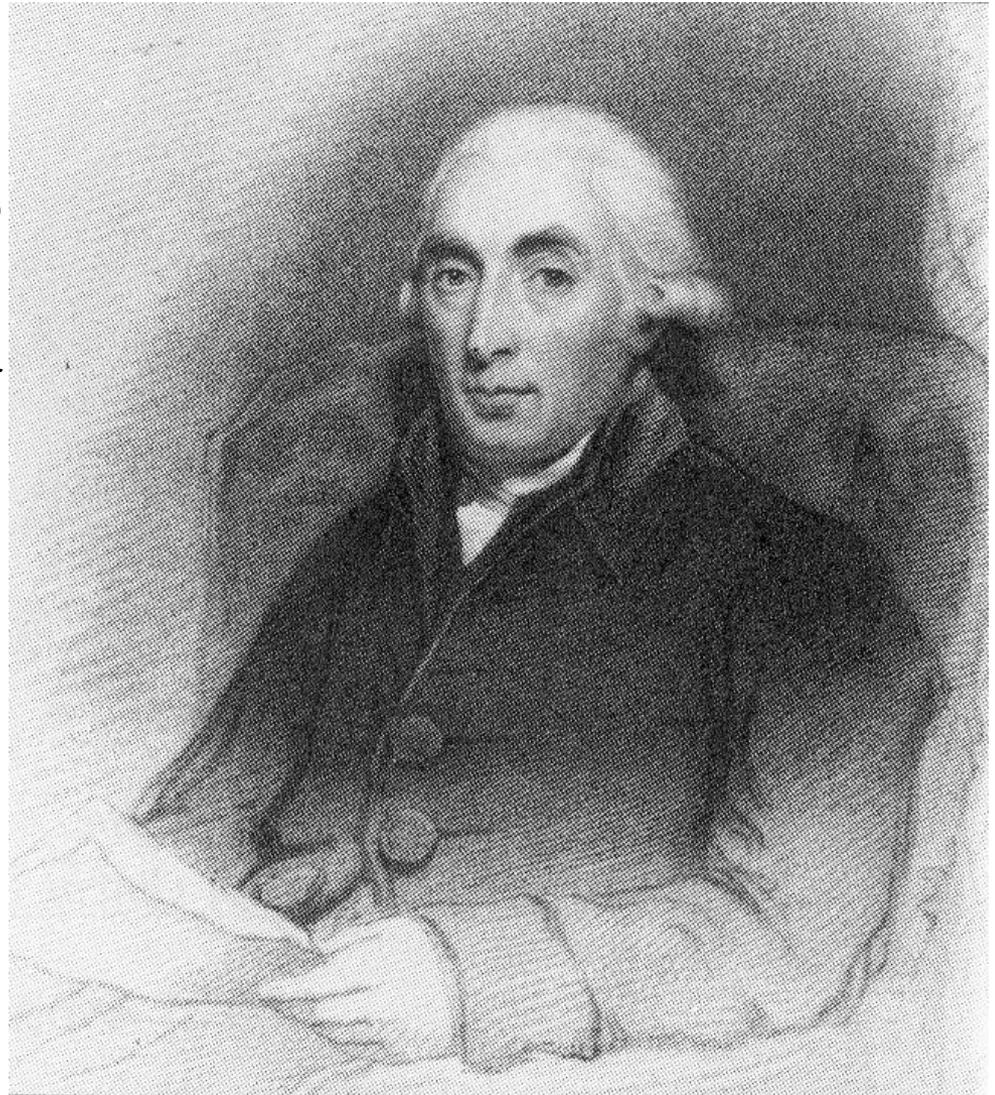
# Calor

## Natureza do Calor:

1760 - **Joseph Black**: no estudo da fusão do gelo descobre a noção de calor latente. Ele fez a distinção entre temperatura e calor.

Black achava que a capacidade térmica era a quantidade de calor que uma substância pode reter.

Começa a idéia de distinguir calor latente e calor sensível



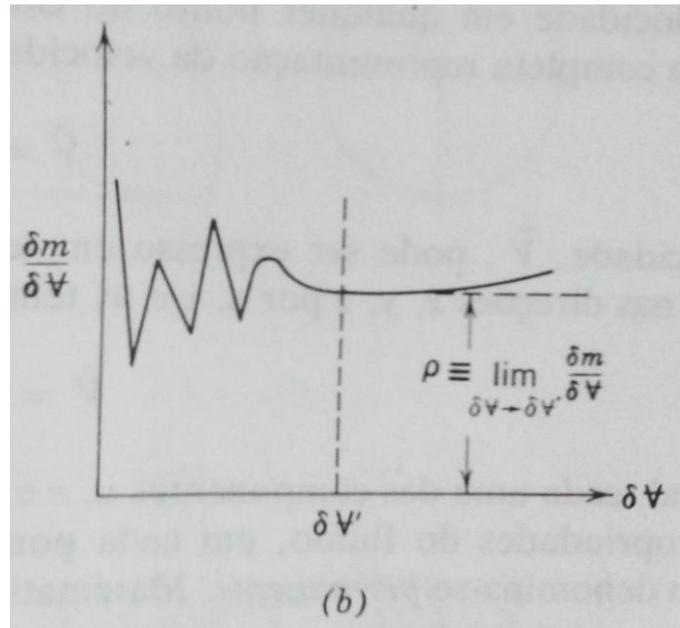
# Definição moderna de termodinâmica

- Enrico Fermi (1901-1954) definiu a Termodinâmica Clássica como:  
*“Ramo da mecânica que descreve o estado de um sistema com um número elevado de partículas (átomos, moléculas) com base no comportamento médio das partículas”.*



# Termodinâmica Clássica

**Hipótese do contínuo** é a abordagem adotada que descreve a mecânica dos fluídos clássica; assume-se que qualquer propriedade de um fluido tem valor definido em cada ponto de espaço. Portanto propriedades dos fluidos tais como a densidade, temperatura, velocidade... são consideradas funções contínuas do espaço e do tempo.



# Contexto / Escala

Em que contexto/Escala

A abordagem termodinâmica que vamos utilizar é macroscópica e não se interessa diretamente com os mecanismos moleculares (hipótese do contínuo)

- Estrutura de átomos e moléculas -> Explica comportamento de moléculas e corpos sólidos baseado nas leis do movimento e propriedades das partículas
- Mecânica estatística -> Liga propriedades das moléculas com propriedades macroscópicas
- Termodinâmica -> Macroscópica e não se interessa diretamente com os mecanismos moleculares (hipótese do contínuo)

***Complexidade da descrição microscópica -> 3 posições e 3 velocidades  $6$  elevado a  $n$  variáveis***

# Leis da termodinâmica

Leis da termodinâmica - Base

Termodinâmica é baseada em leis

Na Termodinâmica, cada lei implica na definição de uma nova propriedade:

- lei zero ➡ temperatura
- 1ª lei ➡ energia interna
- 2ª lei ➡ entropia
- 3ª lei ➡ zero absoluto

Elas são derivadas de generalizações de observações ➡ independem das hipóteses microscópicas!

# Utilização da Termodinâmica

A termodinâmica é aplicada em diversas áreas de engenharia:

Motores de automóveis

Turbinas

Compressores e Bombas

Usinas de força movidas a combustível fóssil e nuclear

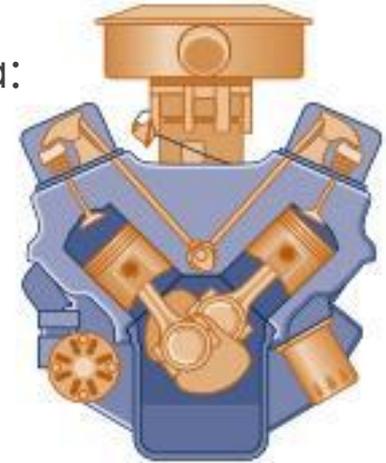
Sistemas de propulsão de aeronaves e foguetes

Sistemas de combustão

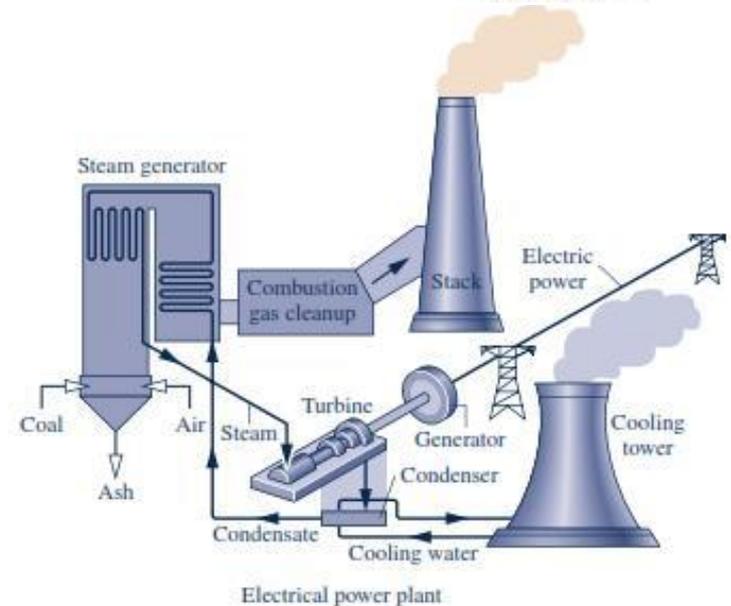
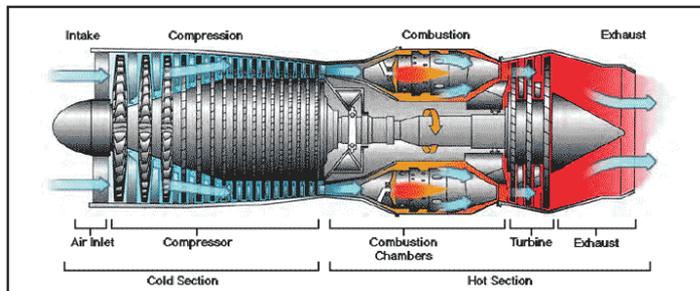
Sistemas de aquecimento e resfriamento

Sistemas de energia alternativos

Aplicações biomédicas



Vehicle engine



# Definições de Sistema

## Definição de sistema

- O sistema delimita a região de estudo
  - Com a definição de sistema temos a definição de vizinhança e a fronteira
  - Objetivo
    - Definir/identificar interações com a vizinhança
    - Aplicar leis da física
  - Forma e volume podem ser constantes ou não

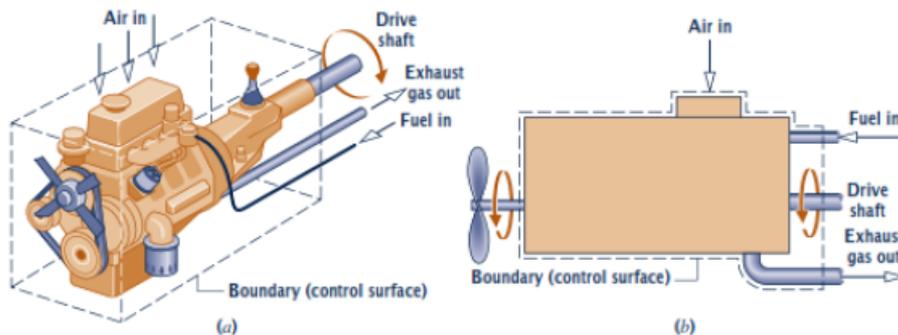
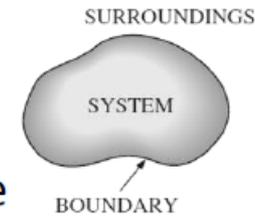


Fig. 1.2 Example of a control volume (open system). An automobile engine.

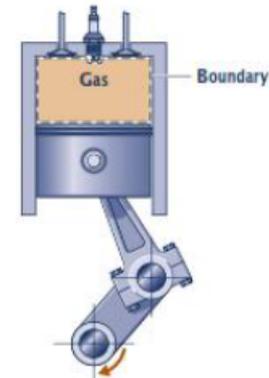
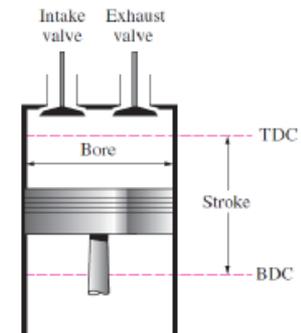
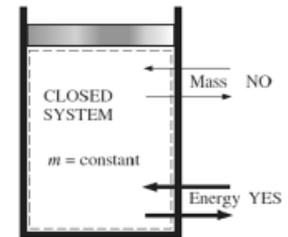


Fig. 1.1 Closed system: A gas in a piston-cylinder assembly.

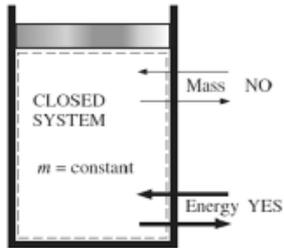
# Definições de Sistema

## Definição de sistema

- Tipos de sistema:
  - O sistema Fechado (“massa de controle”)
    - fronteira impermeável
    - Define uma quantidade de matéria
  - Volume de controle (sistema aberto)
    - massa pode atravessar a fronteira

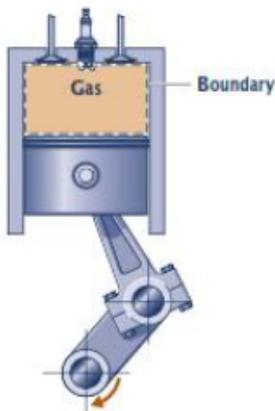


# Definições de Sistema



## Definição de sistema

- Sistema Fechado (“massa de controle”)
  - Sempre contem a mesma matéria
  - Não existe transferência de massa pelas fronteira
  - O sistema isolado, que não interage com a vizinhança é um caso especial de sistema fechado



Ex. Pistão com as válvulas fechadas:

- massa não atravessa o volume
- Pode ocorrer transferência de calor
- Reações podem ocorrer e mudar a natureza dos gases

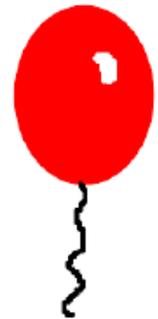
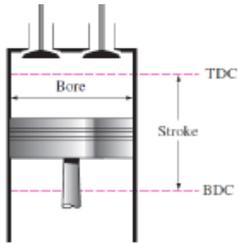


Fig. 1.1 Closed system: A gas in a piston-cylinder assembly.

# Definições de Sistema



## Definição de sistema

- Volume de controle (sistema aberto)
  - Existe transferência de massa pelas fronteiras
  - Bastante usado para análises de engenharia (parece mais fácil delimitar uma região do espaço)

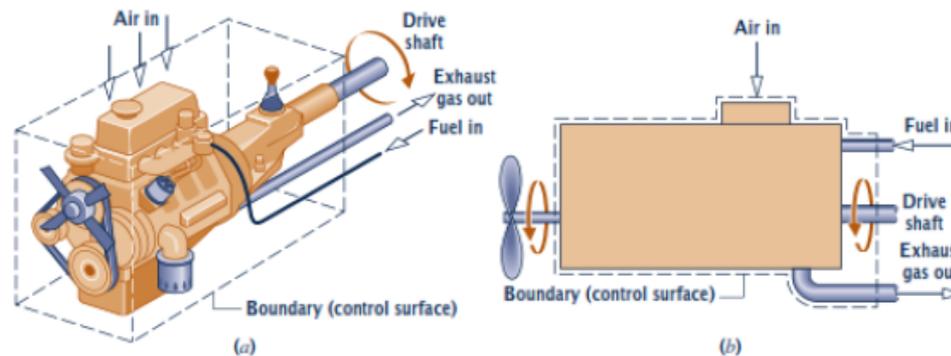


Fig. 1.2 Example of a control volume (open system). An automobile engine.

Caso (a) e (b) tem pequena diferença

# Definições de Sistema

## Definição de sistema

- Volume de controle (sistema aberto)
  - Exemplos “BIO”

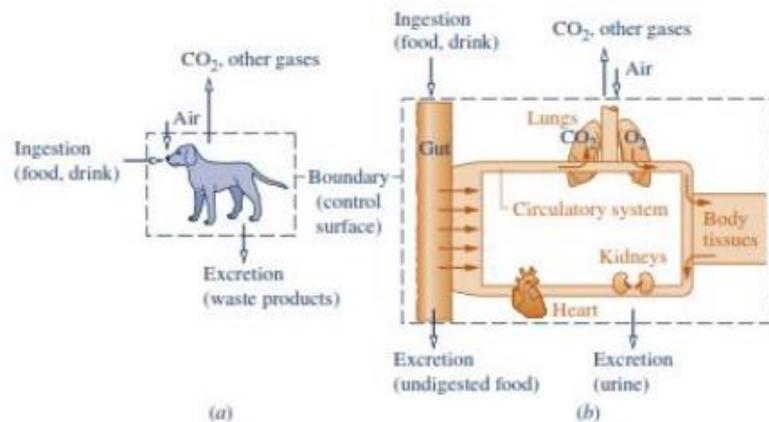


Fig. 1.3 Example of a control volume (open system) in biology.

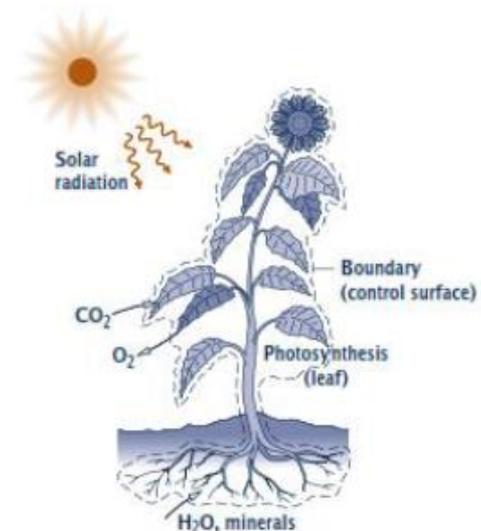


Fig. 1.4 Example of a control volume (open system) in botany.

# Definições de Sistema

## Definição de sistema

- Seleccionando as fronteiras do sistema
  - Buscar escolher a mais conveniente para uma dada análise, isso depende:
    - do objetivo da análise
    - do que se conhece nas fronteiras

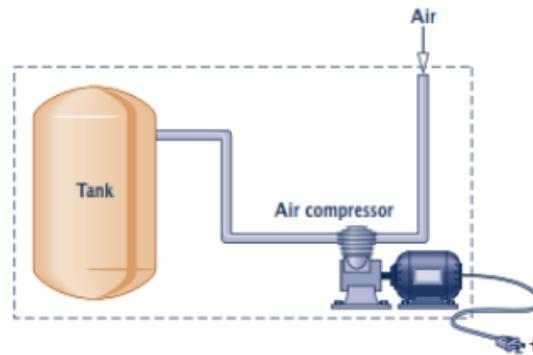


Fig. 1.5 Air compressor and storage tank.

Determinar a potencia elétrica para levar o tanque de  $P_1$  para  $P_2$

O volume poderia considerar somente o compressor se as condições do ar na entrada e na saída do compressor for conhecida

# Propriedades

A propriedade de uma substância é algo intrínseco e mensurável; as propriedades podem ser divididas em dois grandes grupos:

**Extensivas** (dependem do tamanho ou da extensão do sistema)

Ex. Massa, volume, energia...

**Intensivas:** (seus valores são independentes do tamanho ou da extensão de um sistema)

Ex. Volume específico, pressão, temperatura...

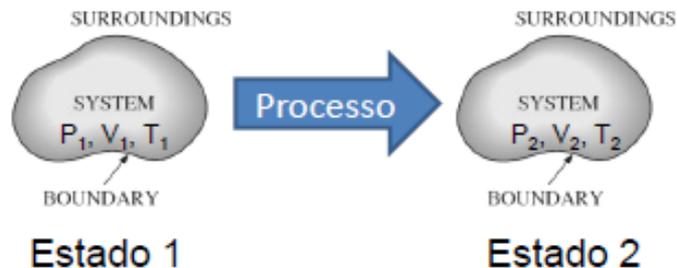
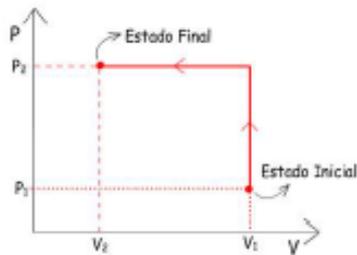
Uma **propriedade** é uma característica macroscópica de um sistema, tal como massa, volume, energia, pressão e temperatura, para as quais um valor numérico pode ser atribuído em um dado tempo sem o conhecimento do comportamento prévio (*história*) do sistema.

# Estado

- O **estado** refere-se à condição de um sistema como descrito pelas suas propriedades.
- Posteriormente no estudo das análises de estado vamos ver que o estado de uma substância pura é descrito por duas propriedades intensivas distintas quando o sistema está em equilíbrio.
- Para descrevermos um sistema precisamos conhecer suas propriedades e como elas se correlacionam sendo o valor numérico independente do histórico do sistema
- O termo Estado é referente a um conjunto de propriedades de um sistema (independe do processo)

# Processo

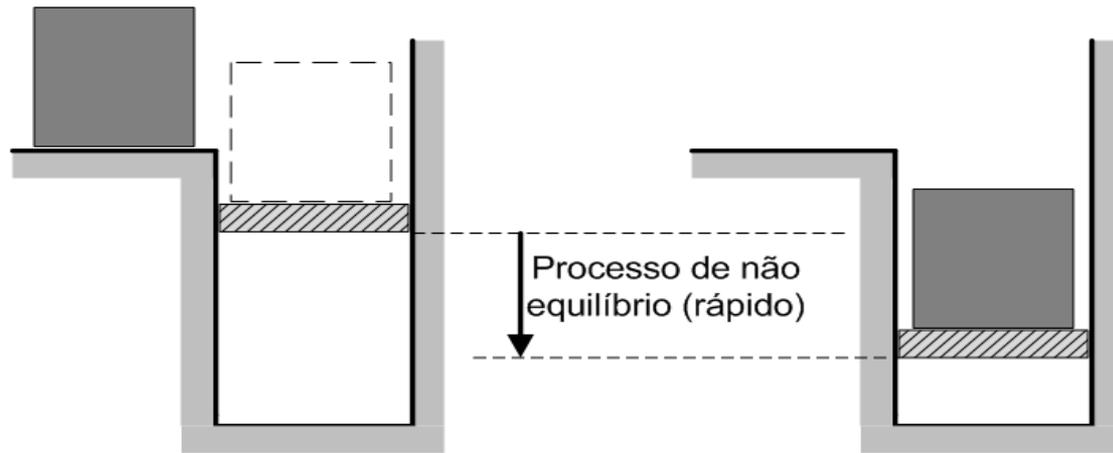
– Mudança entre estados de equilíbrio -> Processo -> reversível ou irreversível (Mistura, Transferência Calor)



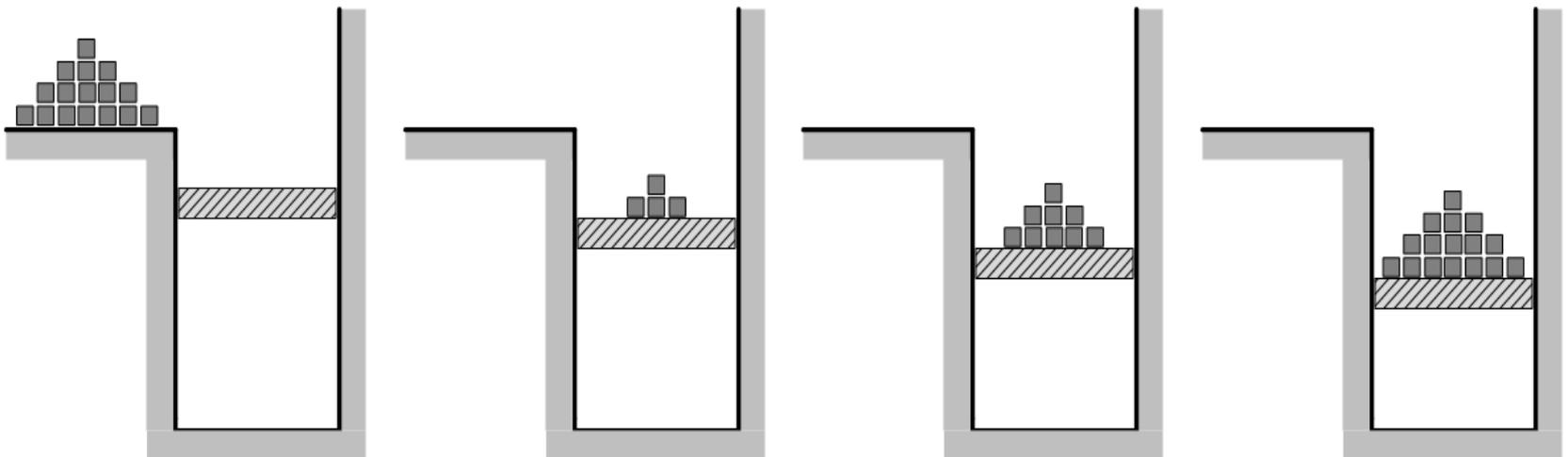
– O **processo** descreve uma mudança de estado para outro, no entanto, no entanto se um sistema exibe o mesmo valor de suas propriedades em dois tempos distintos, e ele possui o mesmo estado nestes tempos (não há mudanças em suas propriedades), é dito que o sistema está em **regime permanente**.

– Por último um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que se inicia e termina em um mesmo estado

# Processo

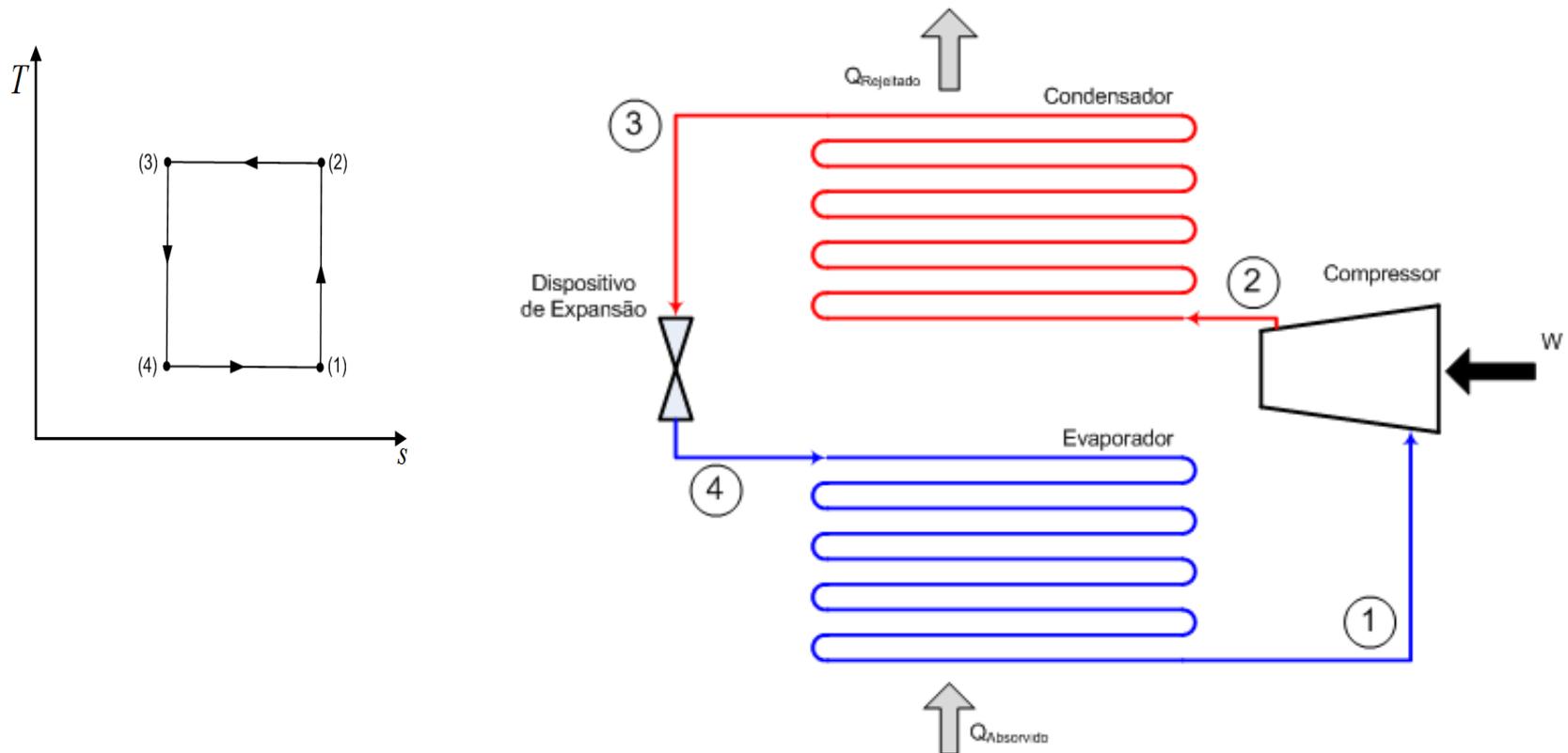


Processo quase estático (lento)



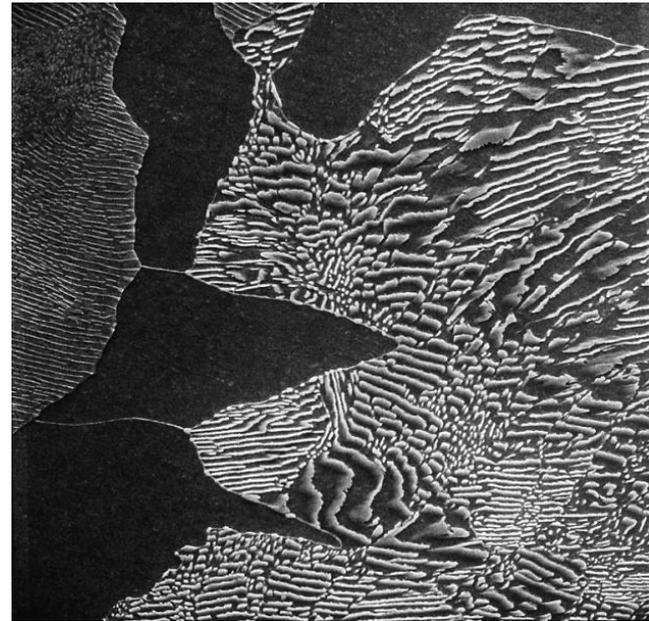
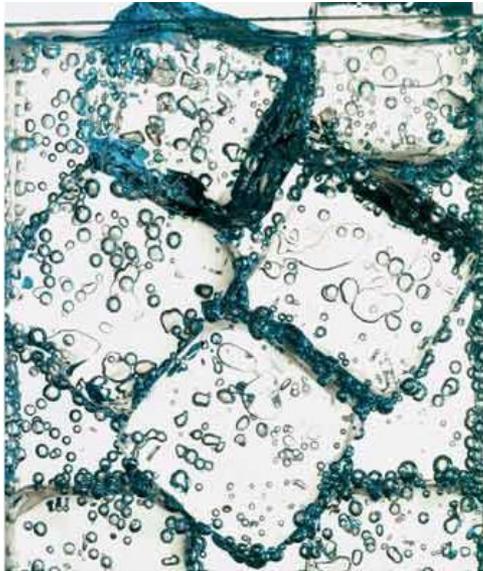
# Processo

– Por último um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que se inicia e termina em um mesmo estado



# Definições

- O sistema pode ser homogêneo ou heterogêneo (mais de uma fase).
  - Fase -> Porção homogênea do sistema com características físicas e químicas uniformes
  - Substância pura -> Porção cuja composição química é uniforme e invariável



# Definições

**Parede adiabática:** é um conceito de isolante ideal, ou seja não permite trocar calor com a vizinhança. Quando um sistema envolto numa parede adiabática sofre um processo, nenhuma interação térmica com a vizinhança é possível; esse tipo de processo é chamado de **processo adiabático**.

**Processo isotérmico:** é um processo que ocorre a temperatura constante

**OBS:** Um processo adiabático não é necessariamente um processo isotérmico nem um processo isotérmico é necessariamente adiabático

# Sistema de unidades

## Unidades Básicas Inglesas (English System ou Imperial System)

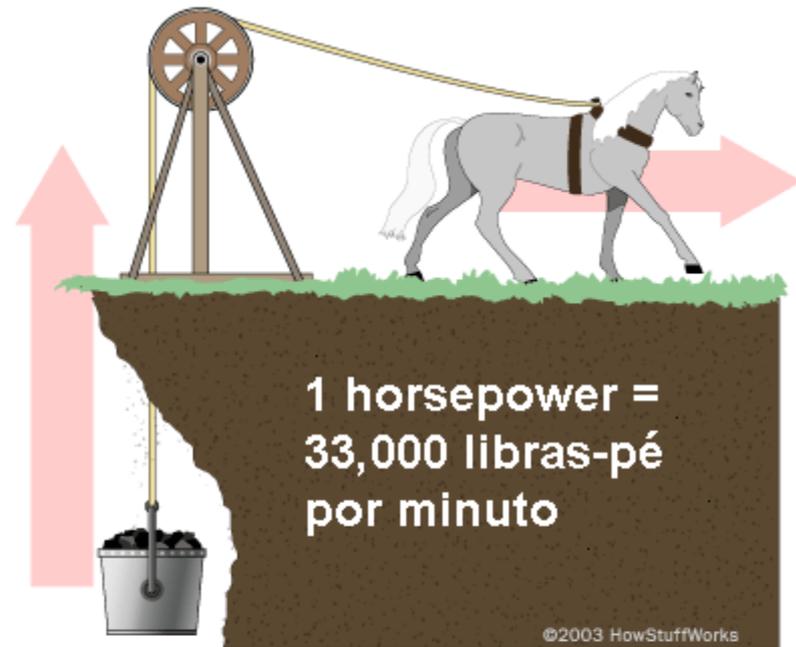
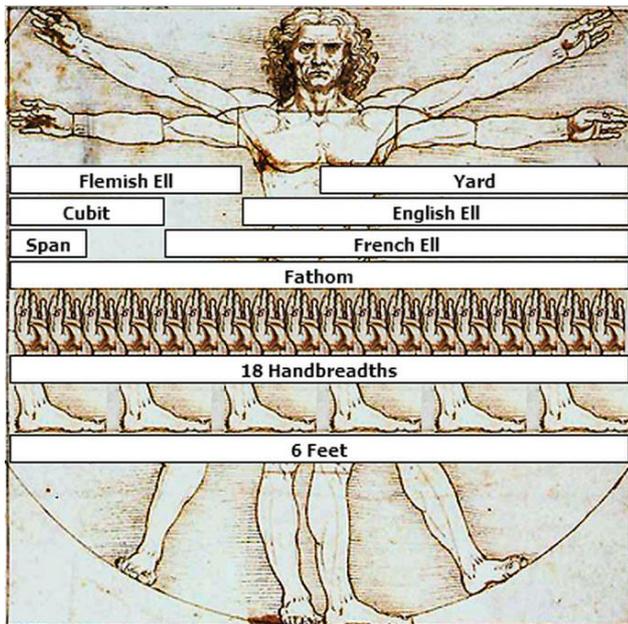
Polegada [in] = 2,54 cm

Pé [ft] = 12 in = 30,48 cm

Jarda [yd] = 3 ft = 91,44 cm

Milha [mi] m = 1,609347 km

Légua = 4.828,032 m



$$\text{potência} = \frac{\text{trabalho}}{\text{tempo}} = \frac{\text{força} \times \text{deslocamento}}{\text{tempo}}$$

# Sistema de unidades

## Sistema Internacional

Massa (Kg)

Tempo (s)

Comprimento (m)

Temperatura (K)

Pressão (Pa) (N/m<sup>2</sup>)

Energia (J)

Potência (w)



**SI**

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$$

**Sistema Inglês**

$$1 \text{ lbf} = (1 \text{ lb})(32.1740 \text{ ft/s}^2) = 32.1740 \text{ lb}\cdot\text{ft/s}^2$$

# Massa específica

Quando utilizamos a hipótese do contínuo, podemos tratar de propriedades intensivas como “em um ponto”, a massa específica pode ser definida por:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left( \frac{m}{V} \right)$$

A massa é uma propriedade extensiva que pode ser determinada através da integração da massa específica (que pode variar ponto a ponto) no volume de controle

$$m = \int_V \rho dV$$

# Volume específico

Por fim o volume específico é definido como o inverso da massa específica:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{Unidades} \rightarrow (\text{m}^3/\text{Kg})(\text{cm}^3/\text{g})(\text{ft}^3/\text{lb})$$

Em certas aplicações é conveniente exprimir propriedades como o volume específico em uma base molar, em vez de uma base mássica. O mol corresponde a uma quantidade de uma determinada substância numericamente igual ao seu peso molecular.

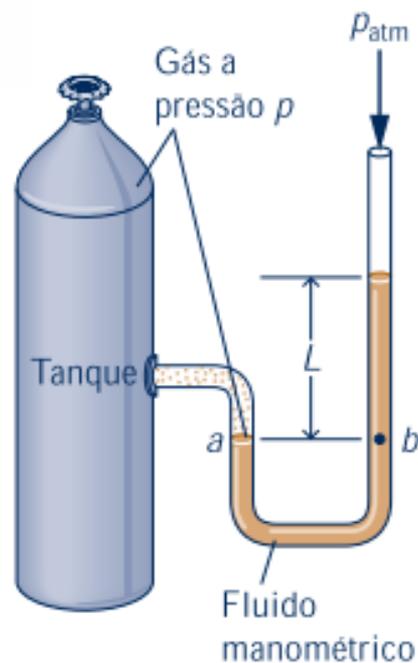
$$n = \frac{m}{M}$$

Para assinalar que uma propriedade está em base molar, uma barra é utilizada acima do símbolo:

$$\bar{v} = Mv \text{Unidades} \rightarrow (\text{m}^3/\text{Kmol})(\text{ft}^3/\text{lbmol})$$

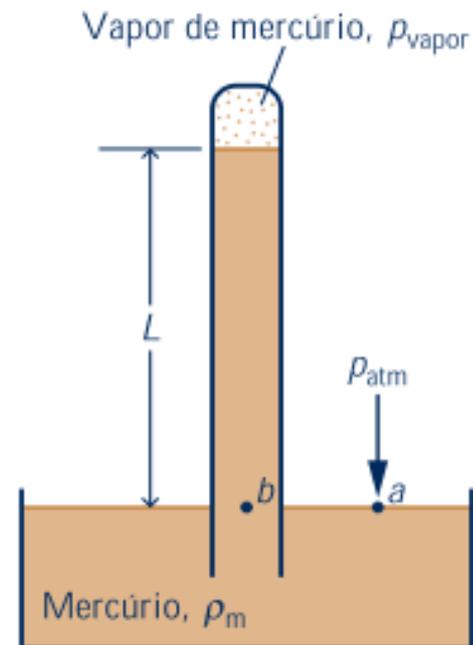
# Pressão

$$p = \lim_{A \rightarrow A'} \left( \frac{F_{\text{normal}}}{A} \right)$$



**Fig. 1.7** Manômetro.

$$p = p_{\text{atm}} + \rho g L$$

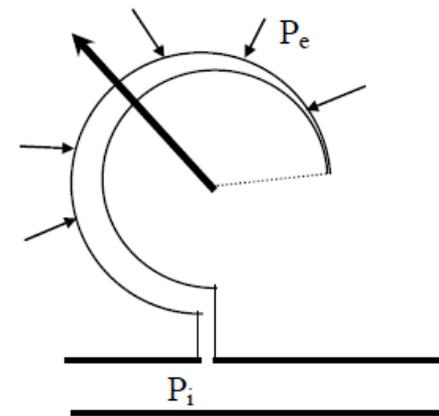
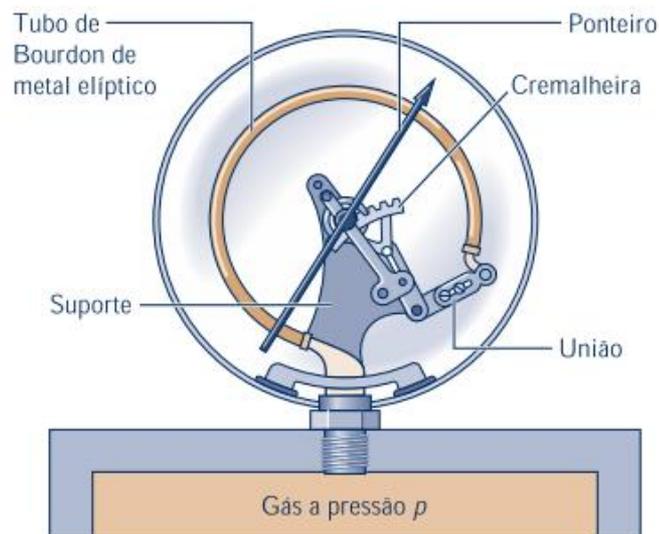


**Fig. 1.8** Barômetro.

$$p_{\text{atm}} = p_{\text{vapor}} + \rho_m g L$$

# Pressão

Um manômetro do tipo tubo de Bourdon é mostrado na Fig. 1.9. A figura apresenta um tubo curvo, que possui uma seção reta elíptica com uma extremidade associada à pressão que se deseja medir e uma outra conectada a um ponteiro por um mecanismo. Quando o fluido sob pressão preenche o tubo, a seção elíptica tende a se tornar circular e o tubo se torna reto. Esse movimento é transmitido pelo mecanismo ao ponteiro. Calibrando-se a deflexão do ponteiro para pressões conhecidas, uma escala graduada pode ser elaborada através da qual uma pressão aplicada pode ser lida em unidades convenientes. Devido à sua construção, o tubo de Bourdon mede a pressão relativa às vizinhanças do instrumento. Consequentemente, o mostrador indica zero quando as pressões interna e externa ao tubo são as mesmas.



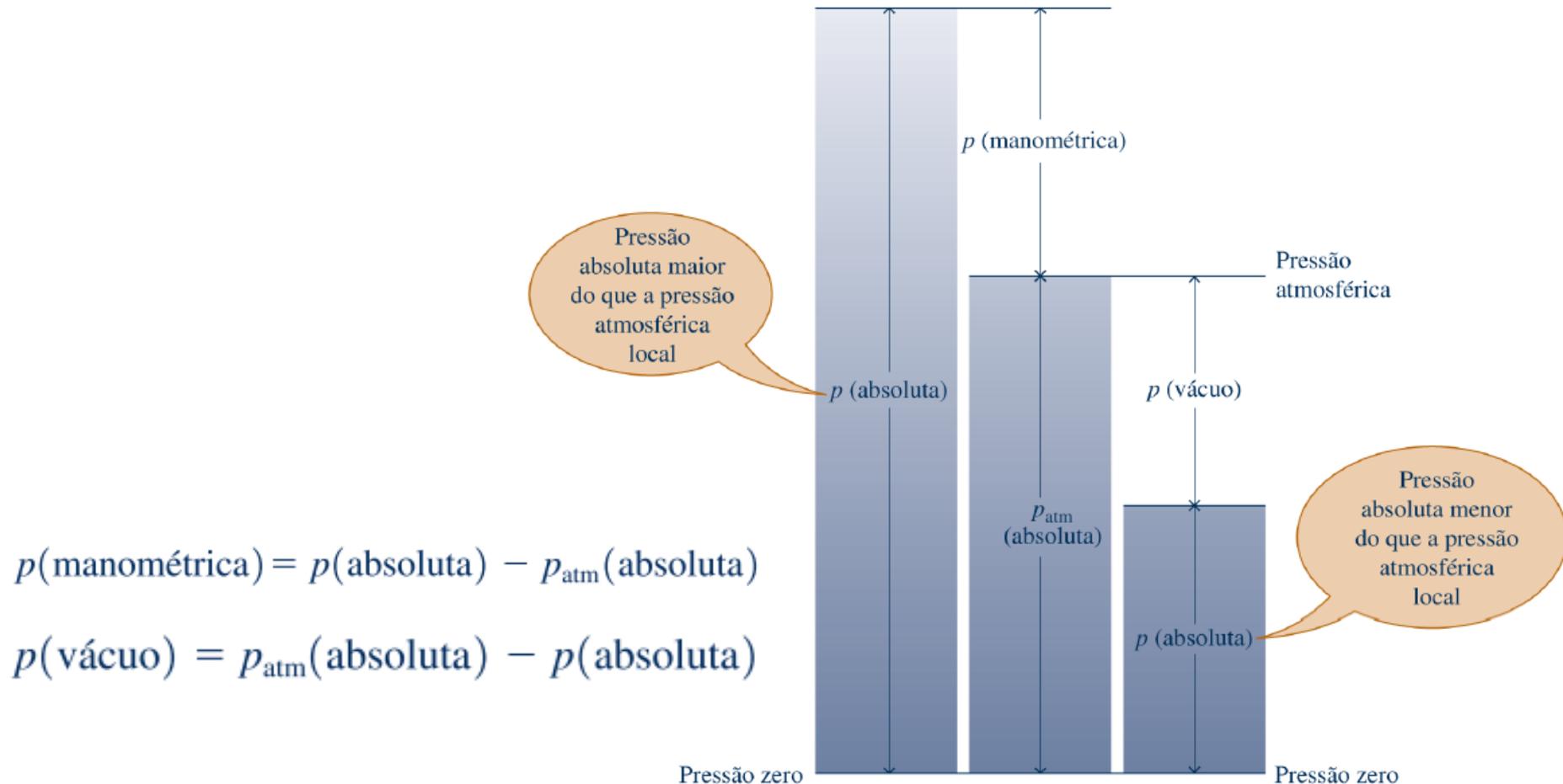
**Fig. 1.9** Medição de pressão por um medidor do tipo tubo de Bourdon.

# Pressão

- ▶ SI a unidade de pressão é o **pascal**:  
 $1 \text{ pascal} = 1 \text{ N/m}^2$
- ▶ Múltiplos do pascal são frequentemente utilizados:
  - ▶  $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ N/m}^2$
  - ▶  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$
  - ▶  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$
- ▶ Unidades inglesas para pressão:
  - ▶ Libra força por pé quadrado, **lbf/ft<sup>2</sup>**
  - ▶ Libra força por polegada quadrada, **lbf/in.<sup>2</sup>**

# Temperatura

$$1 \text{ atmosfera padrão (atm)} = \begin{cases} 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ 14,696 \text{ lbf/in}^2 \\ 760 \text{ mmHg} = 29,92 \text{ inHg} \end{cases}$$



$$p(\text{manométrica}) = p(\text{absoluta}) - p_{\text{atm}}(\text{absoluta})$$

$$p(\text{vácuo}) = p_{\text{atm}}(\text{absoluta}) - p(\text{absoluta})$$

# Temperatura

- ▶ Escala Rankine (°R):

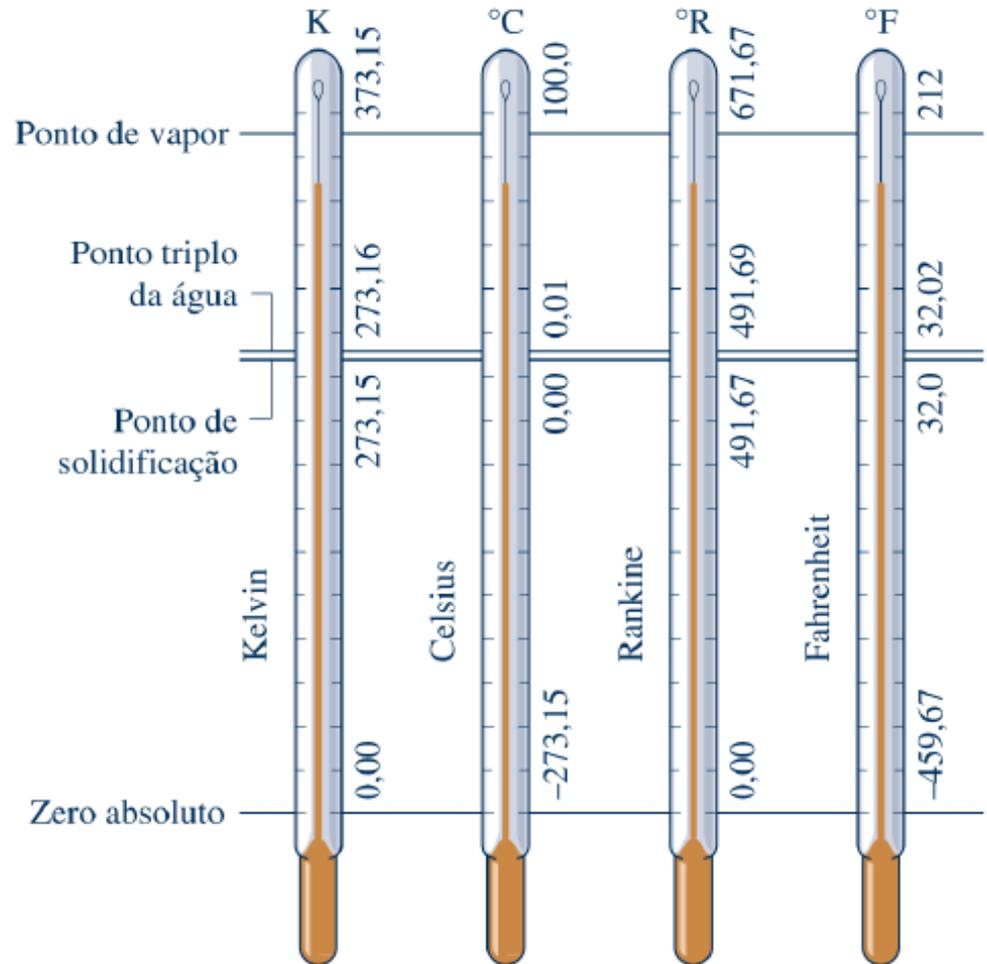
$$T(^{\circ}\text{R}) = 1.8T(\text{K})$$

- ▶ Escala Celsius (°C):

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

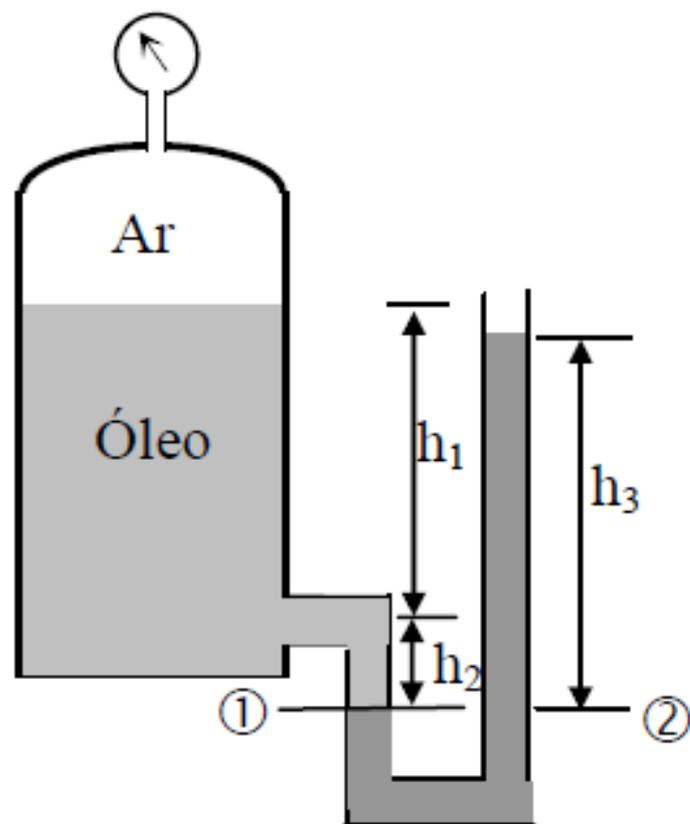
- ▶ Escala Fahrenheit (°F):

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459.67$$



# Exercícios

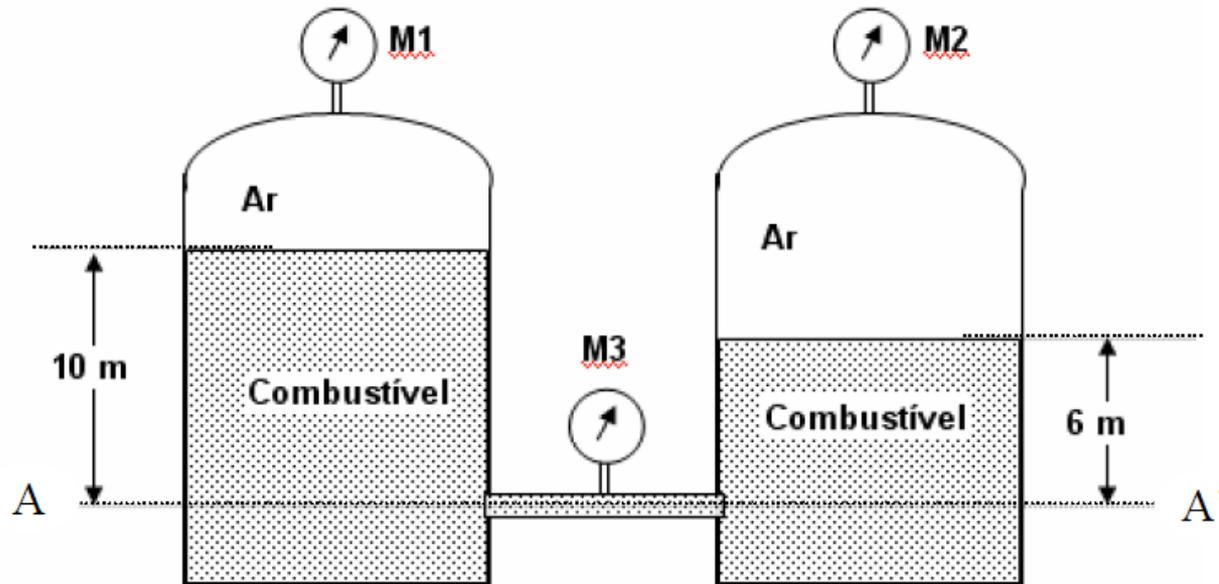
Um tanque fechado contém ar comprimido e um óleo que apresenta densidade 0,9. O fluido utilizado no manômetro em “U” conectado ao tanque é mercúrio ( densidade 13,6 ). Se  $h_1 = 914$  mm,  $h_2 = 152$  mm e  $h_3 = 229$  mm, determine a leitura do manômetro localizado no topo do tanque.



# Exercícios

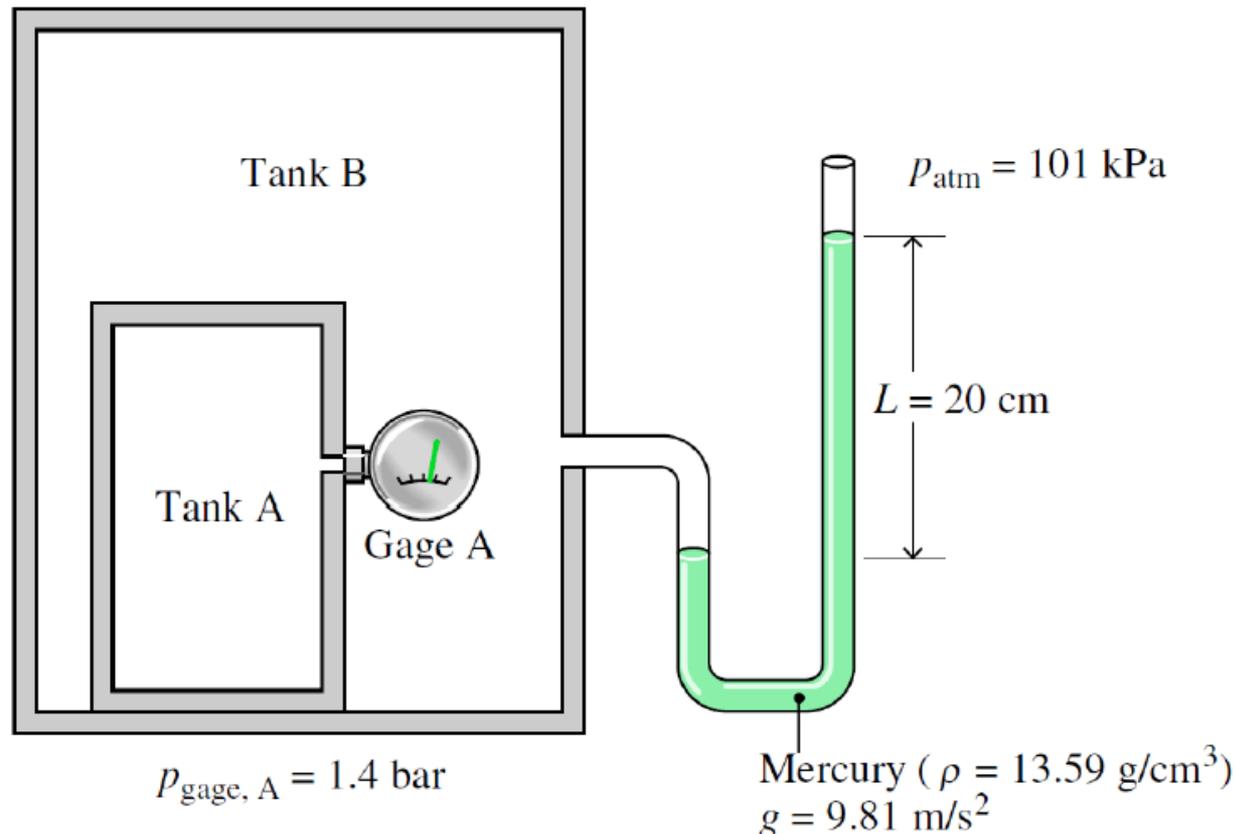
Dois tanques de combustível pressurizados estão interconectados por uma tubulação conforme mostra a figura abaixo. Dado que o manômetro metálico M1 indica uma pressão de 40 KPa e que o peso específico do combustível é  $7000 \text{ N/m}^3$ , determine :

- a pressão indicada pelo manômetro M2;
- a pressão indicada pelo manômetro M3.



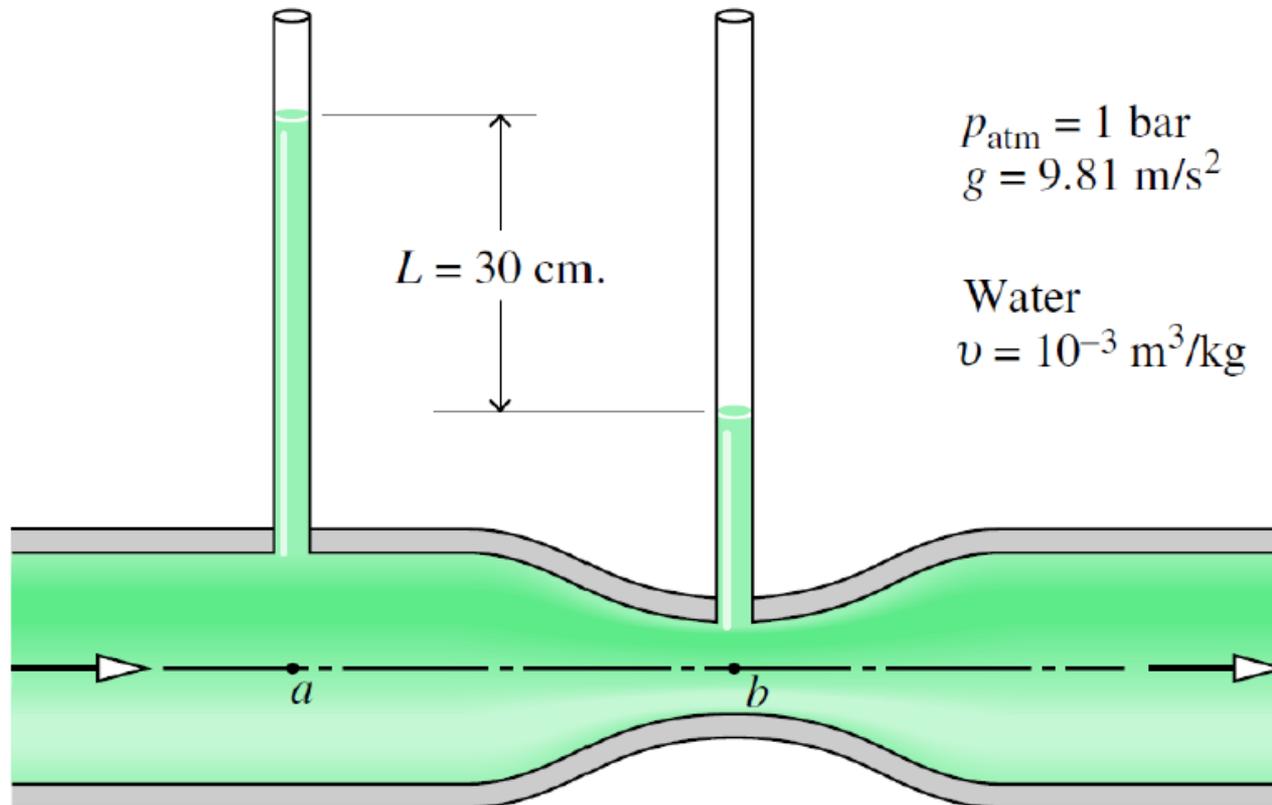
# Exercícios

A figura mostra um tanque no interior de um outro, cada um contendo ar. O manômetro A está instalado no interior do tanque B e registra 140 kPa. O manômetro de tubo em U conectado ao tanque B contém mercúrio. Usando os dados do diagrama, determine a pressão absoluta no interior do tanque A, em kPa. A pressão atmosférica nas vizinhanças do tanque B é de 101 kPa. A aceleração da gravidade é  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

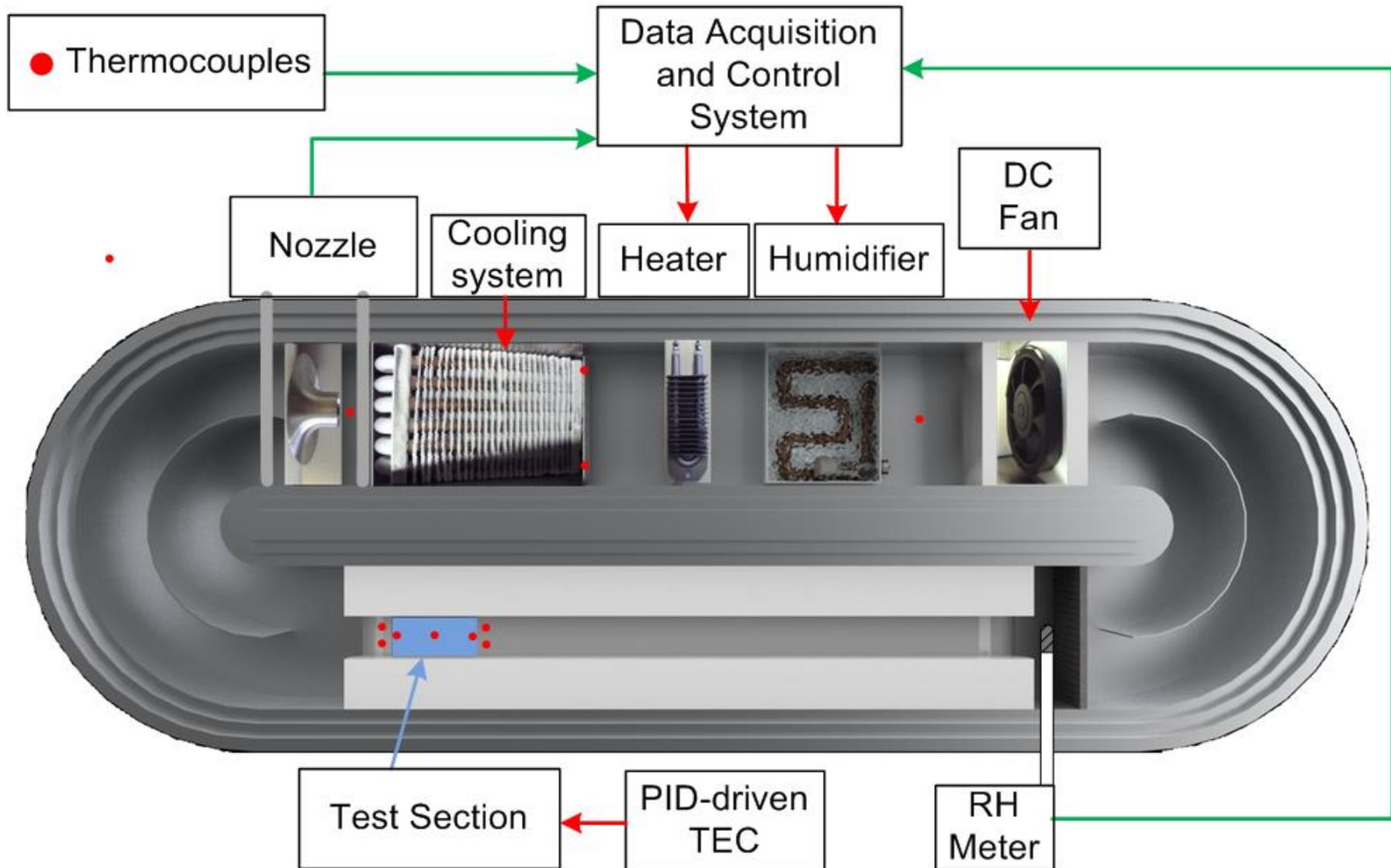


# Exercícios

Água escoa através de um medidor Venturi, conforme ilustrado na figura. A pressão da água no tubo suporta colunas de água que diferem de (0,3 m). Determine a diferença de pressão entre os pontos a e b, em Pa. A pressão aumenta ou diminui na direção do escoamento? A pressão atmosférica é de um  $p_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$ , o volume específico da água é de  $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$  e a aceleração da gravidade é  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



# Exemplo de aplicação



# Exemplo de aplicação

A velocidade numa seção de testes de área 10mmX60mm é obtida através da medição de pressão diferencial efetuada por um transdutor de pressão diferencial (princípio de diafragma).

O transdutor faz a medida de pressão diferencial a montante e jusante de um bocal convergente normalizado.

Sabendo-se que a perda de pressão máxima suportada pelo aparelho é de 110Pa, pede-se que determine a máxima velocidade na seção de testes.

OBS: A medida de vazão é um método iterativo normalizado pela ASHRAE 51 (1999).

$$\dot{V} = 3600 C_d A_n Y \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_a (1 - \beta_b^4)}}$$

$$C_d = 0,9986 - \frac{7,006}{\sqrt{Re}} + \frac{134,6}{Re}$$

$$Y = 1 - (0,548 + 0,71\beta_b^4)(1 - \alpha_p)$$

$$\alpha_p = \frac{p_{atm}}{p_{atm} + \Delta p} \quad \beta_b = \frac{d}{D_h} \quad Re = \frac{1097}{60\mu_a} C_d d Y \sqrt{\rho_a \Delta p}$$

Dados:

$$P_{atm} = 101 \text{ kPa}$$

$$D_h = 0,2 \text{ m}$$

$$d = 0,0127 \text{ m (1/2")}$$

$$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ (Kg/m.s)}$$

$$\rho_{ar} = 1,12 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

