

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

### PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

#### Substância Pura

É aquela que tem composição química invariável e homogênea.

Pode existir em mais de uma fase.

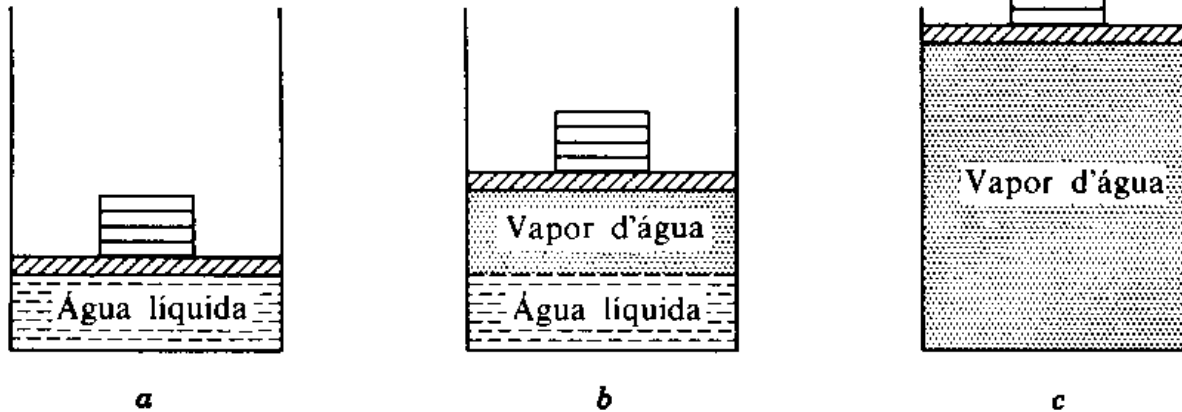
Água líquida + vapor ou água líquida + gelo.

Ar líquido + ar gasoso não é uma substância pura (composições diferentes).

Como uma mistura gasosa pode exibir, desde que não haja mudança de fase, algumas características de uma substância pura ela é considerada como tal.

# MÁQUINAS TÉRMICAS

## Equilíbrio de Fases de uma Substância Pura



a.  $P = 0,1 \text{ MPa}$  e  $T = 15 \text{ °C}$  — calor  $\rightarrow P = \text{cte}; T = \uparrow$ ;  $\text{vol.espec.} = \uparrow$

b.  $P = 0,1 \text{ MPa}$  e  $T = 99,6 \text{ °C}$  — calor  $\rightarrow$  mudança de fase:  $P = \text{cte}; T = \text{cte}$ ;  $\text{vol.espec.} = \uparrow$

c.  $P = 0,1 \text{ MPa}$  e vapor — calor  $\rightarrow P = \text{cte}; T \uparrow > 99,6 \text{ °C}$ ;  $\text{vol.espec.} = \uparrow$

$T = 99,6 \text{ °C}$  — Temperatura de saturação a  $P = 0,1 \text{ MPa}$ .

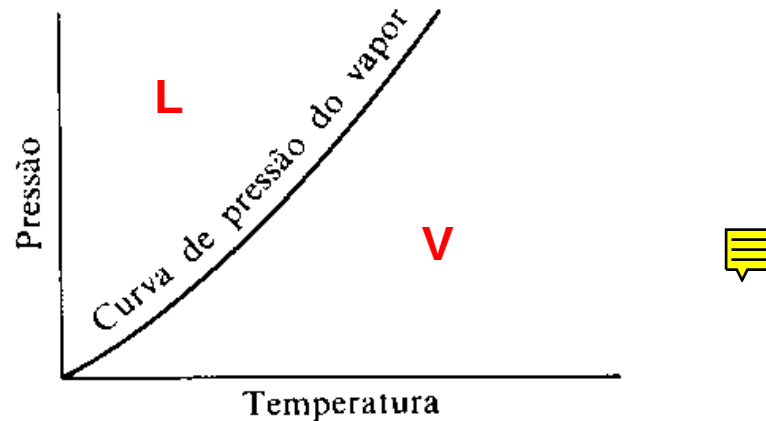
$P = 0,1 \text{ MPa}$  — Pressão de saturação a  $T = 99,6 \text{ °C}$ .



Substância pura tem uma relação definida entre pressão de saturação e temperatura de saturação.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

### Curva de Pressão de Vapor de uma Substância Pura



Líquido saturado - líquido a temperatura e pressão de saturação.

Líquido sub-resfriado - temperatura do líquido mais baixa que a temperatura de saturação.

Líquido comprimido – pressão maior que a pressão de saturação.

Vapor saturado - vapor a temperatura e pressão de saturação.

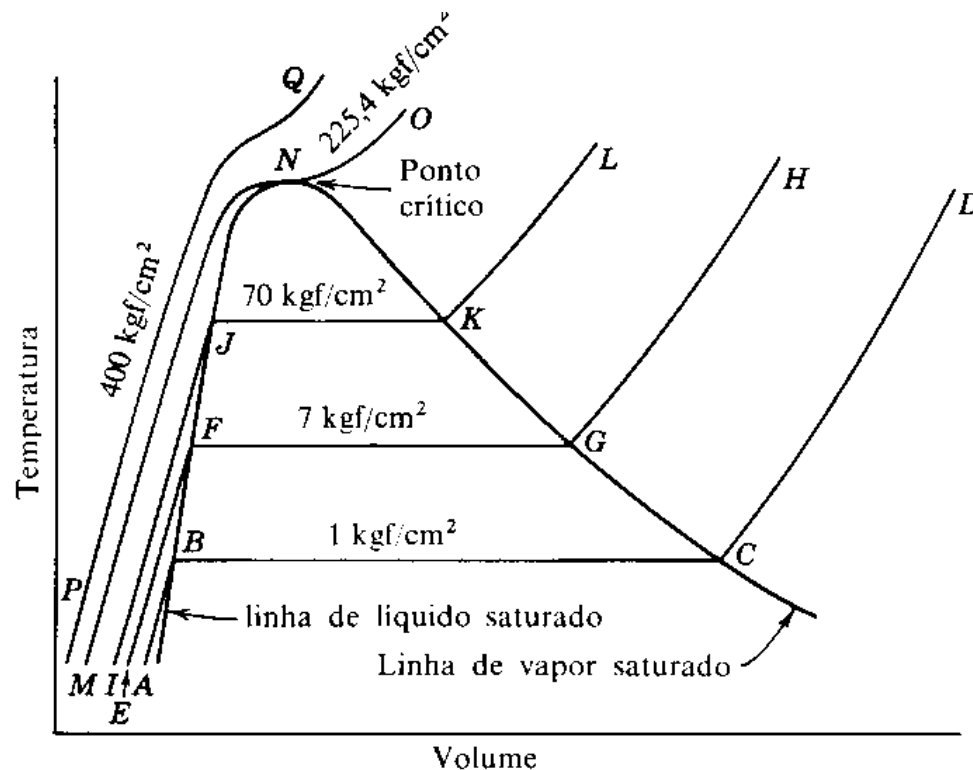
Vapor superaquecido - temperatura do vapor mais alta que a temperatura de saturação.

Saturação: Mistura =  $x\%$  (m) de vapor +  $(1-x)\%$  (m) água –  $x$  = título (steam quality).

Vapor superaquecido - temperatura e pressão são independentes.

Gases são vapores altamente superaquecidos.

# MÁQUINAS TÉRMICAS



Pressão constante = 0,1 MPa

A – estado inicial (15 °C).

B – líquido saturado (100 °C).

AB – Processo de aquecimento até saturação.

C – Vapor saturado.

BC – Processo de mudança de fase ( $T = \text{cte}$ ).

CD – Processo de superaquecimento do vapor.

Pressão constante = 0,7 MPa

E – estado inicial (15 °C); volume pouco menor.

F – líquido saturado (164,2 °C).

EF – Processo de aquecimento até saturação.

G – Vapor saturado.

FG – Energia ( $F \rightarrow G$ ) < ( $B \rightarrow C$ )

GH – Processo de superaquecimento do vapor.

# MÁQUINAS TÉRMICAS



Pressão constante =  $70 \text{ kgf/cm}^2$

Linha IJKL – Temp. saturação =  $284,5 \text{ }^\circ\text{C}$

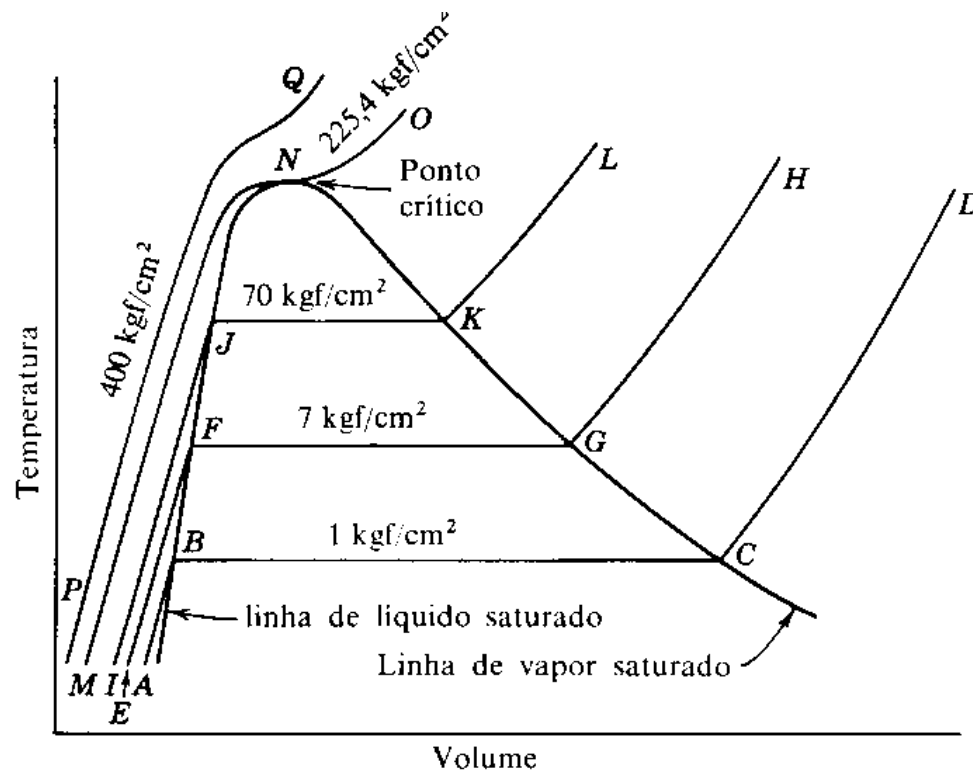
Pressão constante =  $225,4 \text{ kgf/cm}^2$

A linha MNO não é de evaporação a temperatura constante, mas o ponto N é um ponto de inflexão com inclinação nula.

N – Ponto crítico; os estados de líquido saturado e vapor saturado são idênticos.

$$P_{\text{crítico}} = 225,4 \text{ kgf/cm}^2 ; T_{\text{crítico}} = 374 \text{ }^\circ\text{C}$$

Um processo a pressão constante maior que a pressão crítica é representado pela linha PQ. Nunca haverá duas fases presentes: quando teremos líquido e quando teremos vapor?



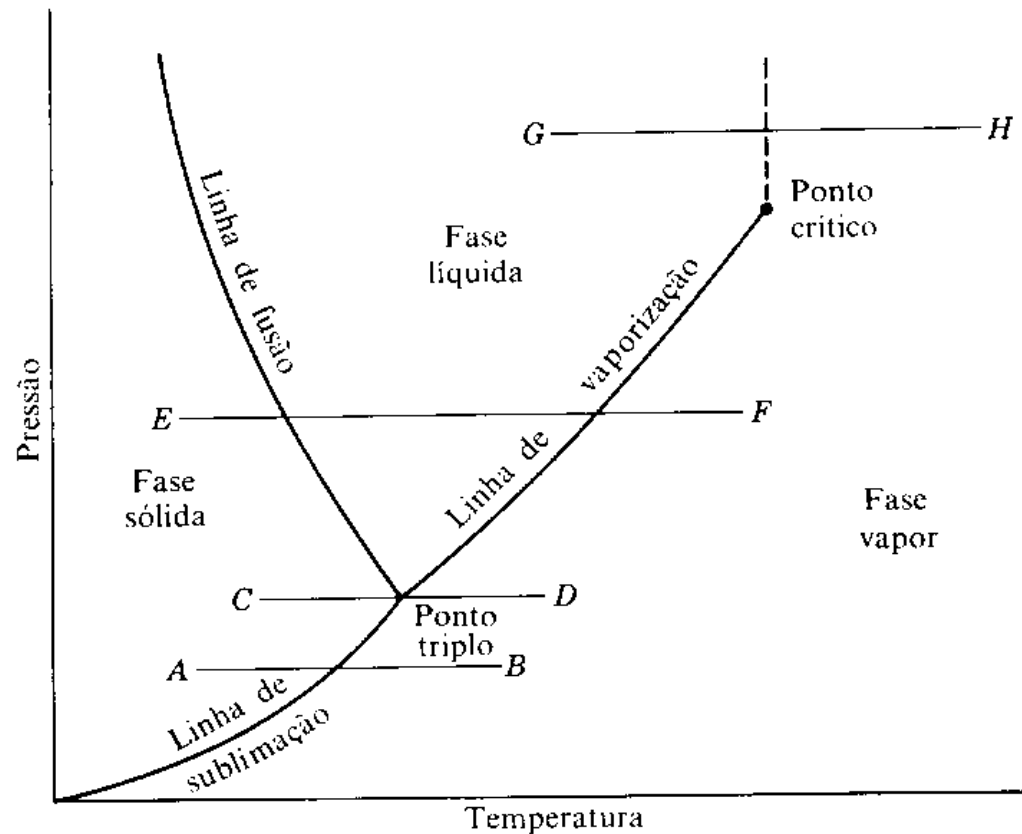
### Alguns dados no ponto crítico

	Temperatura crítica, °C	Pressão crítica, MPa	Volume crítico, m <sup>3</sup> /kg
Água	374,14	22,09	0,003155
Dióxido de carbono	31,05	7,39	0,002143
Oxigênio	-118,35	5,08	0,002438
Hidrogênio	-239,85	1,30	0,032192



## Equilíbrio sólido – líquido – vapor

### Ponto Triplo da Água.



## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

Consideremos uma experiência com o conjunto êmbolo-cilindro. Suponhamos que o cilindro contenha 1 kg de gelo à  $-20^{\circ}\text{C}$  e 100 kPa.

Quando calor é transferido ao gelo, a pressão permanece constante, o volume específico aumenta ligeiramente e a temperatura cresce até atingir  $0^{\circ}\text{C}$ , ponto no qual o gelo funde enquanto a temperatura permanece constante. Linha EF.

Nesse estado o gelo é denominado sólido saturado.

O volume específico da maioria das substâncias cresce durante o processo de fusão mas a água é uma exceção. O volume específico da água líquida é menor do que o volume específico da água sólida.

Quando todo o gelo tiver fundido, qualquer transferência de calor adicional provoca um aumento na temperatura do líquido.

Se a pressão inicial do gelo a  $-20^{\circ}\text{C}$  for 0,260 kPa, uma transferência de calor ao gelo resulta primeiramente num aumento da temperatura até  $-10^{\circ}\text{C}$ . Neste ponto, entretanto, o gelo passa diretamente da fase sólida para a de vapor, num processo conhecido como sublimação. Qualquer transferência de calor adicional implica no superaquecimento do vapor. Linha AB.



## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

Consideremos que a pressão e a temperatura iniciais do gelo sejam iguais a 0,6113 kPa e  $-20^{\circ}\text{C}$ . Linha CD.

Como resultado da transferência de calor, a temperatura cresce até  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Entretanto, ao atingir esse ponto (denominado ponto triplo), qualquer transferência adicional de calor poderá resultar numa parte do gelo passando a líquido e outra passando a vapor (neste ponto é possível a existência das três fases em equilíbrio).

O ponto triplo é definido como o estado no qual as três fases podem coexistir em equilíbrio.

A pressão e a temperatura do ponto triplo, para algumas substâncias puras, estão apresentadas na Tabela a seguir. [Slide 10](#)

Ao longo da linha de sublimação, as fases sólida e vapor estão em equilíbrio, ao longo da linha de fusão as fases sólida e líquida estão em equilíbrio e ao longo da linha de vaporização estão em equilíbrio as fases líquida e vapor. O único ponto no qual todas as três fases podem existir em equilíbrio é o ponto triplo. A linha de vaporização termina no ponto crítico porque não existe uma distinção clara entre as fases líquida e vapor acima deste ponto.

Na linha GH, não existe distinção entre as fases líquida e vapor.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

### Alguns dados no ponto triplo

	Temperatura, °C	Pressão, kPa
Hidrogênio (normal)	-259	7,194
Oxigênio	-219	0,15
Nitrogênio	-210	12,53
Mercúrio	-39	0,000 000 13
Água	0,01	0,611 3
Zinco	419	5,066
Prata	961	0,01
Cobre	1083	0,000 079

A temperatura absoluta do hidrogênio, nas condições ambientes, é da ordem de 20 vezes maior do que sua temperatura crítica.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

A temperatura crítica da água é  $374,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $647,29\text{ K}$ ).

Assim, na condição ambiente, a temperatura da água é menor do que a metade da temperatura crítica.

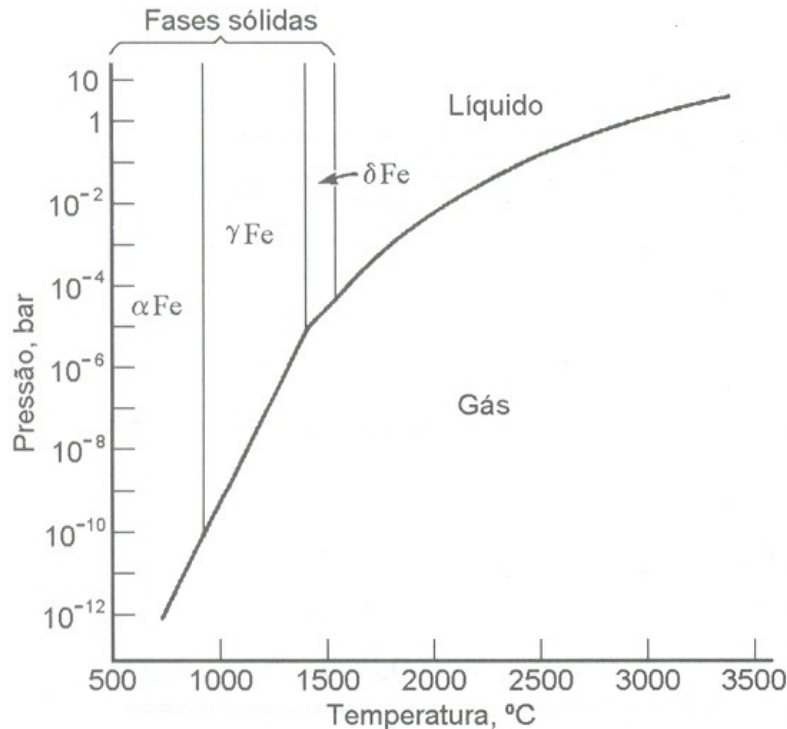
A maioria dos metais apresenta temperatura crítica muito mais alta do que a da água.

Ao se considerar o comportamento de uma substância num dado estado, é sempre interessante comparar este dado estado com o crítico ou com o ponto triplo.

Por exemplo, se a pressão for maior que a crítica, será impossível ter as fases líquida e vapor em equilíbrio.

Outro exemplo: os estados em que é possível a fusão a vácuo de um dado metal podem ser determinados pela observação das propriedades do ponto triplo. O ferro, para uma pressão um pouco acima de  $5\text{ Pa}$  (pressão de ponto triplo), fundir-se-á a uma temperatura de aproximadamente  $1.535\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura do ponto triplo).

# MÁQUINAS TÉRMICAS

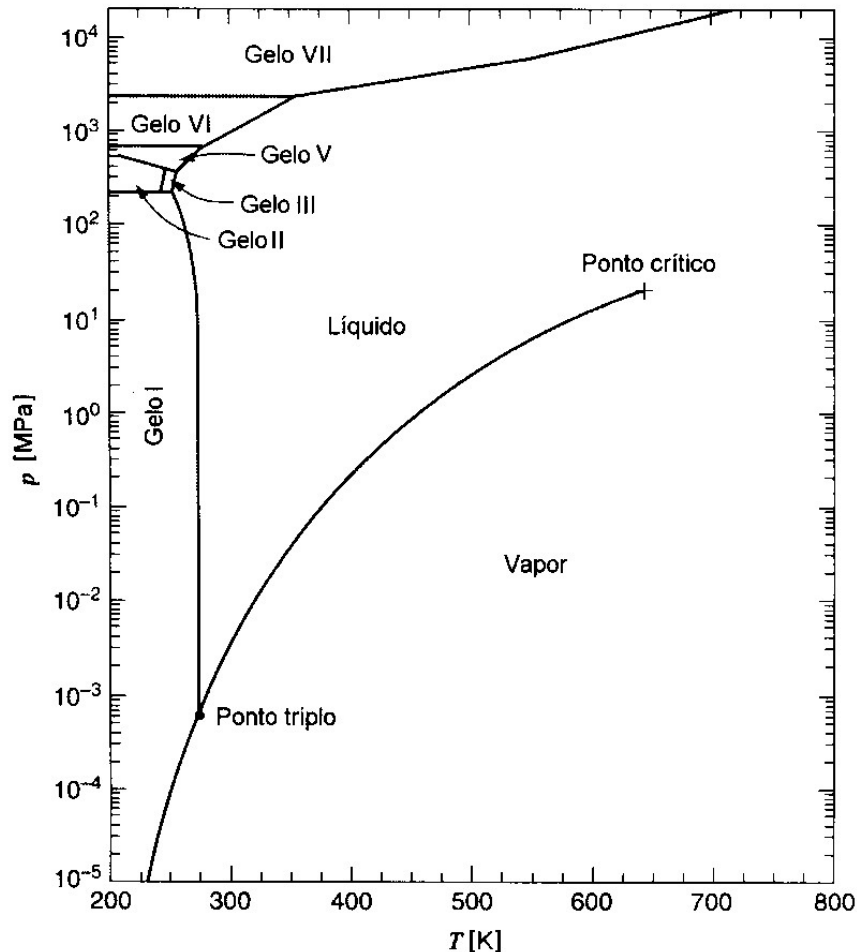


Uma substância pura pode existir em diferentes fases sólidas.

A mudança de uma fase sólida para outra é chamada transformação alotrópica.

A Fig. mostra um diagrama pressão - temperatura para o ferro onde estão indicadas três fases sólidas, a fase líquida e a fase vapor.

# MÁQUINAS TÉRMICAS



A Fig. mostra algumas fases sólidas da água.

É evidente que uma substância pura pode apresentar diversos pontos triplos, mas somente um envolvendo sólido, líquido e vapor em equilíbrio.

Outros pontos triplos para uma substância pura podem envolver duas fases sólidas e uma líquida, duas fases sólidas e uma vapor, ou três fases sólidas.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

### **Propriedades Independentes de uma Substância Pura**

**O estado de uma substância pura simples compressível é definido por duas propriedades (variáveis de estado) independentes.**

No estado de saturação, pressão e temperatura não são independentes. Duas propriedades independentes, tal como volume específico e pressão são requeridas para definir o estado de saturação da substância pura.

O estado do ar, que é uma mistura de gases de composição definida, que não é uma substância pura, é determinado pela especificação de duas propriedades, desde que permaneça na fase gasosa e desta forma pode ser tratado como uma substância pura.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

### **Equações de Estado para a Fase Vapor de uma Substância Compressível Simples**

A partir de observações experimentais estabeleceu-se que o comportamento  $p$ - $v$ - $T$  dos gases a baixa massa específica é dado, com boa precisão, pela seguinte equação de estado:

$$p\bar{v} = \bar{R}T$$

onde a constante universal dos gases vale:

$$\bar{R} = 8314,5 \frac{N m}{kmol K} = 8,3145 \frac{kN m}{kmol K} = 8,3145 \frac{kJ}{kmol K}$$

## MÁQUINAS TÉRMICAS

Dividindo por  $M$ , o peso molecular do gás, obtém-se a equação de estado na base mássica:

$$\frac{p\bar{v}}{M} = \frac{\bar{R}T}{M} \Rightarrow pv = RT \text{ onde } R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$R$  é a constante para um gás particular. (valores tabelados).

Equação de estado a partir do volume total:

$$pV = n\bar{R}T = mRT \quad \text{ou} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Os gases que apresentam massa específica baixa seguem, com boa aproximação, as conhecidas leis de Boyle e Charles, os quais basearam suas afirmações em observações experimentais (rigorosamente falando, nenhuma dessas afirmações deveria ser chamada de lei já que são apenas aproximadamente verdadeiras e, mesmo assim, só são válidas quando o valor da massa específica for baixo).

**Lei de Boyle** - A temperatura constante, o volume ocupado por uma quantidade fixa de um gás é inversamente proporcional à sua pressão.  $P \cdot V = k = \text{constante}$ .

**Lei de Charles e Gay-Lussac** - A volume constante, a pressão de uma massa fixa de um gás varia linearmente com a temperatura.



QUAL A MASSA DE AR DENTRO DA SALA?

## MÁQUINAS TÉRMICAS

**Exemplo:** Qual a massa de ar contida numa sala de 6 m x 10 m x 4 m se a pressão e a temperatura forem iguais a 100 kPa e 25°C? Admita que o ar se comporta como um gás perfeito.

$$R_{ar} = 0,287 \frac{kN m}{kg K}$$

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{100 kN / m^2 * 240 m^3}{0,287 kN m / kg K * 298,2 K} = 280,5 kg$$

**Exemplo:** Um tanque com capacidade de 0,5 m³ e contém 10 kg de um gás perfeito que apresenta peso molecular igual a 24. A temperatura é de 25°C. Qual é a pressão no gás?

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8,3145 kN m / kmol K}{24 kg / kmol} = 0,34644 kN m / kg K$$

$$p = \frac{mRT}{V} = \frac{10 kg * 0,34644 kN m / kg K * 298,2 K}{0,5 m^3} = 2066 kPa$$

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

A equação de estado anterior é chamada equação de estado dos gases perfeitos.

Todos os gases e vapores apresentam comportamento próximo daquele do gás perfeito quando a massa específica apresenta valores muito baixos.

Nestas condições podemos utilizar a equação de estado dos gases perfeitos para avaliar o comportamento  $p$ - $v$ - $T$  destes gases e vapores.

Em situações onde a massa específica apresenta valores maiores, o comportamento  $p$ - $v$ - $T$  pode desviar substancialmente do previsto pela equação de estado dos gases perfeitos.

O uso dessa equação é bastante conveniente, nos cálculos termodinâmicos, devido a sua simplicidade.

No entanto, duas questões podem ser levantadas:

Primeira: O que é uma baixa massa específica? Ou, em outras palavras, em qual faixa de massa específica a equação dos gases perfeitos simula o comportamento do gás real com uma boa precisão?

Segunda: em quanto o comportamento de um gás real, a uma dada pressão e uma dada temperatura, desvia daquele do gás perfeito?

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

Para responder a ambas as questões, introduzimos o conceito de fator de compressibilidade  $Z$ , que é definido pela relação

$$Z = \frac{p\bar{v}}{\bar{R}T} \Rightarrow p\bar{v} = Z\bar{R}T$$

Observe que, para um gás perfeito,  $Z = 1$  e que o afastamento de  $Z$  em relação à unidade é uma medida do desvio de comportamento do gás real em relação ao previsto pela equação de estado dos gases perfeitos.

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

### TABELAS DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

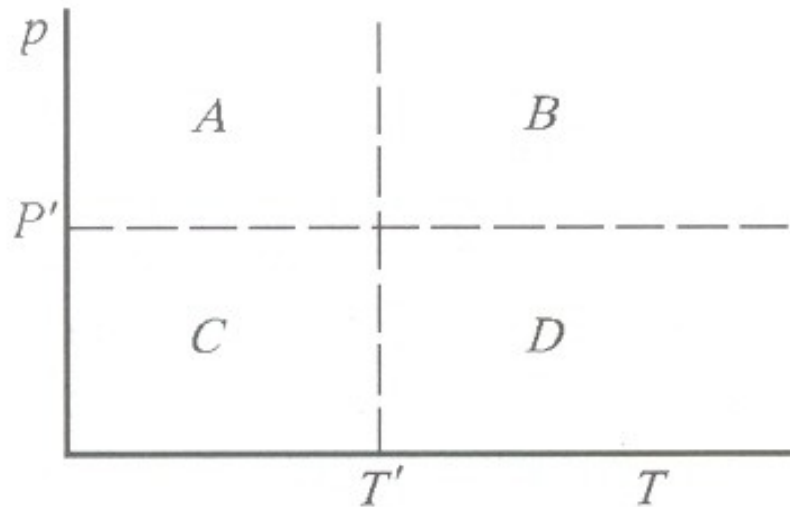
Existem tabelas de propriedades termodinâmicas para muitas substâncias e, em geral, todas elas são apresentadas da mesma forma.

Vamos nos referir às tabelas de vapor d'água.

O vapor d'água é largamente empregado em instalações geradoras e processos industriais. Uma vez entendidas as tabelas de vapor, as outras tabelas termodinâmicas podem ser usadas imediatamente.

Antes de discutirmos detalhadamente as tabelas de vapor é interessante examinar as idéias que propiciaram a construção destas tabelas e também explorar as dificuldades que os estudantes freqüentemente encontram no início do estudo da termodinâmica.

# MÁQUINAS TÉRMICAS

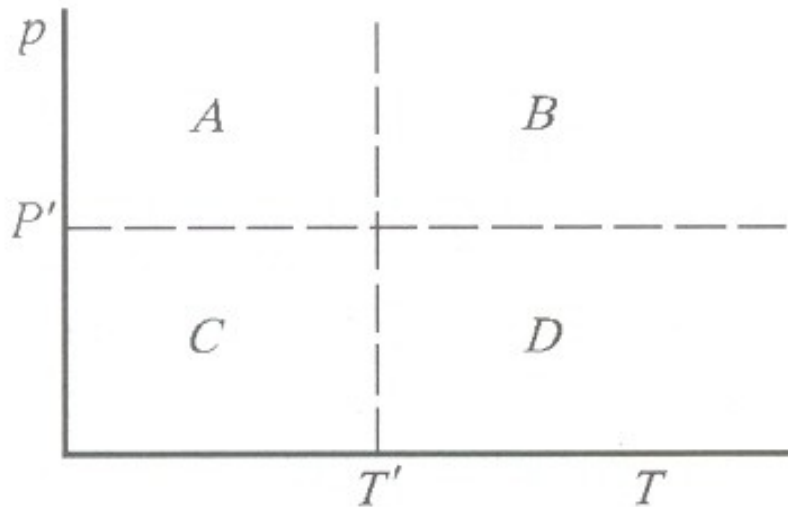


As tabelas de vapor são compostas por 4 tabelas separadas, como por exemplo, as tabelas A, B, C e D da Fig. ao lado.

Cada uma destas está relacionada com uma região diferente e referente a um certa faixa de valores de  $T$  e  $p$ .

Para cada conjunto de pontos  $T$  e  $p$  (um estado), a tabela também contém valores de quatro outras propriedades termodinâmicas, ou seja:  $v$ ,  $u$ ,  $h$  e  $s$ .

# MÁQUINAS TÉRMICAS



Se os valores de  $T$  e  $p$  são fornecidos, podemos compara-los com os valores de fronteira ( $T'$  e  $P'$ ) e assim determinaremos em qual das quatro tabelas (A, B, C, D ) estão os valores adequados para  $v$ ,  $u$ ,  $h$  e  $s$ .

Por exemplo: A tabela A é a correta somente se  $T < T'$  e  $p > P'$ .

## MÁQUINAS TÉRMICAS

---

A principal dificuldade é que qualquer estado termodinâmico pode ser especificado por qualquer par de propriedades ( $p$ ,  $T$ ,  $v$ ,  $u$ ,  $h$  e  $s$ ) independentes. Assim, o nosso objetivo é a determinação das quatro propriedades restantes a partir das duas propriedades independentes fornecidas.

Se as propriedades fornecidas não são a temperatura e a pressão, pode não ser óbvia a escolha da tabela onde se encontra o estado fornecido.

Além do problema de se obter a tabela de propriedades adequada, existe um outro problema que é o da interpolação.

Esta é necessária quando uma ou as duas propriedades termodinâmicas dadas não são exatamente iguais aos valores que constam na tabela.

As tabelas computadorizadas não apresentam os problemas anteriormente descritos, mas o estudante precisa aprender o significado, o método de construção das tabelas e as limitações destas.

O motivo para esta afirmação é: a possibilidade de ocorrer situações onde será necessário utilizar tabelas impressas ainda é muito grande.





P bar a		T °C	200	250	300	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464
15 (198°C)	$v_g$ 1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268



<div> <div>10</div> <div>(175°C)</div> </div>	$s_g$ 6.623	$s$	6.753	6.98
	$v_g$ 0.1944	$v$	0.2061	0.2328
	$u_g$ 2584	$u$	2623	2711
	$h_g$ 2778	$h$	2829	2941
	$s_g$ 6.586	$s$	6.695	6.920
<div> <div>12</div> <div>(186°C)</div> </div>	$v_g$ 1.317	$v$	0.1324	0.1520
	$u_g$ 2595	$u$	2597	2697
	$h_g$ 2792	$h$	2796	2921
	$s_g$ 6.445	$s$	6.452	6.711
<div> <div>15</div> <div>(198°C)</div> </div>				



<p>10 (175°C)</p>	$s_g$ 6.623	$s$	6.753	6.98
	$v_g$ 0.1944	$v$	0.2061	0.2328
	$u_g$ 2524	$u$	2623	2711
	$h_g$ 2778	$h$	2829	2941
<p>12 (180°C)</p>	$s_g$ 6.586	$s$	6.695	6.920
	$v_g$ 1.317	$v$	0.1324	0.1520
	$u_g$ 2595	$u$	2597	2697
	$h_g$ 2792	$h$	2796	2921
<p>15 (198°C)</p>	$s_g$ 6.445	$s$	6.452	6.711

→ A1



10 (175°C)	$s_g$	6.623	$s$	6.753	6.98
	$v_g$	0.1944	$v$	0.2061	0.2328
	$u_g$	2584	$u$	2623	271
	$h_g$	2778	$h$	2829	294
12 (180°C)	$s_g$	6.586	$s$	6.695	6.92
	$v_g$	1.317	$v$	0.1324	0.152
	$u_g$	2595	$u$	2597	269
	$h_g$	2792	$h$	2796	292
15 (198°C)	$s_g$	6.445	$s$	6.452	6.71

→ A1

→ A2





T °C	200	250	300·325·350		4
✓	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3
u	2628	2714	2796	2877	2
h	2835	2948	3055	3160	3
s	6.753	6.980	7.176	7.352	7
v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3
u	2623	2711	2794	2875	2



T °C	200	250	300 · 325 · 350	400
v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144
u	2628	2714	2796	2877
h	2835	2948	3055	3160
s	6.753	6.980	7.176	7.352
v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825
u	2623	2711	2794	2875

↓  
B1



T °C	200	250	300 · 325 · 350	400
✓	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144
u	2628	2714	2796	2877
h	2835	2948	3055	3160
s	6.753	6.980	7.176	7.352
v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825
u	2623	2711	2794	2875



B1



B2



P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
12 (185°C)	$v_g$ 1.317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2595	2627	2704	2768	2852	
	$h_g$ 2792	h	2792	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.107	7.268	
15 (198°C)								

$$h(12, 325) = ?$$





P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
12 (185°C)	$v_g$	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$	u	2591	2687	2784	2868	2952	
	$h_g$	h	2791	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$	s	6.452	6.711	6.919	7.107	7.268	
15 (198°C)	$v_g$	v						
	$u_g$	u						
	$h_g$	h						
	$s_g$	s						

$$h(12, 325) = C$$



P bar a		T °C	200	250	300·325·350	400	
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2877	0.3144	0.3410
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464
15 (198°C)	$v_g$ 0.1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268

Handwritten annotations:

- Green vertical line labeled **B1** pointing to the 300 column.
- Red horizontal line labeled **A1** pointing to the 325 column.
- Red vertical line labeled **12** pointing to the 10 bar row.

wiki How to Do a Double Linear Interpolation



P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2871	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2482	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
15 (198°C)	$v_g$ 0.1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	





P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2941	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
15 (198°C)	$v_g$ 0.1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	

**B2**

**A1**

wiki How to Do a Double Linear Interpolation

A1

B2



P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.291	7.464	
15 (198°C)	$v_g$ 1.317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.107	7.268	

A1

B2

C1,2



P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2871	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
15 (198°C)	$v_g$ 0.1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	





P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2877	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
12 15 (198°C)	$v_g$ 1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	

**B1**

**A2**

**3039 = 2.1**

wiki How to Do a Double Linear Interpolation



P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	v	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.124	7.301	7.464	
12 15 (198°C)	$v_g$ 1.317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.107	7.268	

B2

A2





P bar a		T °C	200	250	300	325	350	400
9 (175°C)	$v_g$ 0.2149	✓	0.2305	0.2597	0.2874	0.3144	0.3410	
	$u_g$ 2581	u	2628	2714	2796	2877	2959	
	$h_g$ 2774	h	2835	2948	3055	3160	3266	
	$s_g$ 6.623	s	6.753	6.980	7.176	7.352	7.515	
10 (180°C)	$v_g$ 0.1944	v	0.2061	0.2328	0.2582	0.2825	0.3065	
	$u_g$ 2584	u	2623	2711	2794	2875	2957	
	$h_g$ 2778	h	2829	2944	3052	3158	3264	
	$s_g$ 6.586	s	6.695	6.926	7.121	7.291	7.464	
12 15 (198°C)	$v_g$ 1317	v	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	
	$u_g$ 2595	u	2597	2697	2784	2868	2952	
	$h_g$ 2792	h	2796	2925	3039	3147	3266	
	$s_g$ 6.445	s	6.452	6.711	6.919	7.102	7.268	

B2

C2,2

A2



(equation 1)

$C =$

$$\left[ \left( \frac{B_2 - B}{B_2 - B_1} \right) C_{1,1} + \left( \frac{B - B_1}{B_2 - B_1} \right) C_{1,2} \right] \left( \frac{A_2 - A}{A_2 - A_1} \right) + \left[ \left( \frac{B_2 - B}{B_2 - B_1} \right) C_{2,1} + \left( \frac{B - B_1}{B_2 - B_1} \right) C_{2,2} \right] \left( \frac{A - A_1}{A_2 - A_1} \right)$$



(equation 2)

C =

$$\left[ \left( \frac{350-325}{350-300} \right) 3052 + \left( \frac{325-300}{350-300} \right) 3158 \right] \left( \frac{15-12}{15-10} \right) +$$

$$\left[ \left( \frac{350-325}{350-300} \right) 3039 + \left( \frac{325-300}{350-300} \right) 3147 \right] \left( \frac{12-10}{15-10} \right)$$

$$\Rightarrow C = 3100.2$$

# MÁQUINAS TÉRMICAS

	B1	B	B2
A1	C11		C12
A		C	
A2	C21		C22

(equation 1)

C =

$$\left[ \left( \frac{B2-B}{B2-B1} \right) C_{1,1} + \left( \frac{B-B1}{B2-B1} \right) C_{1,2} \right] \left( \frac{A2-A}{A2-A1} \right) + \left[ \left( \frac{B2-B}{B2-B1} \right) C_{2,1} + \left( \frac{B-B1}{B2-B1} \right) C_{2,2} \right] \left( \frac{A-A1}{A2-A1} \right)$$

**MEC 011**  
**MÁQUINAS TÉRMICAS**

---

TABELA COMPUTADORIZADA

*CATT 3*

*Baixe no Site da editora*  
*[www.blucher.com.br/termo](http://www.blucher.com.br/termo)*