

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



# PME 3344

# Termodinâmica Aplicada

- 1) Introdução
- 2) Conceitos Fundamentais



## Objetivo

- Apresentar os conceitos relacionados à Termodinâmica, aplicados a situações de interesse nos campos da Engenharia Elétrica e Engenharia de Minas.

## Programa

1. Substância pura
2. Trabalho e calor
3. 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> Leis da Termodinâmica para sistemas e volumes de controle
4. Conversão de energia por processos e ciclos termodinâmicos

# Cronograma de atividades



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

AULA	DATA	TÓPICO DO PROGRAMA	LISTA DE EXERCÍCIOS
01	01/08	Introdução / Conceitos termodinâmicos iniciais	
02	08/08	Substância Pura / Trabalho e Calor	
03	15/08	Primeira Lei da Termodinâmica para Sistemas	LISTA 01 (15/08 A 19/08)
04	22/08	Primeira Lei da Termodinâmica para Sistemas	LISTA 02 (22/08 A 26/08)
05	29/08	Primeira Lei da Termodinâmica para Volume de Controle	LISTA 03 (29/08 A 02/09)
06	12/09	Segunda Lei da Termodinâmica	
07	19/09	Entropia	
08	26/09	Aplicação de conceitos – aula de exercícios	LISTA 04 (19/09 A 23/09)
09	03/10	<b>1ª. Prova</b>	
10	10/10	Segunda Lei da Termodinâmica para Volume de Controle	
11	17/10	Segunda Lei da Termodinâmica para Volume de Controle	LISTA 05 (17/10 A 21/10)
12	24/10	Ciclos Motores a Vapor	LISTA 06 (24/10 A 28/10)
13	31/10	Ciclos Motores a Vapor	
14	07/11	Ciclos Motores a Ar	
15	21/11	Ciclos de Refrigeração	LISTA 07 (07/11 A 11/11)
16	28/11	Aplicação de conceitos – aula de exercícios	LISTA 08 (21/11 A 25/11)
17	05/12	<b>2ª. Prova</b>	
18	12/12	<b>Prova substitutiva</b>	



★ Critério de aproveitamento:

- $MF = (2 \cdot A + 3 \cdot P1 + 3 \cdot P2) / 8$  onde:
- MF= média final;
- A= média aritmética de avaliações realizadas ao longo do semestre;
- P1= nota da 1ª prova;
- P2= nota da 2ª prova.

★ Prova substitutiva contemplará todo o conteúdo da disciplina

★ Prova substitutiva será realizada somente nos casos de impossibilidade de comparecimento do aluno com comprovação mediante apresentação de atestado médico fornecido pelo Hospital Universitário.

★ Duas provas com consulta a apenas uma folha de formulário, de tamanho A4, preparada pelo aluno, a ser recolhida ao final, e a um extrato das Tabelas Termodinâmicas. É vedado o empréstimo de material;



<b>Professor</b>	<b>Sala</b>	<b>Horário de atendimento</b>
Alberto	TS-21	2ª feira das 14:00 às 15:00
Jurandir	TS-29	4ª feira das 11:00 às 12:00
Fiorelli	TS-23	2ª feira das 14:00 às 15:00
Maurício	TS-33	2ª feira das 14:00 às 15:00



## Livros sugeridos:

- ◆ Moran, M.J. Shapiro, H.N. Munson, B.R. DeWitt, D.P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos, LTC, 2005.
- ◆ Van Wylen, G.J. Borgnakke, C. Sonntag, R.E. Fundamentos da Termodinâmica, 7<sup>a</sup> ed., Edgard Blücher, 2009.
- ◆ Moran, M.J. Shapiro, H.N. Princípios de Termodinâmica Para Engenharia. LTC, 6<sup>a</sup> ed., 2009.
- ◆ Çengel, Y. A.; Boles, M. A. Termodinâmica. McGraw-Hill, 5<sup>a</sup> ed., 2006.



Do grego

Termhe (calor) + Dynamis (potência) = Termodinâmica

"Termodinâmica é a ciência da energia e da entropia"

O objeto de estudo é a energia, suas transformações e seu aproveitamento.



# Conceitos fundamentais

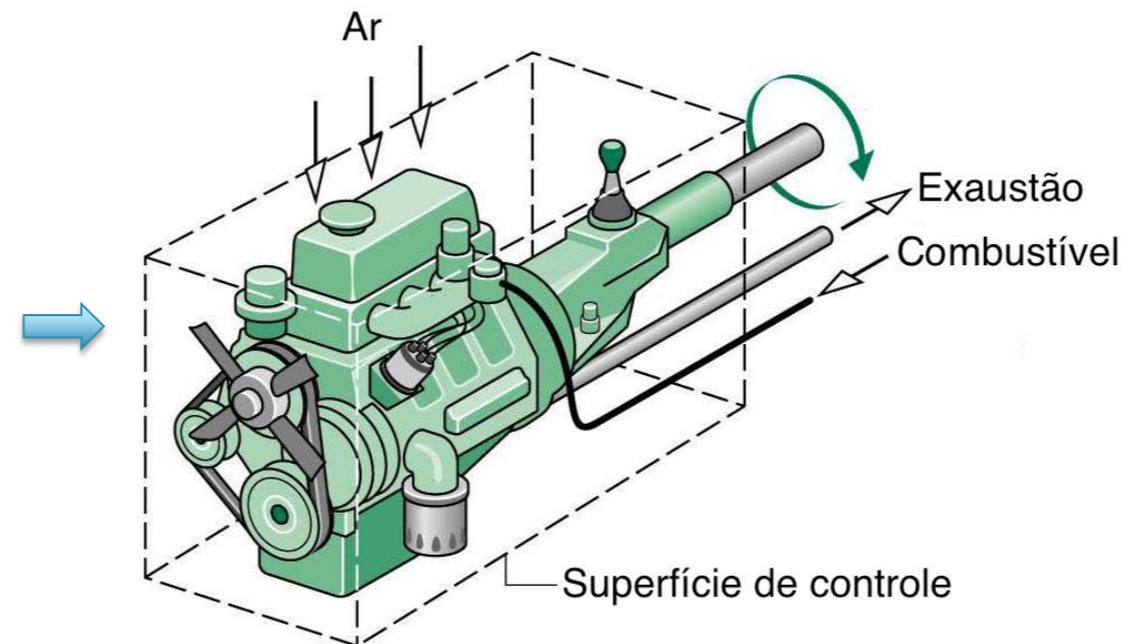
- ❖ **Sistema termodinâmico** – quantidade de matéria com massa e identidade fixas sobre a qual nossa atenção é dirigida.
- ❖ **Volume de controle** – região do espaço sobre a qual nossa atenção é dirigida.
- ❖ **Vizinhança** – tudo que é externo ao sistema ou volume de controle.
- ❖ **Fronteira** – superfície real ou imaginária que separa o sistema da vizinhança. A fronteira não tem espessura, volume ou massa.

**Fronteira** {  
Fixa  
Móvel

É importante reconhecer o tipo de sistema e indicá-lo no início da análise, pois as expressões dos princípios termodinâmicos são diferentes para sistemas e volumes de controle.

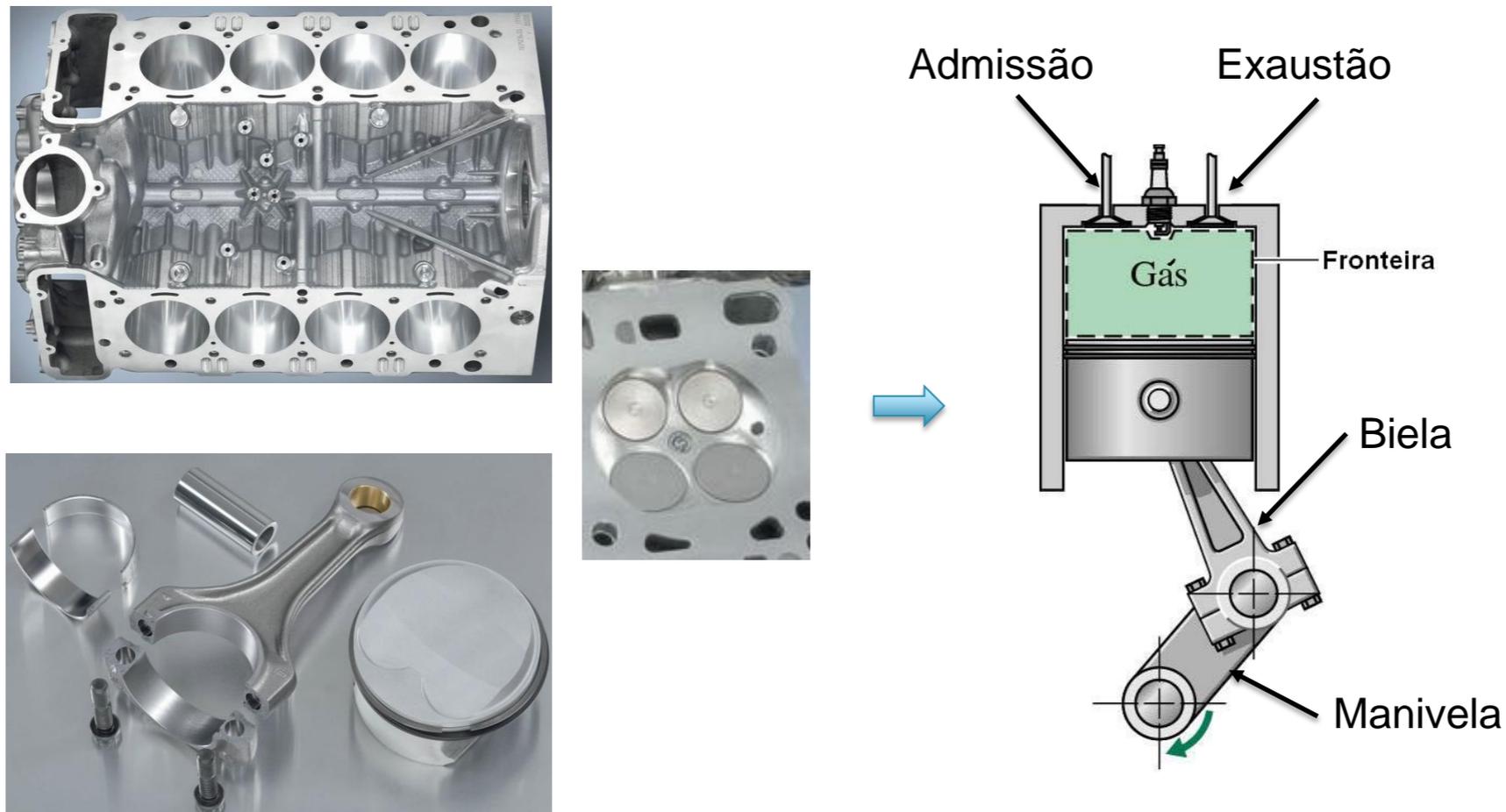
❖ Identificação sistema / volume de controle, exemplos:

(a) Motor de combustão interna;



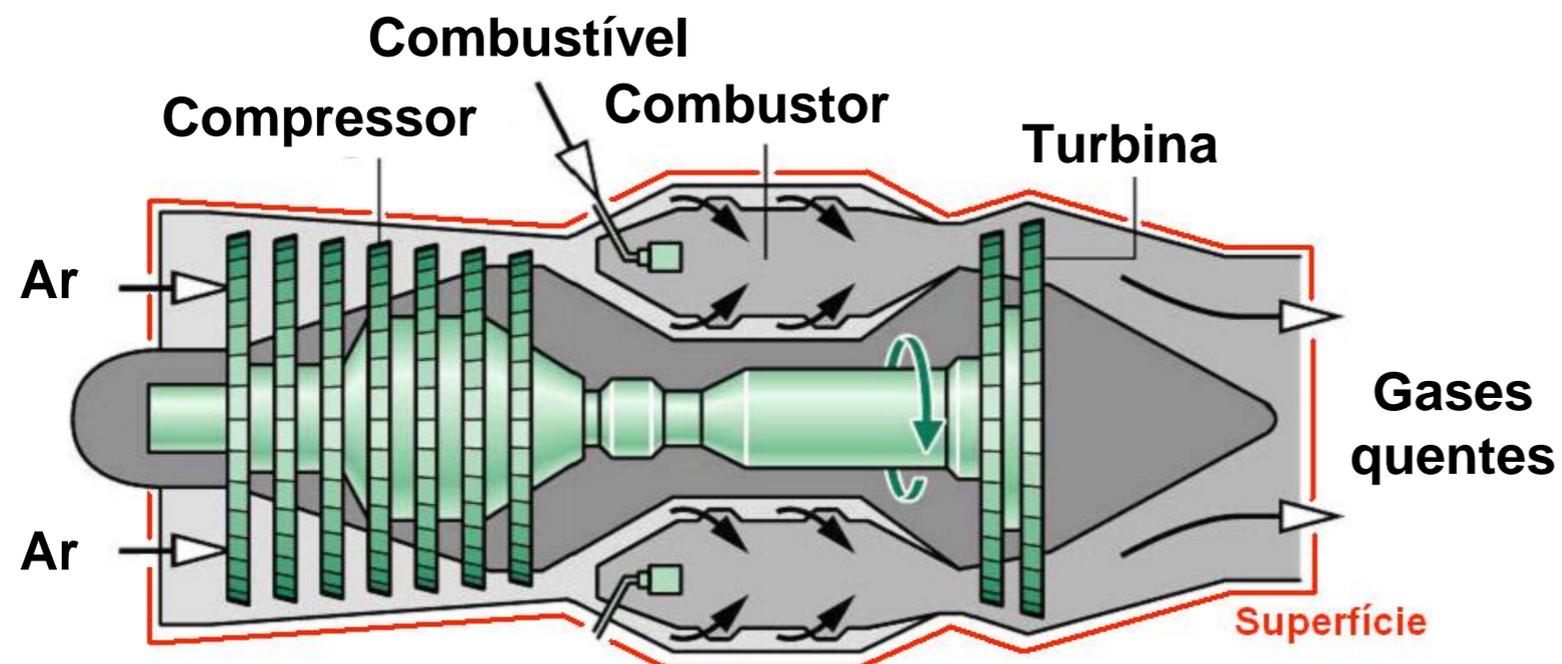
**Resp. - Volume de controle.**

## (b) Cilindro de MCI (motor de combustão de interna);



**Resp. - Sistema (válvulas fechadas) ou VC com pelo menos uma válvula aberta.**

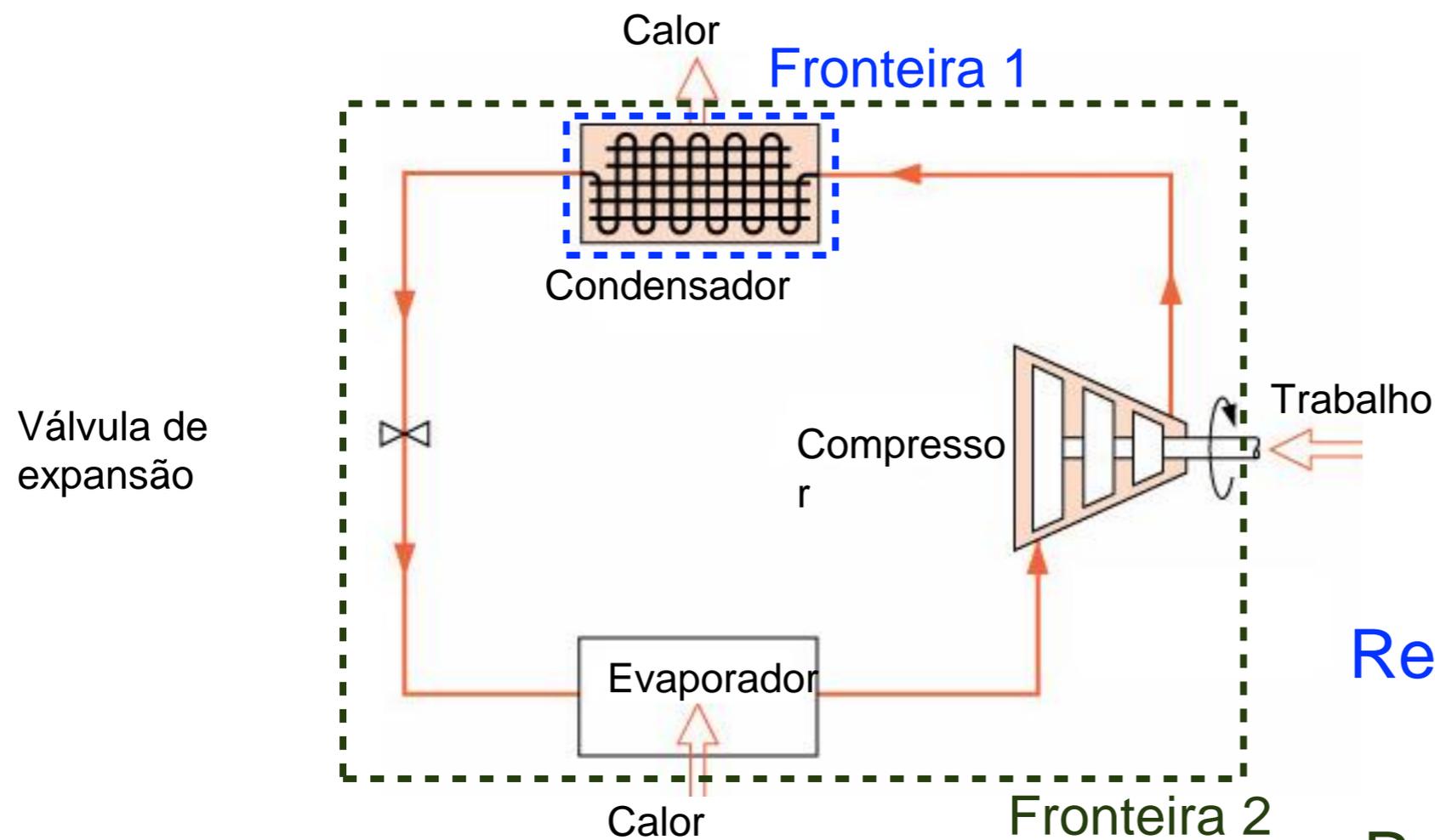
## (c) Motor a jato;



**Resp. - Volume de controle.**



## (d) Ciclo de refrigeração por compressor de vapor;

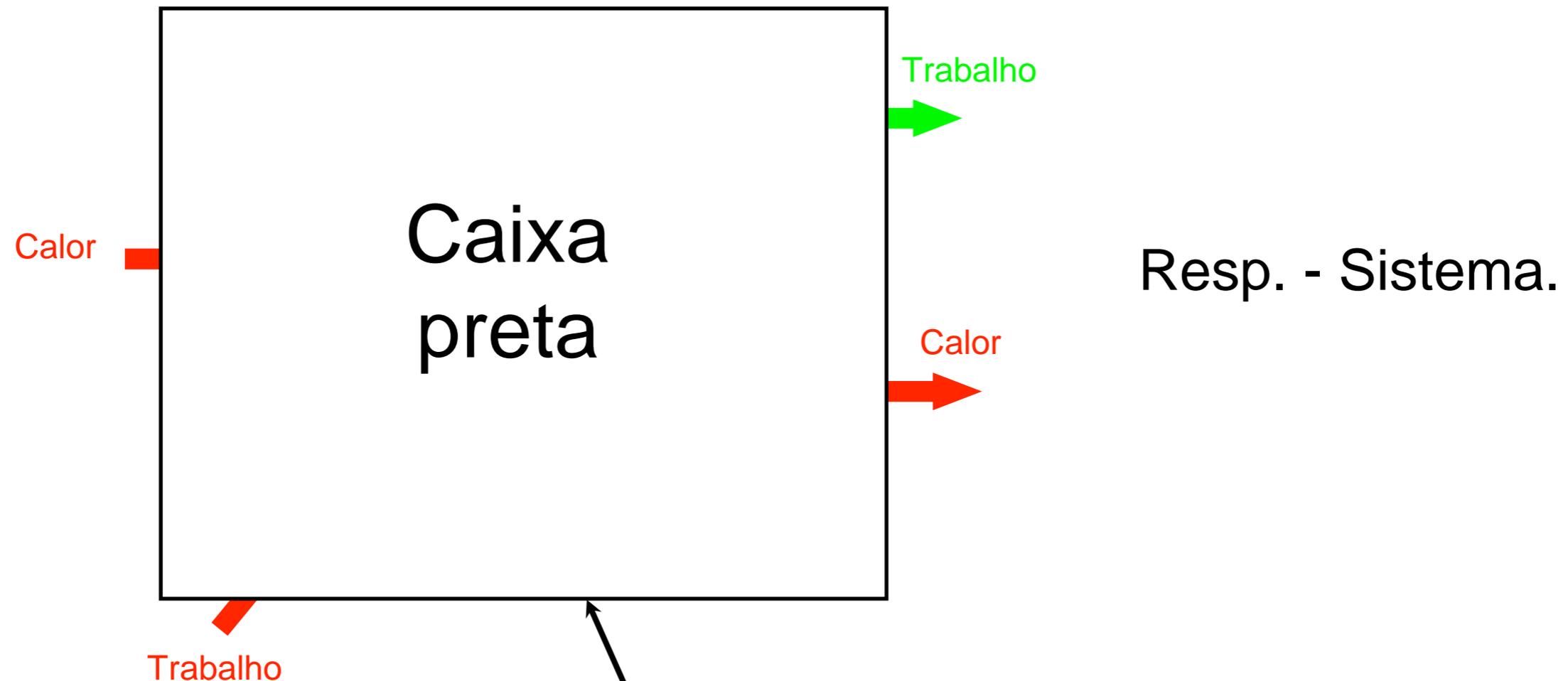


Resp. 1 - Volume de controle.

Resp. 2 - Sistema.



## (e) Ciclo motor a vapor;



Devemos apenas observar o que acontece na fronteira!

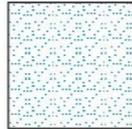
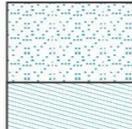
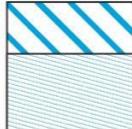
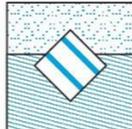
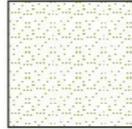
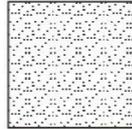
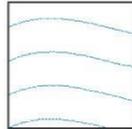
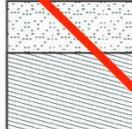
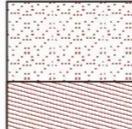
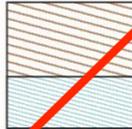


❖ **Ponto de vista microscópico** – ocupa-se da estrutura da matéria (Termodinâmica Estatística).

❖ **Ponto de vista macroscópico** – ocupa-se com o comportamento geral ou global (Termodinâmica Clássica).



**Fase:** Quantidade de matéria totalmente homogênea em composição química e em estrutura física. Em uma fase todas as propriedades são uniformes.

	Homogênea (fase única)	Heterogênea (várias fases)
<b>Componente único</b>	 Vapor  Água  Gelo	 Vapor e água  Gelo e água  Vapor, água e gelo
<b>Vários componentes</b>	 Ar  Gases de combustão  Água do mar	 Ar e ar líquido  Vapor de combustível, ar e combustível líquido  Água e óleo

**Fora do nosso escopo**



Substância pura: Composição química homogênea e invariável. Ela pode existir em mais de uma fase, porém sua composição química deve ser a mesma em cada fase.

*Exemplos:*

- ♣ Água;
- ♣ Fluidos refrigerantes (R12, R22, R134a, R410A, R404A);
- ♣ Gás Oxigênio;
- ♣ Gás Nitrogênio.

*Contra-exemplo:*

- ♣ Ar e "ar-líquido", duas fases com composição química diferente.



# Conceitos fundamentais

*Cada fase pode existir a várias pressões e temperaturas (propriedades macroscópicas mensuráveis) ou, melhor, em vários estados.*

*Cada estado termodinâmico pode ser identificado ou descrito por certas propriedades macroscópicas como, por exemplo, pressão e temperatura.*

*As propriedades termodinâmicas podem ser divididas em duas classes, as intensivas e as extensivas.*

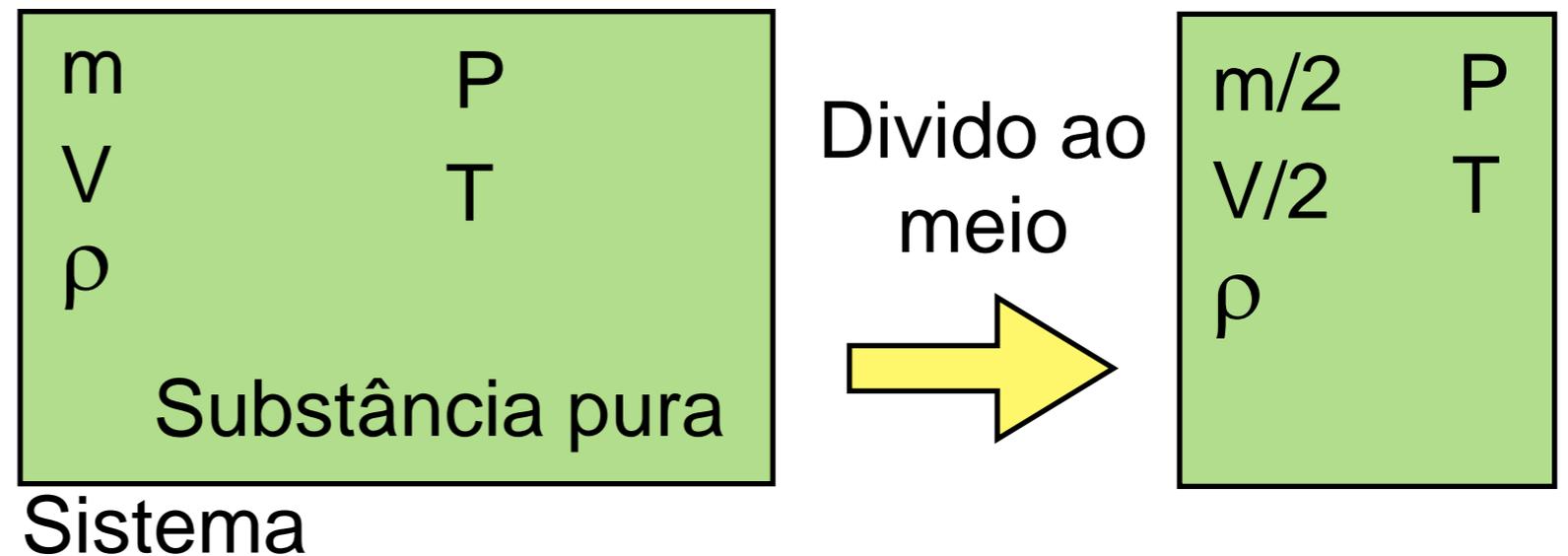
Propriedade intensiva: seu valor é independente da massa.

Propriedade extensivas: seu valor é dependente da massa.



## Intensivas ou extensivas?

- massa ( $m$ );
- volume ( $V$ );
- massa específica ( $\rho$ );
- pressão ( $P$ );
- temperatura ( $T$ ).



### Intensivas:

Pressão;

Temperatura;

Massa específica;

Energia interna específica ( $u$ );

Entalpia específica ( $h$ );

Entropia específica ( $s$ ).

### Extensivas:

Massa ( $m$ );

Volume ( $V$ );

Energia interna ( $U$ );

Entalpia ( $H$ );

Entropia ( $S$ ).



# Conceitos fundamentais

*Freqüentemente nos referimos não apenas às propriedades de uma substância, mas também às propriedades de um sistema.*

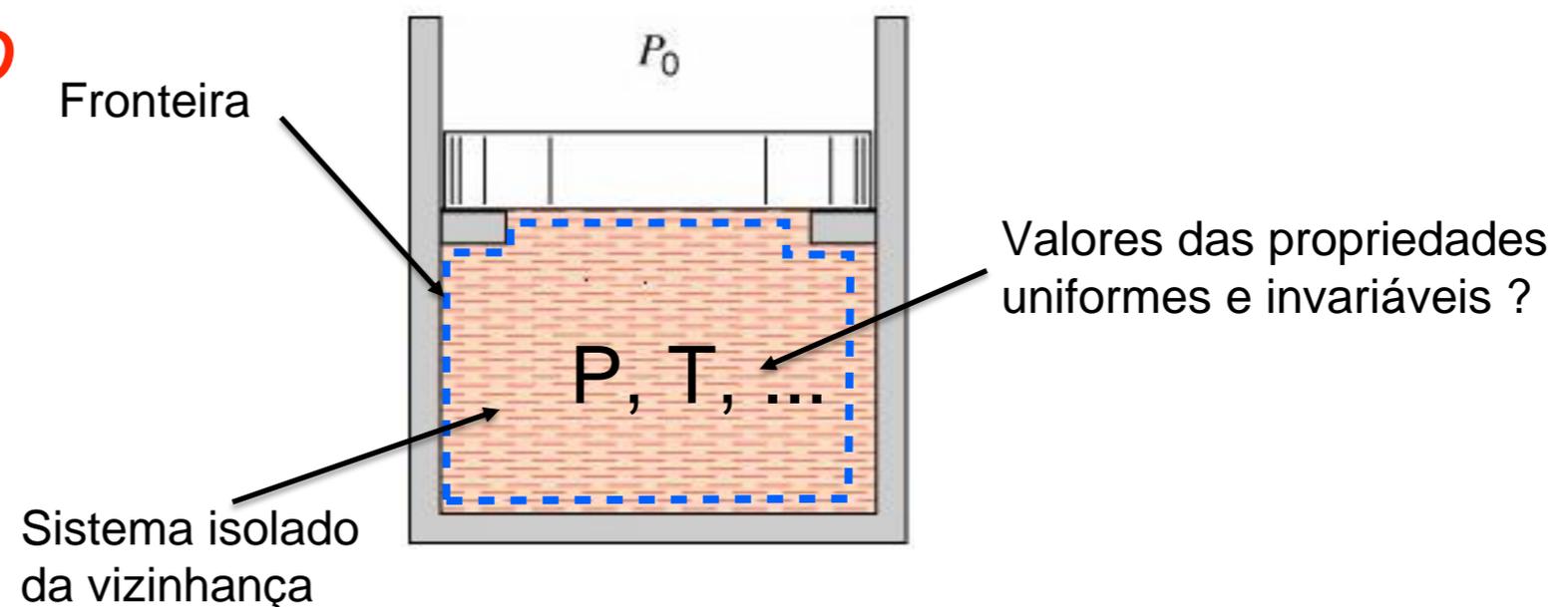


*Isso implica que o valor da propriedade tem significância para todo o sistema.*



*O que por sua vez implica no conceito de equilíbrio.*

**Exemplo: *verificação do equilíbrio***





*Quando o valor de pelo menos uma propriedade do sistema é alterado, ocorreu uma mudança de estado.*



*O caminho definido pela sucessão de estados que o sistema percorre é chamado de processo.*



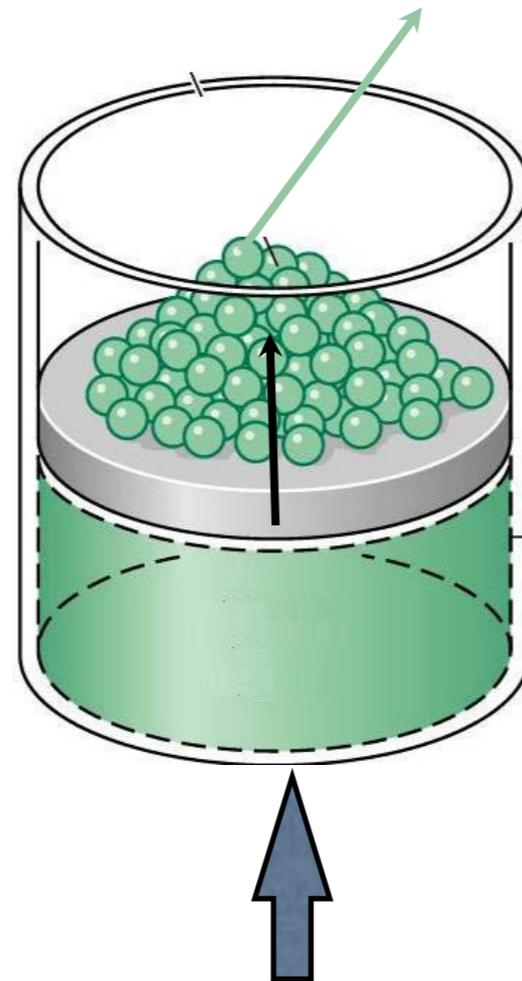
*Um ciclo termodinâmico é uma seqüência de processos que se inicia e termina em um mesmo estado.*



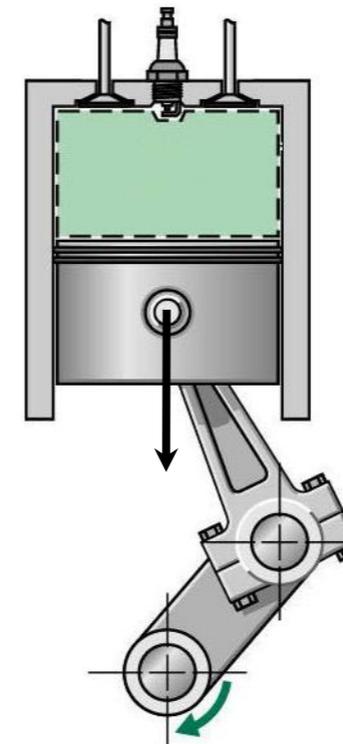
# Conceitos fundamentais

Processo de quase - equilíbrio: desvio do equilíbrio termodinâmico infinitesimal. Também chamado de quase-estático. Ausência de gradientes de temperatura, pressão e potencial químico.

Exemplo e  
contra-exemplo:



?



Quase-  
equilíbrio



Processo isobárico - pressão constante.

Processo isotérmico - temperatura constante.

Processo isocórico - volume constante.

Processo isentálpico - entalpia constante.

Processo isentrópico - entropia constante.



## Unidades no Sistema Internacional

<b>Grandeza</b>	<b>Unidade no SI</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Plural</b>
<i>Massa</i>	quilograma	kg	quilogramas
<i>Comprimento</i>	metro	m	metros
<i>Tempo</i>	segundo	s	segundos
<i>Força</i>	newton	N	newtons
<i>Energia</i>	joule	J	joules
<i>Pressão</i>	pascal	Pa	pascals
<i>Temperatura</i>	kelvin	K	kelvins
<i>Quantidade de matéria</i>	mol	mol	mols
<i>Potência</i>	watt	W	watts



## Algumas propriedades importantes

Propriedades	Símbolo	Unidade
<i>Massa específica</i>	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
<i>Volume específico</i>	$v$	m <sup>3</sup> /kg
<i>Energia interna específica</i>	$u$	kJ/kg
<i>Energia interna</i>	$U$	kJ
<i>Entalpia específica</i>	$h$	kJ/kg
<i>Entalpia</i>	$H$	kJ
<i>Entropia específica</i>	$s$	kJ/(kg.K)
<i>Entropia</i>	$S$	kJ/K



# Conceitos fundamentais

## Massa e volume específico

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \nu = \frac{\text{volume}}{\text{massa}} \quad \Rightarrow \quad \nu = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta V}{\delta m}$$



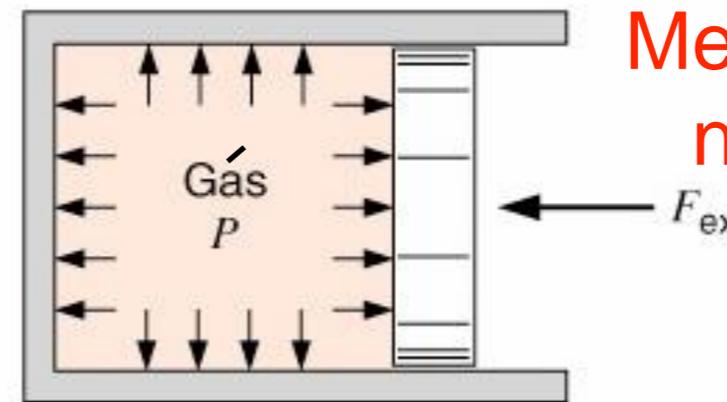


# Conceitos fundamentais

## Pressão

$$P = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_n}{\delta A}$$

Considere a situação:

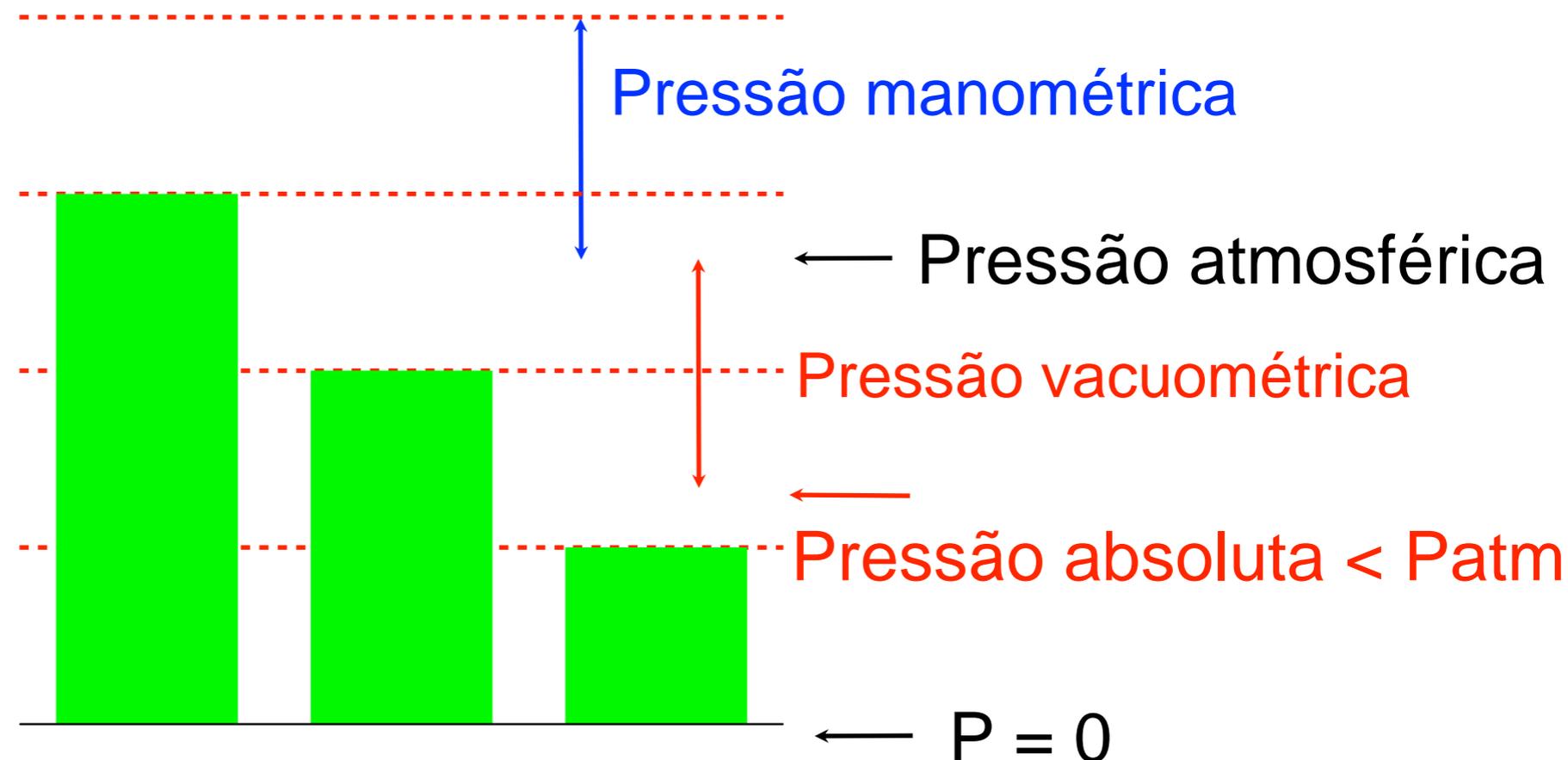


Mesma pressão  
no equilíbrio

Pressão absoluta > Patm



Em Termodinâmica  
trabalhamos com





## Energia

*A energia total ( $E$ ) de um sistema composto por uma substância compressível simples em um dado estado é:*

$$E = U + E_c + E_p$$

interna

cinética

potencial

Determinadas com base no referencial adotado



# Conceitos fundamentais

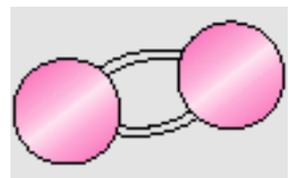
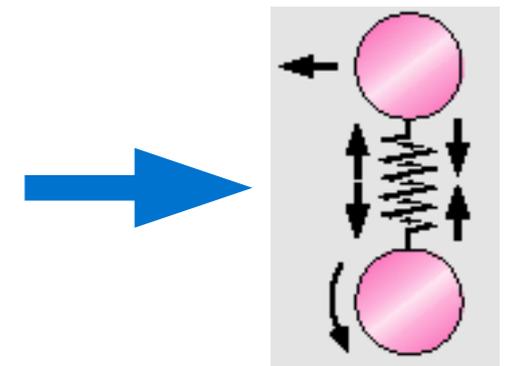
## Energia interna

Ponto de vista molecular:

❖ **Energia cinética molecular** - Movimento das moléculas (parcela “sensível”\*);

❖ **Energia potencial intermolecular** - Forças entre moléculas (parcela “latente”\*);

❖ **Energia potencial intramolecular** - Estrutura molecular e atômica (parcela química e nuclear).



\* Não utilizar os termos!