

---

# EM360 - Termodinâmica I

---

Resumo Teórico

21 de abril de 2021

---

Guilherme Nunes Trofino  
217276

# Conteúdo

---

<b>1</b>	<b>Apresentação</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introdução</b>	<b>4</b>
2.1	Sistema . . . . .	4
2.2	Propriedade . . . . .	4
2.3	Processo . . . . .	4
2.4	Unidades SI . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Definições Básicas</b>	<b>6</b>
3.1	Pressão . . . . .	6
3.2	Volume Específico . . . . .	6
3.3	Temperatura . . . . .	6
3.4	Reservatórios Térmicos . . . . .	6
3.5	Energia Interna . . . . .	6
3.6	Entalpia . . . . .	6
3.7	Energia Total . . . . .	7
3.8	Calor Específico . . . . .	7
3.9	Calor . . . . .	7
3.10	Trabalho . . . . .	7
3.11	Entropia . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Diagramas de Estado</b>	<b>9</b>
4.1	Princípio do Estado . . . . .	10
4.2	Tabelas de Propriedades . . . . .	10
4.3	Título de Mistura . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Modelagem de Comportamentos</b>	<b>11</b>
5.1	Substâncias Incompressíveis . . . . .	11
5.2	Gás Ideal . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Dispositivos Termodinâmicos</b>	<b>12</b>
6.1	Válvulas . . . . .	12
6.2	Trocadores de Calor . . . . .	12
6.3	Redutores e Difusores . . . . .	13
6.4	Turbinas e Compressores . . . . .	13
6.5	Turbinas e Compressores Hidráulicos . . . . .	14
<b>7</b>	<b>1ª Lei da Termodinâmica</b>	<b>15</b>
7.1	Conservação de Massa . . . . .	15
7.2	Conservação de Energia . . . . .	15
7.3	Regime Permanente . . . . .	15
<b>8</b>	<b>2ª Lei da Termodinâmica</b>	<b>16</b>
8.1	Conservação de Entropia . . . . .	16
8.2	Regime Permanente . . . . .	16
<b>9</b>	<b>Ciclos Termodinâmicos</b>	<b>17</b>
9.1	Ciclo de Carnot . . . . .	17
9.2	Ciclos com 1 Reservatório . . . . .	18
9.3	Ciclos de Potência com 2 Reservatórios . . . . .	18
9.4	Ciclos de Aquecimento e Refrigeração com 2 Reservatórios . . . . .	18

<b>10 Processos Isentrópicos</b>	<b>19</b>
10.1 Bocais . . . . .	19
10.2 Turbinas . . . . .	19
10.3 Compressores . . . . .	20

# 1. Apresentação

---

**Arquivo** Este documento, escrito em  $\text{\LaTeX}$ , é um resumo para a disciplina EM360 - Termodinâmica I de autoria de Guilherme Nunes Trofino que poderá ser encontrado no seguinte repositório do GitHub. Não me responsabilizo pela utilização do documento, que pode apresentar erros, e agradeço se problemas forem reportados.

## 2. Introdução

---

### 2.1. Sistema

**Definição** Região, ou objeto, a ser estudado, separado da **Vizinhança** por sua **Fronteira**, onde as variáveis são conhecidas. Estes são classificados de acordo com a mobilidade, ou não, de matéria e ou energia como descrito a seguir:

1. **Fechado:** Não há fluxo de matéria e há fluxo de energia:
  - (a) **Isolado:** Não há fluxo de matéria ou energia com a vizinhança;
2. **Aberto:** Há fluxo de matéria e energia:
  - (a) **Volume de Controle:** Fronteira do sistema;

### 2.2. Propriedade

**Definição** Características macroscópicas do sistema, independentes do **Histórico** de processos. Estas são classificadas de acordo com a dependência, ou não, da extensão da matéria como descrito a seguir:

1. **Extensiva** Dependente do objeto estudado, como:
  - (a) Massa;
  - (b) Volume;
  - (c) Energia;
2. **Intensiva** Independente do objeto estudado, como:
  - (a) Massa Específica;
  - (b) Volume Específico;
  - (c) Temperatura

Qualquer propriedade intensiva poderá ser obtida a partir de sua equivalente extensiva dividido pela massa associada ao sistema ou substância.

### 2.3. Processo

**Definição** Procedimento que altera as **Propriedades**, com duas destas características pode-se determinar o estado da substância, do sistema. Estes são classificados de acordo com seu comportamento ao longo do tempo como descrito a seguir:

1. **Politrópico:** Processo que relaciona pressão e volume pela expressão:  $pV^n = c$ ;
  2. **Adiabático:** Processo que não troca calor com a vizinhança;
  3. **Quasestático:** Processo suficientemente lento considerado em equilíbrio;
  4. **Regime Permanente:** Processo que não altera as propriedades do sistema;
  5. **Ciclo:** Processo que retorna ao estado inicial;
- 
1. **Isentrópico:** Processo que não varia de entropia;
  2. **Isobárico:** Processo que não varia de pressão;
  3. **Isotérmico:** Processo que não varia de temperatura;
  4. **Isovolumétrico:** Processo que não varia de volume;
- 
1. **Irreversível:** Sistema e sua Vizinhança não podem retornar, simultaneamente, a seus estados iniciais;
  2. **Reversível:** Sistema e sua Vizinhança podem retornar, simultaneamente, a seus estados iniciais;
  3. **Reversível Internamente:** Fronteira escolhida de tal forma que não hajam irreversibilidades no sistema;

## 2.4. Unidades SI

**Definição** Utiliza-se unidades do sistema internacional para as descrições de fórmulas. Estas são as unidades utilizadas com suas respectivas representações:

Quantidade	Unidades	Símbolo
Força	$\text{kg m/s}^2$	N
Pressão	$\text{kg/ms}^2$	Pa
Energia	$\text{kg m}^2/\text{s}^2$	J
Potência	$\text{kg m}^2/\text{s}^3$	W

### 3. Definições Básicas

---

#### 3.1. Pressão

**Definição** Força normal exercida por um corpo, ou fluido, sobre uma superfície. Formalmente descrito pela seguinte equação:

$$p = \frac{dF_{\text{normal}}}{dA} \quad \left[ \text{Pa} = \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} \right]$$
$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} \quad 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

#### 3.2. Volume Específico

**Definição** Volume ocupado por unidade de massa, inverso da densidade. Formalmente descrito pela seguinte equação:

$$\nu = \rho^{-1} = \frac{dv}{dm} \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

#### 3.3. Temperatura

**Definição** Quantidade calor associada um corpo ou fluido. Corpos com diferentes temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  tendem, quando em contato, a estabilizar em valor intermediário, nomeado como **Equilíbrio Térmico**.

**Escala** Há diferentes convenções térmicas normalizadas em três pontos comuns: **Ebulição da Água**, **Fusão da Água** e **Zero Absoluto**.

$$T[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15$$

$$T[^\circ\text{F}] = 1,8T[^\circ\text{C}] + 32$$

#### 3.4. Reservatórios Térmicos

**Definição** Corpos suficientemente extensos em que pequenas alterações, com relação ao todo, em suas **Propriedades**, podem ser desprezadas. Estes corpos apresentam apenas irreversibilidades internas.

#### 3.5. Energia Interna

**Definição** Toda energia não cinética e não potencial, normalmente composta por energia térmica, química, nuclear e radiante. Formalmente descrita pela seguinte equação:

$$U = u \cdot m \quad \left[ \text{J} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

#### 3.6. Entalpia

**Definição** Representa a quantidade de energia transferida durante um processo em virtude de trabalho. Formalmente descrita pela seguinte equação:

$$H = \Delta U + p\Delta V \quad \left[ \text{J} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

### 3.7. Energia Total

**Definição** Somatório de todas as energias de uma substância, ou sistema, descrita em sua forma intensiva ou extensiva. Formalmente descrita pela equação:

$$E = mu + \frac{mV^2}{2} + mgz \quad \left[ J = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

### 3.8. Calor Específico

**Definição** Capacidade de uma substância receber, ou ceder, calor para outra. Formalmente descrito, a **Volume** constante e a **Pressão** constante respectivamente, pelas seguintes equações:

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right] \quad c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

**Constante Adiabática** Razão entre o **Calor Específico** a pressão constante e a volume constante como a constante adiabática para que diferentes substâncias possam ser diretamente comparadas como:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{quando } k = 1.4, \text{ trata-se de } \mathbf{Gás Ideal};$$

### 3.9. Calor

**Definição** Quantificação do grau de mobilidade, conseqüentemente troca energia, dos átomos pertencentes a uma substância. Formalmente descrita pela seguinte equação:

$$Q = mc\Delta T \quad \left[ J = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

Normalmente gases esfriam quando expandem e esquentam quando comprimem. Além disso, calor pode se propagar por 3 mecanismos distintos a depender da interação com o ambiente:

1. Condução;
2. Convecção;
3. Radiação;

**Convenção** Define-se que o sistema, independente de seu desempenho, deverá receber calor:

1.  $Q > 0$ : Sistema recebe calor da vizinhança;
2.  $Q < 0$ : Sistema fornece calor à vizinhança;

### 3.10. Trabalho

**Definição** Transferência de energia entre o sistema e sua vizinha, pela expansão ou contração do fluido, causada sobre a forma de energia cinética, potencial e ou interna. Formalmente descrito pelas seguintes equações, respectivamente para **Sistema Fechado** e **Volume de Controle**:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad \left[ J = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \int_{p_1}^{p_2} v dp \quad \left[ \frac{J}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

Onde:

1. Se  $p_1 > p_2$  ocorre expansão e, portanto,  $W$  será positivo;
2. Se  $p_1 < p_2$  ocorre compressão e, portanto,  $W$  será negativo;

**Convenção** Define-se que o sistema, independente de seu desempenho, deverá realizar trabalho:

1.  $W > 0$ : Sistema realiza trabalho sobre a vizinhança;
2.  $W < 0$ : Vizinhança realiza trabalho sobre o sistema;



**Processo Politrópico** Sistemas que podem ser modelados de acordo com a relação entre pressão e volume,  $pV^n = c$  ou  $pv^n = c$ , obtido experimentalmente. Formalmente descrito pelas seguintes equações, respectivamente para **Sistema Fechado** e **Volume de Controle**:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{c}{V^n} dV = \begin{cases} n \neq 1, & \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n} \\ n = 1, & p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \end{cases} \quad \dot{W} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{c^{1/n}}{p^{1/n}} dp = \begin{cases} n \neq 1, & \frac{n(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{1-n} \\ n = 1, & -p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \end{cases}$$

### 3.11. Entropia

**Definição** Representa a desorganização do sistema, relacionando as influências dos processos no estado do sistema avaliado. Formalmente definida pela seguinte relação:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\partial Q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{K s}^2} \right]$$

Onde  $\partial Q$  representa do sistema trocado com sua vizinhança em sua fronteira e  $T$  representa a temperatura absoluta do sistema.

**Modelo Tds** Assumindo substância pura e compressível, percorrendo um processo internamente reversível com efeitos da gravidade e movimento desprezíveis. Assim o balanço de energia, obtido pela 1ª Lei, será descrito pela seguinte equação:

$$Tds = dU + pdV \quad Tds = dH - Vdp$$

**Modelo Gás Ideal** Somado as considerações para o modelo Tds, considera-se, também, que a substância se comporta como gás ideal. Desta maneira a entropia será descrita pelas seguintes equações:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v(T)}{T} dT + R \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p(T)}{T} dT + R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

As tabelas termodinâmicas A22 e A23 fornecem valores calculados para a integral do calor específico a pressão constante, denotada como  $s^o$ . Desta maneira a entropia será descrita pela seguinte equação:

$$s^o(T_a) = \int_0^{T_a} \frac{c_p(T)}{T} dT$$

$$s_2 - s_1 = s^o(T_2) - s^o(T_1) - R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

Caso os calores específicos sejam constantes, independentes da temperatura da substância, a integral será trivial. Desta maneira a entropia será descrita pelas seguintes equações:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \quad s_2 - s_1 = c_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

**Modelo Incompressível** Assumindo substância incompressível com volume constante, percorrendo um processo internamente reversível com efeitos da gravidade e movimento desprezíveis. Desta maneira a entropia será descrita pela seguinte equação:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v(T)}{T} dT$$

Caso o calor específico a volume constante seja constante a integral será trivial. Desta maneira a entropia será descrita pelas seguint equação:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$$

## 4. Diagramas de Estado

**Definição** Representam como uma substância modifica seu estado de acordo com suas condições. Quando houver mistura entre os diferentes estados a seguinte notação será utilizada:

1. **Líquido:** Apresentado com o subscrito  $f$  quando em mistura;
2. **Vapor:** Apresentado com o subscrito  $g$  quando em mistura;
3. **Mistura Líquido-Vapor:** Apresentado como  $L+V$ ;

**Considerações** Aproximações de comportamento e variáveis do sistema podem ser tomando em certos cenários, descritos a seguir:

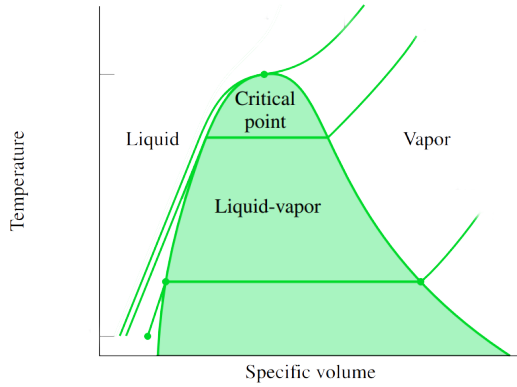
1. **Processo Quasestático:** Expansão, ou compressão, que ocorrer lentamente no interior de um conjunto cilindro pistão poderá desconsiderar a pressão causada pelo pistão;
2. **Líquido Comprimido:** Líquidos sobre pressões inferiores a 25 bar, fora da condição de compressão, poderá ter suas propriedades aproximadas pelos valores do líquido saturado;

$$v(T, p) = v_f(T)$$

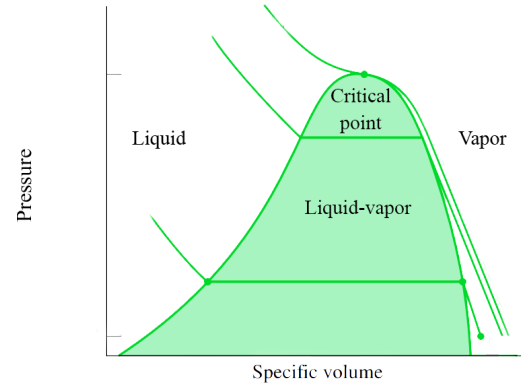
$$u(T, p) = u_f(T)$$

$$h(T, p) = h_f(T)$$

$$s(T, p) = s_f(T)$$

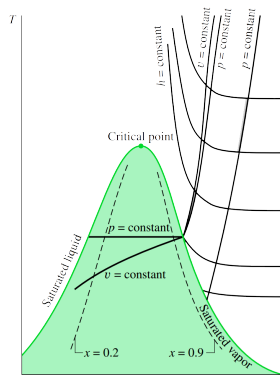


(a) Diagrama Temperatura Entropia

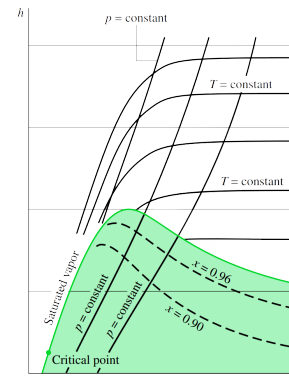


(b) Diagrama Entalpia Entropia

Figura 1: Diagramas de Estado para Volume Específico



(a) Diagrama Temperatura Entropia



(b) Diagrama Entalpia Entropia

Figura 2: Diagramas de Estado para Entropia

#### 4.1. Princípio do Estado

**Definição** De acordo com a 1ª Lei, há duas formas de alterar a energia de fluido compressível em um sistema fechado, através do calor ou através do trabalho. Caso duas propriedades intensivas quaisquer sejam fixadas não haverá processo e assim não haverá mudança de estado.

#### 4.2. Tabelas de Propriedades

**Definição** Certos fluidos possuem suas características físicas registradas a diferentes combinações de variáveis, como temperatura e pressão. Essas tabelas permitem, com a entrada de uma variável, encontrar as demais características da substância avaliada.

**Tabelas** Desenvolvidas a partir das linhas de líquido saturado e vapor saturado, denotando as características a cada estado. Entre as principais tabelas para água temos:

1. **Tabela A2:** Entrada com Temperatura;
2. **Tabela A3:** Entrada com Pressão;
3. **Tabela A4:** Entrada com Pressão e Temperatura para Vapor Superaquecido;
4. **Tabela A5:** Entrada com Pressão e Temperatura para Líquido Comprimido;

#### 4.3. Título de Mistura

**Definição** Fração da propriedade avaliada na Mistura Líquido-Vapor, essencial para caracterizar o estado de tal composição. Formalmente descrita pela seguinte equação:

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

Com as propriedades específicas de uma Mistura L-V pode-se desenvolver importantes relações entre o título e a propriedade específica analisada.

$$x = \frac{X}{m} = \frac{X_g + X_f}{m_g + m_f} = \frac{X_g}{m_f + m_g} + \frac{X_f}{m_f + m_g} = \underbrace{\left(\frac{X_g}{m_g}\right)}_{= x_g} \frac{m_g}{m_f + m_g} + \underbrace{\left(\frac{X_f}{m_f}\right)}_{= x_f} \frac{m_f}{m_f + m_g}$$

$$v = x \cdot x_g + (1 - x)x_f$$

Caso seja necessário obter o título com base nas propriedades físicas analisadas basta rearranjar algebricamente a última equação para obter o que segue.

$$x = \frac{v - x_f}{x_g - x_f}$$

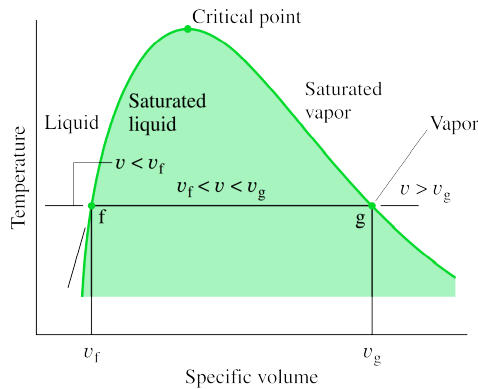


Figura 3: Diagrama Temperatura Volume

## 5. Modelagem de Comportamentos

---

**Definição** Diferentes modelos matemáticos podem ser aplicados aos sistemas termodinâmicos, permitindo solucionar problemas para substâncias e valores não tabelados.

### 5.1. Substâncias Incompressíveis

**Definição** Substâncias com volume específico próximo a constante e líquidos comprimidos próximos a saturação, sem mudar de fase, não alteram suas propriedades ao longo do processo. Dessa maneira pode-se utilizar as aproximações:

$$\boxed{c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \approx \frac{du}{dT}} \quad \boxed{c = c_v = c_p} \quad \boxed{c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \approx \frac{dh}{dT}}$$

Assim, obtém-se a equação abaixo que poderá ser aproximada caso o calor específico seja constante. Caso o atrito seja desprezível, pode-se desconsiderar qualquer aquecimento da substância.

$$\boxed{u_2 - u_1 \approx c(T_2 - T_1)} \quad \boxed{h_2 - h_1 \approx c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)}$$

### 5.2. Gás Ideal

**Definição** Gases possuem **Fator de Compressibilidade**, determinado experimentalmente, permitindo prever seu comportamento. Formalmente definido pela seguinte relação:

$$\boxed{Z = \frac{pv}{RT}}$$

Todo gás se comportará como ideal a medida que a pressão ao qual está submetido se aproximar de zero. Na hipótese de gás ideal,  $Z = 1$ , teremos a seguinte relação para tais substâncias:

$$\boxed{pv = RT}$$

Onde:

1. **Pressão:**  $p$  em [Pa];
2. **Volume Específico:**  $v$  em [m<sup>3</sup>/kg];
3. **Temperatura:**  $T$  em [K];
4. **Volume:**  $V$  em [m<sup>3</sup>];

Neste caso, diferentemente da aplicação química, será necessário calcular a constante específica do gás desejado. Formalmente descrito pelas seguintes equações:

$$\boxed{R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}} \quad \boxed{R_{\text{gás}} = \frac{R}{M_{\text{gás}}}} \quad \boxed{R_{\text{ar}} = 287,053 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}$$

Onde:

1. **Constante Universal dos Gases:**  $\bar{R}$  em [J/mol K];
2. **Constante do Gás:**  $R$  em [J/kg K];
3. **Massa Molar:**  $M$  em [kg/mol];

**Calor Específico** Nessa hipótese as equações relacionadas ao calor específico, a pressão e a volume constante podem ser reescritas e associadas como segue:

$$\boxed{c_p(T) = c_v(T) + R}$$

Aplicando a razão entre o calor específico a volume constante e a pressão constante, respectivamente, temos:

$$\boxed{c_v(T) = \frac{R}{k-1}} \quad \boxed{c_p(T) = \frac{kR}{k-1}}$$
$$\boxed{u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)} \quad \boxed{h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)}$$

## 6. Dispositivos Termodinâmicos

### 6.1. Válvulas

**Definição** Dispositivos responsáveis por controlar o fluxo de fluido, através de válvulas manuais ou substâncias porosas, reduzindo a pressão e expandindo o volume.

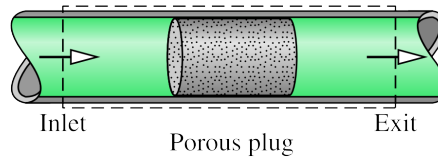


Figura 4: Válvulas

$$h_{\text{in}} = h_{\text{out}}$$

Onde:

1. **Regime Permanente:** Desconsidera-se variações em sua energia;
2. **Adiabático:** Desconsidera-se trocas calor com o ambiente;
3. **Estático:** Desconsidera-se realização ou recebimento de trabalho;
4. **Energia:** Desconsidera-se variações pelas energias cinéticas e potenciais;

### 6.2. Trocadores de Calor

**Definição** Dispositivos responsáveis pela transferência de calor entre dois líquidos, ou substâncias, reduzindo assim a temperatura do primeiro.

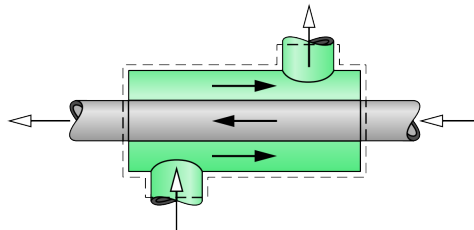


Figura 5: Trocadores de Calor a Contracorrente

$$\sum \dot{m}_{\text{in}} h_{\text{in}} = \sum \dot{m}_{\text{out}} h_{\text{out}}$$

Onde:

1. **Regime Permanente:** Desconsidera-se variações em sua energia;
2. **Adiabático:** Desconsidera-se trocas calor com o ambiente;
3. **Estático:** Desconsidera-se realização ou recebimento de trabalho;
4. **Energia:** Desconsidera-se variações pelas energias cinéticas e potenciais;

### 6.3. Redutores e Difusores

**Definição** Dispositivos responsáveis, respectivamente, por incrementar a velocidade do fluido, reduzindo sua pressão ou por decrementar a velocidade do fluido, aumentando sua pressão.



Figura 6: Bocais

$$h_{\text{in}} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2} = h_{\text{out}} + \frac{V_{\text{out}}^2}{2}$$

Onde:

1. **Regime Permanente:** Desconsidera-se variações em sua energia;
2. **Adiabático:** Desconsidera-se trocas calor com o ambiente;
3. **Estático:** Desconsidera-se realização ou recebimento de trabalho;
4. **Energia:** Desconsidera-se variações pela energia potencial;

### 6.4. Turbinas e Compressores

**Definição** Dispositivos responsáveis, respectivamente, por gerar trabalho, reduzindo sua pressão ou por consumir trabalho, aumentando sua pressão. Geralmente operando com substâncias gasosas.



Figura 7: Turbinas e Compressores

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \left( h_{\text{in}} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2} \right) - \left( h_{\text{out}} + \frac{V_{\text{out}}^2}{2} \right)$$

Onde:

1. **Regime Permanente:** Desconsidera-se variações em sua energia;
2. **Energia:** Desconsidera-se variações pela energia potencial;

## 6.5. Turbinas e Compressores Hidráulicos

**Definição** Dispositivos responsáveis, respectivamente, por gerar trabalho, reduzindo sua pressão ou por consumir trabalho, aumentando sua pressão. Geralmente operando com substâncias líquidas, particularmente a água.

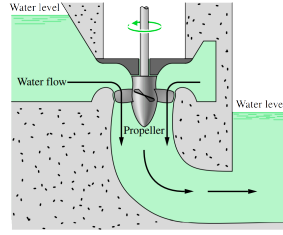


Figura 8: Turbina

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \left( h_{\text{in}} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2} + gz_{\text{in}} \right) - \left( h_{\text{out}} + \frac{V_{\text{out}}^2}{2} + gz_{\text{out}} \right)$$

Onde:

1. **Regime Permanente:** Desconsidera-se variações em sua energia;

## 7. 1ª Lei da Termodinâmica

---

**Definição** Qualquer alteração na energia contida no interior dum sistema ao longo do tempo virá de trocas de calor e de trabalho entre o sistema e o ambiente, respeitando a conservação energética.

**Convenção** Define-se que o sistema, independente de seu desempenho, deverá receber calor e realizar trabalho:

1.  $Q > 0$ : Sistema recebe calor da vizinhança;
2.  $Q < 0$ : Sistema fornece calor à vizinhança;
1.  $W > 0$ : Sistema fornece trabalho à vizinhança;
2.  $W < 0$ : Sistema recebe trabalho da vizinhança;

### 7.1. Conservação de Massa

**Definição** Dentro do volume de controle a variação de massa no sistema será dada pelo balanço entre a entrada e saída do sistema. Formalmente descrita pela seguinte relação:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}} - \sum_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Onde:

1. **Vazão Mássica:**  $\dot{m}$  em [kg/s];

$$\dot{m} = \frac{AV}{v}$$

2. **Volume Específico:**  $v$  em [m<sup>3</sup>/kg];
3. **Velocidade:**  $V$  em [m/s];
4. **Área:**  $A$  em [m<sup>2</sup>];

### 7.2. Conservação de Energia

**Definição** Dentro do volume de controle a variação de energia no sistema será dada pelo balanço entre trocas de calor, trabalho e entalpia entre o sistema e o ambiente. Formalmente descrita pela seguinte relação:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}} \left( h_{\text{in}} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2} + gz_{\text{in}} \right) - \sum_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}} \left( h_{\text{out}} + \frac{V_{\text{out}}^2}{2} + gz_{\text{out}} \right) \quad \left[ \text{W} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} \right]$$

Onde:

1. **Energia:**  $E$  em [J/s];
2. **Calor:**  $\dot{Q}$  em [J/s];
3. **Trabalho:**  $\dot{W}$  em [J/s];
4. **Vazão Mássica:**  $\dot{m}$  em [kg/s];
5. **Entalpia:**  $h$  em [J/kg];
6. **Velocidade:**  $V$  em [m/s];
7. **Altura:**  $z$  em [m];

### 7.3. Regime Permanente

**Definição** Estado estacionário do sistema, suas propriedades permanecem constantes no tempo. Formalmente descrito pelas seguintes equações:

$$0 = \sum_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}} - \sum_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}}$$

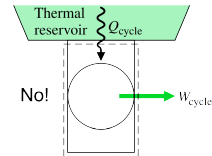
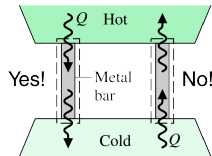
$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}} \left( h_{\text{in}} + \frac{V_{\text{in}}^2}{2} + gz_{\text{in}} \right) - \sum_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}} \left( h_{\text{out}} + \frac{V_{\text{out}}^2}{2} + gz_{\text{out}} \right)$$



## 8. 2ª Lei da Termodinâmica

**Definição** Qualquer processo terá sua viabilidade, ou impossibilidade, limitada pelos seguintes enunciados:

1. **Clausius:** It is impossible for any system to operate in such a way that the sole result would be an energy transfer by heat from a cooler to a hotter body.
2. **Kelvin–Planck:** It is impossible for any system to operate in a thermodynamic cycle and deliver a net amount of energy by work to its surroundings while receiving energy by heat transfer from a single thermal reservoir.



Obedecendo:

1. **Corolário de Carnot:** A eficiência térmica de um ciclo de potência irreversível sempre será inferior à de um ciclo de potência reversível entre os mesmos reservatórios.
2. **Corolário de Carnot:** Todos os ciclos de potência reversíveis operando entre os mesmos reservatórios térmicos possuem a mesma eficiência térmica.

### 8.1. Conservação de Entropia

**Definição** Dentro do volume de controle, definido para minizar as irreversibilidades internas do sistema, a variação de entropia no sistema será dada pelo balanço entre trocas de calor com a vizinhança, fluxo de entropia e as irreversibilidades do sistema. Formalmente descrita pela seguinte relação:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{in} \dot{m}_{in}s_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out}s_{out} + \dot{\sigma}$$

Onde:

1. **Entropia:**  $S$  em [J/K];
2. **Calor:**  $Q$  em [J];
3. **Temperatura:**  $T$  em [K];
4. **Vazão Mássica:**  $\dot{m}$  em [kg/s];
5. **Entropia Específica:**  $s$  em [J/ kg K];
6. **Entropia Produzida:**  $\sigma$  em [J/K];
  - (a)  $\sigma = 0$ : Processo internamente reversível;
  - (b)  $\sigma > 0$ : Processo com irreversibilidades internas;
  - (c)  $\sigma < 0$ : Processo impossível;

**Desigualdade de Clausius** Todo sistema deverá aumentar sua entropia ao final dum processo. Formalmente descrito pela seguinte relação:

$$\int_{\text{ciclo}} \left( \frac{dQ}{T} \right) \leq -\sigma$$

### 8.2. Regime Permanente

**Definição** Estado estacionário do sistema, suas propriedades permanecem constantes no tempo. Formalmente descrito pela seguinte equação:

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{in} \dot{m}_{in}s_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out}s_{out} + \dot{\sigma}$$

## 9. Ciclos Termodinâmicos

### 9.1. Ciclo de Carnot

**Definição** Processo cíclico ocorrendo no interior de um conjunto cilindro pistão em contato com um reservatório térmico, percorrendo as seguintes etapas:

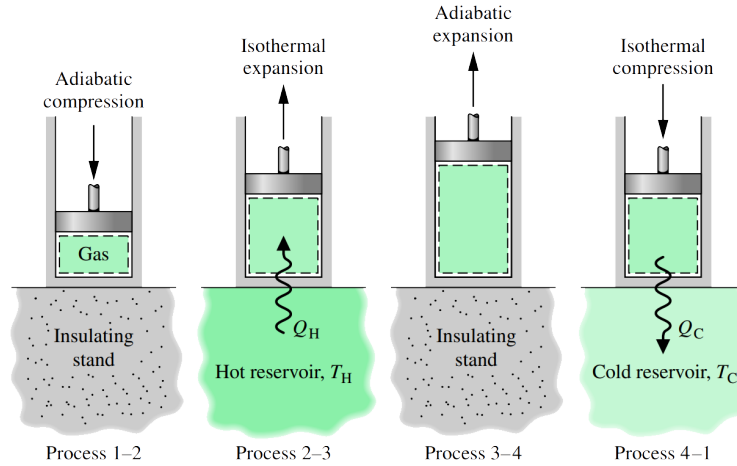


Figura 10: Conjunto Ciclo de Carnot

**Propriedades** Cada etapa apresentará suas particulares, descritas a seguir:

1. **Compressão Adiabática:** Equilíbrio térmico do conjunto;
2. **Expansão Isotérmica:** Recebimento de calor do reservatório;
3. **Expansão Adiabática:** Equilíbrio térmico do conjunto;
4. **Compressão Isotérmica:** Rejeitando calor ao reservatório;

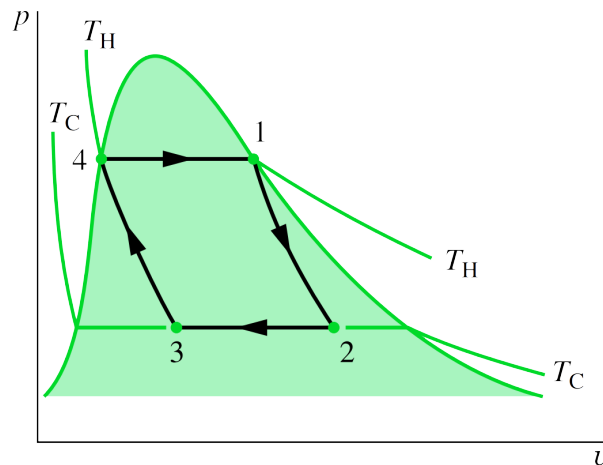


Figura 11: Gráfico Ciclo de Carnot

Assim, considerando o gás como perfeito no interior do conjunto cilindro pistão, pela 1ª da Termodinâmica têm-se:

$$Q = mRT \ln \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$$

$$Q = mRT \ln \frac{p_{\text{in}}}{p_{\text{out}}}$$

### 9.2. Ciclos com 1 Reservatório

**Definição** Segundo **Kelvin-Planck**, será impossível, para qualquer sistema, operar em um ciclo termodinâmico capaz de entregar trabalho líquido à sua vizinhança enquanto recebe calor de um único reservatório térmico.

$$W_{\text{ciclo}} \leq 0$$

### 9.3. Ciclos de Potência com 2 Reservatórios

**Definição** Segundo **Kelvin-Planck**, um sistema em ciclo de potência com 2 reservatórios, com  $Q_C \neq 0$ , terá sua eficiência dada por:

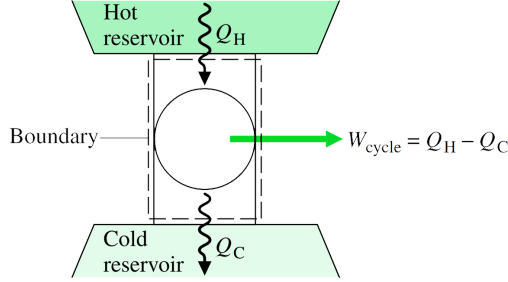


Figura 12: Ciclo de Potência

$$\eta = \frac{|W_{\text{ciclo}}|}{|Q_H|} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \quad \eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}}$$

### 9.4. Ciclos de Aquecimento e Refrigeração com 2 Reservatórios

**Definição** Segundo **Clausius**, o  $W_{\text{ciclo}} \neq 0$  pois trata-se processos não espontâneos, em que a eficiência para refrigeração e aquecimento são dadas respectivamente por:

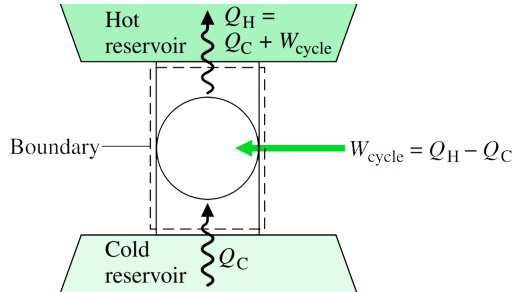


Figura 13: Ciclo de Aquecimento e Resfriamento

$$\beta = \frac{|Q_C|}{|W_{\text{ciclo}}|} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_C} - 1} \quad \gamma = \frac{|Q_H|}{|W_{\text{ciclo}}|} = \frac{1}{1 - \frac{Q_C}{Q_H}}$$

$$\beta_{\text{max}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad \gamma_{\text{max}} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

## 10. Processos Isentrópicos

**Definição** Aquele em que não há variação de entropia dentro do volume de controle em regime permanente. Desta maneira, sua eficiência será limitada pela geração de entropia durante o processo:

1. **Compressor:** Nunca poderá consumir **Menos** potência que seu equivalente ideal;
2. **Turbina:** Nunca poderá gerar **Mais** potência que seu equivalente ideal;

Um processo será **Isentrópico** se, e somente se, este ocorrer adiabaticamente e reversivelmente.

### 10.1. Bocais

**Definição** Sistemas adiabáticos que convertem pressão em energia cinética sem realização de trabalho, desconsiderando efeitos de energia potencial. Formalmente descrito pelas seguintes equações:

$$\text{1ª Lei: } h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} = h_{2s} + \frac{V_{2s}^2}{2} \quad \text{2ª Lei: } \frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}} = s_2 - s_1$$

Desta maneira a eficiência será dada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{V_2^2}{V_{2s}^2}$$

### 10.2. Turbinas

**Definição** Sistemas adiabáticos que convertem pressão em trabalho, desconsiderando efeitos de energias cinéticas e potenciais. Formalmente descrito pelas seguintes equações:

$$\text{1ª Lei: } \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad \text{2ª Lei: } \frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}} = s_2 - s_1$$

Desta maneira a eficiência será dada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\dot{W}/\dot{m}}{(\dot{W}/\dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

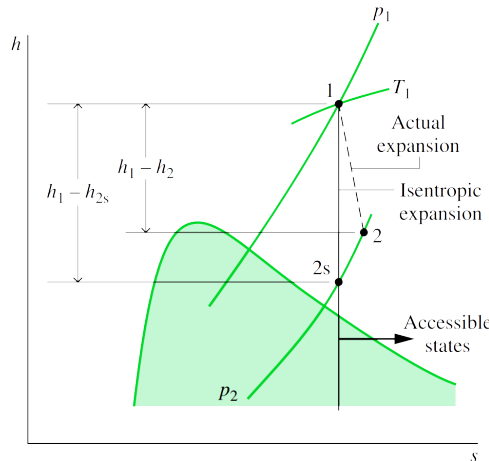


Figura 14: Diagrama  $h \times s$  Turbina

### 10.3. Compressores

**Definição** Sistemas adiabáticos que convertem trabalho em pressão, desconsiderando efeitos de energias cinéticas e potenciais. Formalmente descrito pelas seguintes equações:

$$\mathbf{1^a\ Lei:} \quad \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \qquad \mathbf{2^a\ Lei:} \quad \frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}} = s_2 - s_1$$

Desta maneira a eficiência será dada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{(\dot{W}/\dot{m})_s}{\dot{W}/\dot{m}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

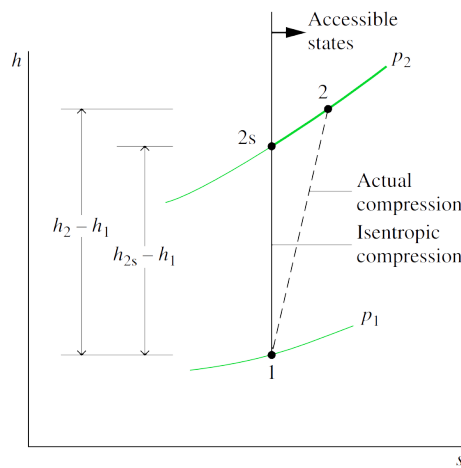


Figura 15: Diagrama  $h \times s$  Compressor