

PMT 3532

Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência I

Prof. *José R. Simões Moreira*

SISEA – Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis

Depto. Enga. Mecânica – Escola Politécnica da USP -

www.usp.br/sisea

Aula 1 – Introdução - 2021 v 1.0

Prof. José R. Simões Moreira



Biografia

Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da USP (1983), Mestrado em Engenharia Mecânica pela mesma instituição (1989), Doutorado em Engenharia Mecânica - Rensselaer Polytechnic Institute (1994) e Pós-Doutorado em Engenharia Mecânica na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (1999). Atualmente é Professor Titular da Escola Politécnica da USP. Foi secretário de comitê técnico da Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Térmica e Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: mudança de fase líquido-vapor, uso e processamento de gás natural, refrigeração por absorção, separação supersônica de misturas gasosas, tubos de vórtices, energia solar concentrada e sistemas alternativos e renováveis de energia. Coordenou vários cursos de extensão e atualmente coordenada o curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da USP. Tem sido professor de cursos de extensão universitária para profissionais da área de termelétricas, energia, válvulas e tubulações industriais. Tem participado de projetos de pesquisa de agências governamentais e empresas, destacando: Fapesp, Finep, Cnpq, Eletropaulo, Ultragaz, Ipiranga, Comgas e Petrobras. Foi professor visitante no INSA - Institut National des Sciences Appliquées em Lyon (França) em junho e julho de 2009. Tem desenvolvido projetos de cunho tecnológico com apoio da indústria (Comgas, Ultragaz, Petrobras e Vale). É autor de mais de 100 artigos técnico-científicos, além de ser autor de um livro intitulado “Fundamentos e Aplicações da Psicrometria – 2ª edição” e coordenador e autor do livro “Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética” da LTC. Finalmente, coordena o laboratório e grupo de pesquisa da EPUSP de nome SISEA - Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis (www.usp.br/sisea).

OUTRAS INFORMAÇÕES SOBRE O COORDENADOR E SUAS ATIVIDADES

SISEA – Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis

REPORTER ECO – participação no Reporter Eco da TV Cultura em 16/09/2018

Entrevista concedida à Rádio USP sobre Energias Renováveis (1/12/2017)

Organização da Escola Avançada sobre Energias Renováveis (julho/ago 2018)

LIVRO “Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética” (2017)

LIVRO “Fundamentos e Aplicações da Psicrometria – 2ª edição (2019)

Coordenação de Curso de Especialização em Energias Renováveis (desde 2011)

Implantação do laboratório para estudos experimentais de separação de CO₂ de gás natural (Shell – RCGI - USP)

Projeto de uso de energia solar para reforma a vapor de gás natural (Shell/FAPESP – RCGI - USP)

Curriculo Lattes

ERG-009 - FUNDAMENTOS DE TERMODINÂMICA E CICLOS DE POTÊNCIA

Programa Resumido

Conceitos fundamentais, trabalho e calor.
Propriedades termodinâmicas e diagramas termodinâmicos.
Lei de conservação de massa e Primeira lei da termodinâmica.
Entropia e segunda lei da termodinâmica.
Ciclo térmico de Carnot – exercícios.
Combustão e combustíveis.
Ciclo de Rankine – teoria e componentes.
Ciclo Brayton. – teoria e componentes.
Ciclo Diesel e Otto –teoria e tipos.
Ciclo combinado – teoria. Exemplos.

Bibliografia Resumida

Çengel, Y. A. e Boles, M. A., *Termodinâmica*, 5a Ed. McGraw-Hill, Inc., 2006.
Kehlhofer, R.H., Warner, J., Nielsen, H. e Bachmann, R., *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Powe Plant*, 2a edição, PennWell Publishing Company, Oklahoma, EUA, 1999.
Moran M.J. e Shapiro H.N., *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*, 4a ed. LTC Editora, 2002.
Simões-Moreira, J. R. Notas de aula do curso.
Simões-Moreira, J. R. (editor), *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética*, LTC , RJ (2017) – Livro-texto
Sonntag, R.E., Borgnakke, C., Van Wylen, G.J. *Fundamentos da Termodinâmica*, 6ª, Edgar Blucher, SP, 2003

MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO DA TERMODINÂMICA

“Estudo dos processos de transformação da energia que ocorrem em máquinas e equipamentos para produção de energias mecânica ou térmica útil”. A energia mecânica útil, em muitas vezes, é transformada em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

(1) Central Termelétrica – produção de energia elétrica

(combustão/calor → energia “térmica” → energia mecânica → energia elétrica)

Turbinas a Vapor/Motor a Vapor

Turbinas a Gás

Motores de Combustão Interna

(2) Outras formas de produção de energia elétrica

Célula de Combustível (energia química → energia elétrica)

Conversão Direta – painéis fotovoltaicos (energia solar → energia elétrica)

(3) Produção de trabalho mecânico útil

(acionamento direto de outras máquinas)

Motor de Combustão Interna

Turbinas a Vapor e Gás

Motor a vapor

MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO DA TERMODINÂMICA (*cont...*)

(4) Refrigeração e ar condicionado

(processos de produção de “frio”)

Ciclo de Compressão a Vapor (*os que operam nas geladeiras*)

Ciclo de Absorção de Calor (*transformam calor em “frio” diretamente*)

Refrigeração Termelétrica (*efeitos termelétricos: eletricidade → “frio”*)

(5) Manipulação do ar e outros gases

(processos de separação e armazenamento dos gases)

Usinas de Separação de N_2 , O_2 e outros gases líquidos

Criogenia

(6) Processos de Combustão

Máquinas e Dispositivos de combustão

Teoria da Combustão

(7) Estudos ambientais

Poluição Térmica

Poluição Atmosférica

Uso Eficiente da Energia

MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO DA TERMODINÂMICA (*cont...*)

(4) Refrigeração e ar condicionado

(processos de produção de “frio”)

Ciclo de Compressão a Vapor (*os que operam nas geladeiras*)

Ciclo de Absorção de Calor (*transformam calor em “frio” diretamente*)

Refrigeração Termelétrica (*efeitos termelétricos: eletricidade → “frio”*)

(5) Manipulação do ar e outros gases

(processos de separação e armazenamento dos gases)

Usinas de Separação de N_2 , O_2 e outros gases líquidos

Criogenia

(6) Processos de Combustão

Máquinas e Dispositivos de combustão

Teoria da Combustão

(7) Estudos ambientais

Poluição Térmica

Poluição Atmosférica

Uso Eficiente da Energia

ALGUMAS DEFINIÇÕES E OBSERVAÇÕES DA TERMODINÂMICA

Definição Clássica: “Termodinâmica é a ciência que lida com Calor e Trabalho e suas inter-relações”

Callen: “Termodinâmica é o estudo dos resultados macroscópicos de miríades de coordenadas atômicas que, em virtude de médias estatísticas, não aparecem explicitamente na descrição macroscópica do sistema”

Kestin: “A ciência da Termodinâmica é um ramo da Física. Ela descreve os processos naturais nos quais as mudanças de temperatura desempenham um papel importante. Tais processos envolvem a transformação de uma forma de energia em outra. Conseqüentemente, a Termodinâmica lida com as leis que governam tais transformações de energia”

Van Wylan: “A Termodinâmica é a ciência da energia e da entropia”

Observações de A. Einstein sobre a Termodinâmica Clássica: “Uma teoria é tanto mais impressionante quanto maior for a simplicidade das suas premissas, quanto maior o número de coisas que ela relaciona e quanto maior for a amplitude da sua área de aplicação. Portanto, esta é a profunda impressão que a Termodinâmica Clássica realizou em mim. É a única teoria física de conteúdo universal que, assim estou convencido, nunca será derrubada dentro da área de aplicação dos seus conceitos básicos”

ALGUMAS DATAS, EVENTOS E CIENTISTAS RELEVANTES
(fonte: Huang F. – *Engineering Thermodynamics*)

Data	Evento
1798	Conde Rumford (Benjamin Thompson) deu início à solução da polêmica da conversão de trabalho em calor por meio do seu experimento de usinagem de canhões
1799	Sir Humphry Davy estudou a conversão de trabalho em calor por meio de experimentos de esfregar gelo.
1824	Sadi Carnot publicou seu grande trabalho “Reflexões sobre o Poder Motriz do Fogo” que incluiu os novos conceitos de <i>ciclo</i> e o princípio de que uma máquina térmica reversível operando entre dois reservatórios de calor depende apenas das temperaturas desses reservatórios e não depende da substância de trabalho
1842	Mayer postulou o princípio de conservação de energia
1847	Helmholtz formulou o princípio de conservação de energia de forma independente de Mayer
1843 – 1848	James Prescott Joule estabeleceu o fundamento experimental da primeira Lei da Termodinâmica (lei de conservação de energia) ao conduzir experimentos para demonstrar a equivalência entre calor e trabalho.
1848	Lord Kelvin (William Thomson) definiu uma escala de temperatura absoluta baseada no ciclo de Carnot
1850	Rudolf J. Clausius foi provavelmente quem primeiro percebeu que há dois princípios básicos: a primeira e a segunda Leis da Termodinâmica. Ele também introduziu o conceito de energia interna
1865	Clausius estabeleceu os princípios da primeira e segunda Leis da Termodinâmica em duas linhas: 1.A energia do universo é constante 2.A entropia do universo tende em direção à um valor máximo
1875	Josiah Willard Gibbs publicou seu trabalho monumental “Sobre o Equilíbrio de Substâncias Heterogêneas”, o qual generalizou a Termodinâmica para aplicá-la à sistemas heterogêneos e reações químicas. O seu trabalho incluiu o importante conceito de potencial químico.
1897	Max Planck estabeleceu a segunda Lei da Termodinâmica da seguinte forma: “É impossível construir uma máquina que, trabalhando em um ciclo completo, não vai produzir outro efeito do que o do levantamento de um peso e sofre o resfriamento de um reservatório de calor”
1909	Caratheodory publicou sua estrutura da Termodinâmica em base axiomática de forma completamente matemática.

**A Termodinâmica é uma ciência experimental.
É baseada em leis fundamentais:**

Lei zero – igualdade de temperaturas

1a Lei ou Lei da Conservação da Energia -
“Energia total de um sistema se conserva”

2a Lei – Direções em que processos podem ocorrer naturalmente e limites de conversão de formas de energia

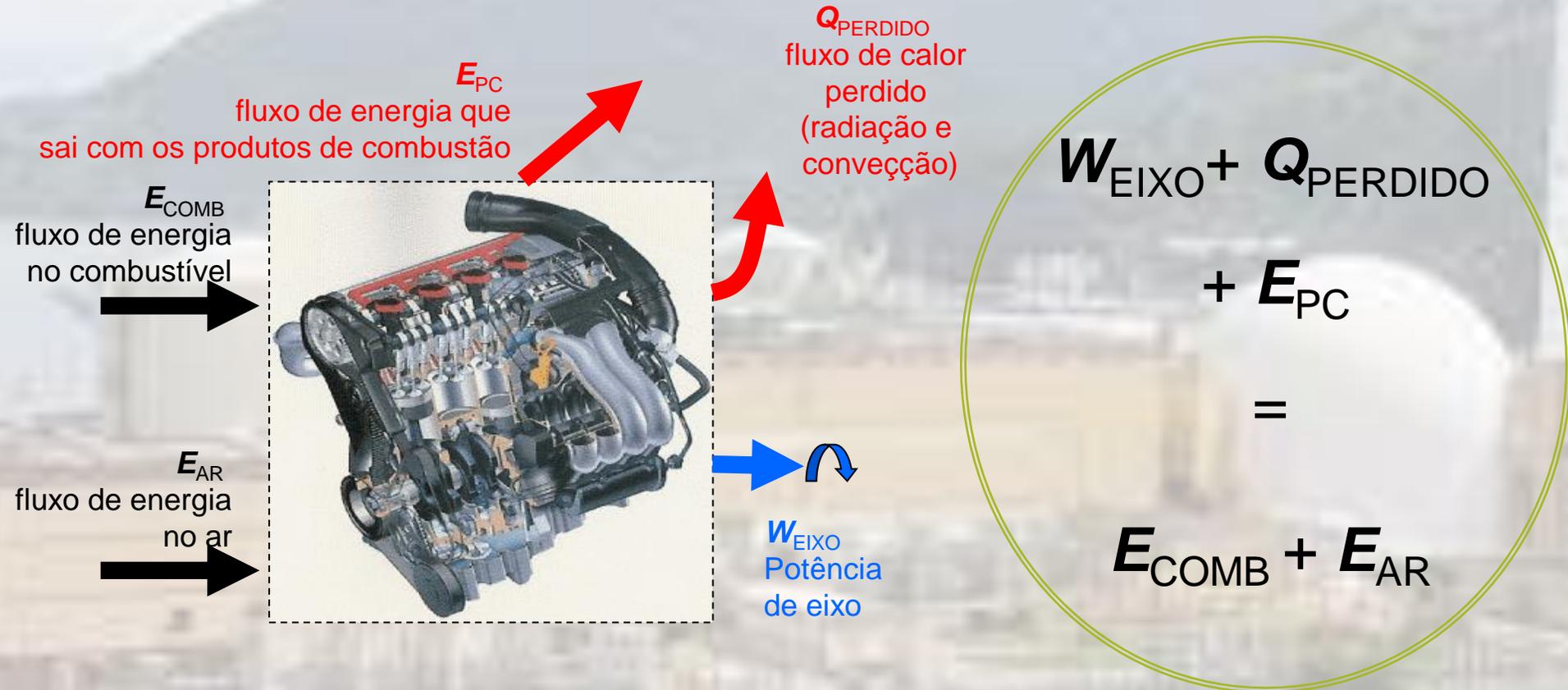
Ferramental da Termodinâmica

Exemplo do Motor de Combustão Interna

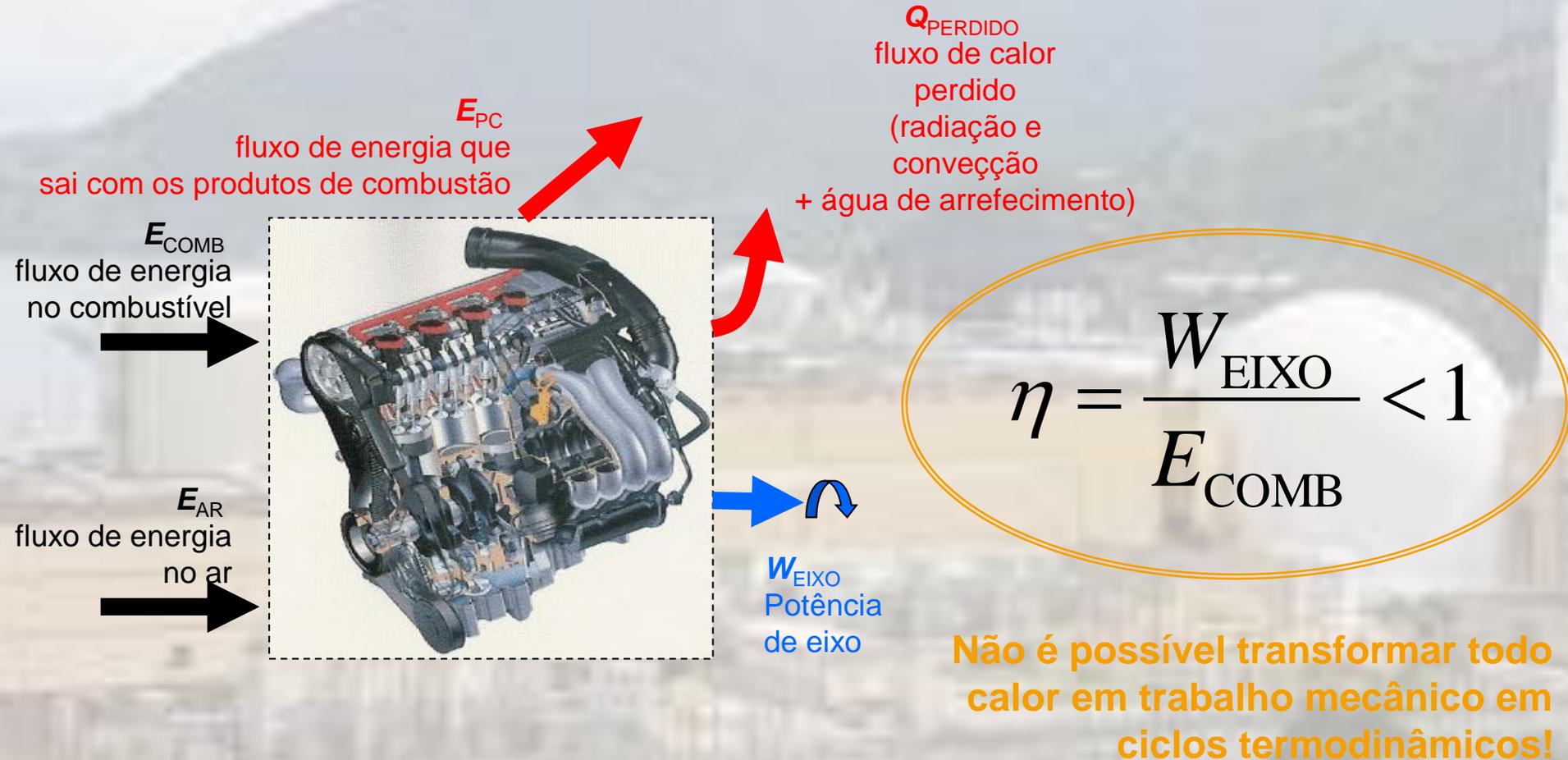


Um motor de combustão interna é um equipamento mecânico muito complexo, formado por diversos componentes que operam próximo à condições críticas. A operação de um MCI envolve sincronismo mecânico-elétrico, lubrificação de partes do motor, controle de combustão, proteção de materiais de zonas quentes. Enfim, trata-se de um sistema mecânico bastante complexo.

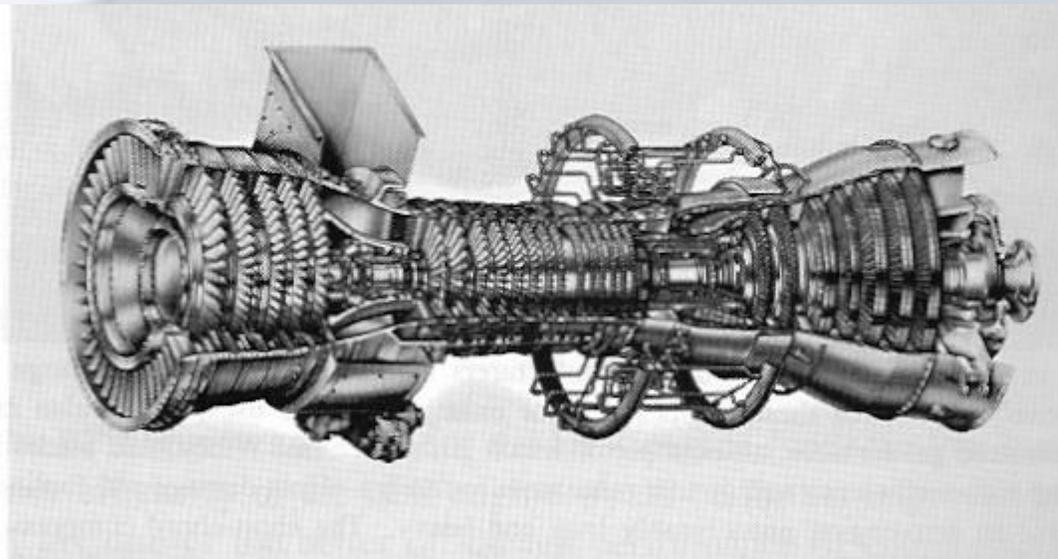
1a. Lei da Termodinâmica: “ENERGIA SE CONSERVA”



2a. Lei da Termodinâmica: “HÁ LIMITES DE CONVERSÃO DE CALOR EM TRABALHO EM CICLOS”



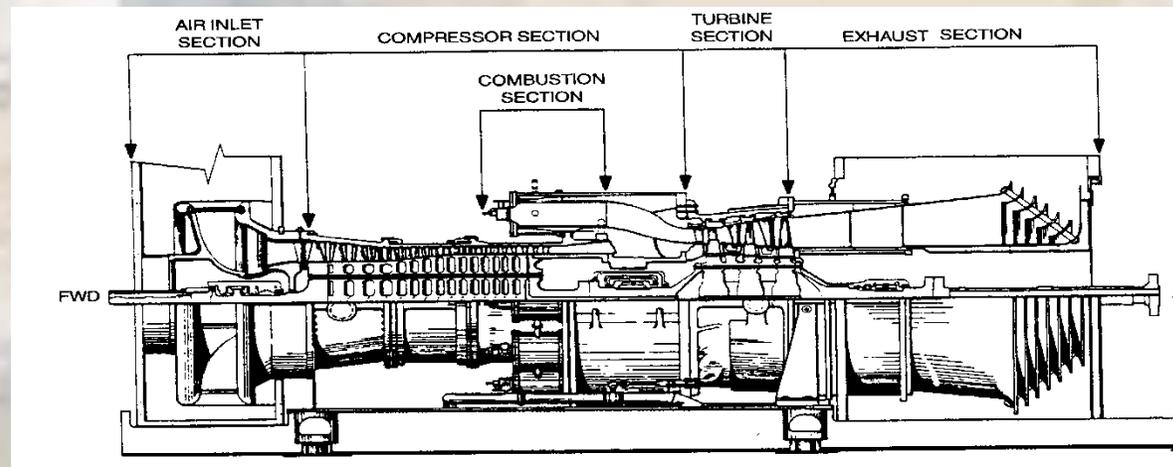
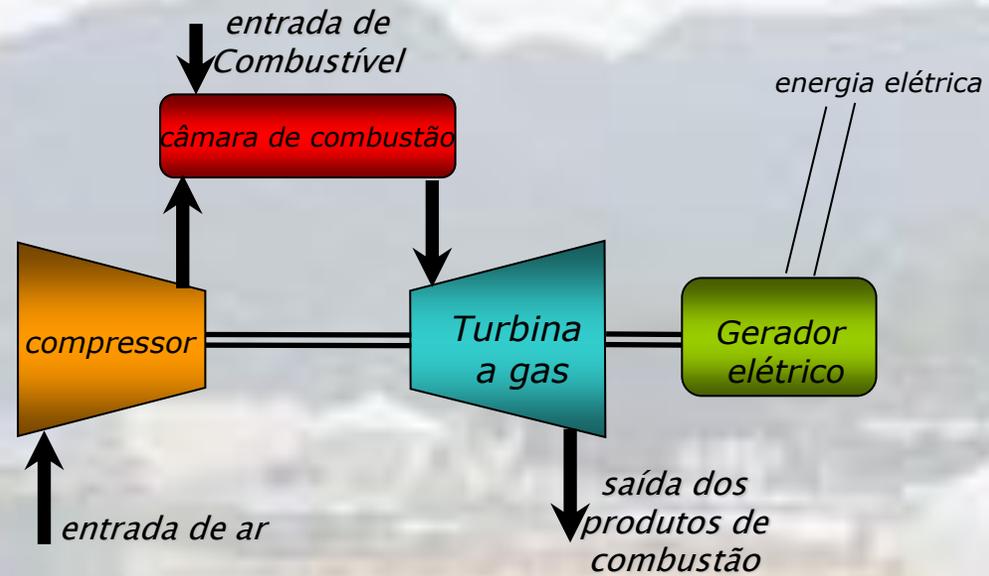
Exemplo de uma Turbina a Gás



This engine is based on the CF6 series of aircraft engines. It produces about 42 MW at a thermal efficiency between 40% and 43% (depending on whether it is operated “dry” or with water or steam injection). This is claimed, with reason, to be the highest simple-cycle thermal efficiency available from any engine world-wide. It can also be used in a combined cycle. It is a two-spool engine, with power take-off from either end of the low-pressure shaft. The high-pressure compressor, part of the original core engine, has six rows of variable-setting stators, including the inlet guide vanes; only the IGVs are variable in the low-pressure compressor. There is a substantial blow-off band between the two compressors to assist starting. Part-span shrouds or snubbers are used on the first stage of the high-pressure compressor. The contrast between this GE engine and the heavy-frame engine of a previous illustration is striking.

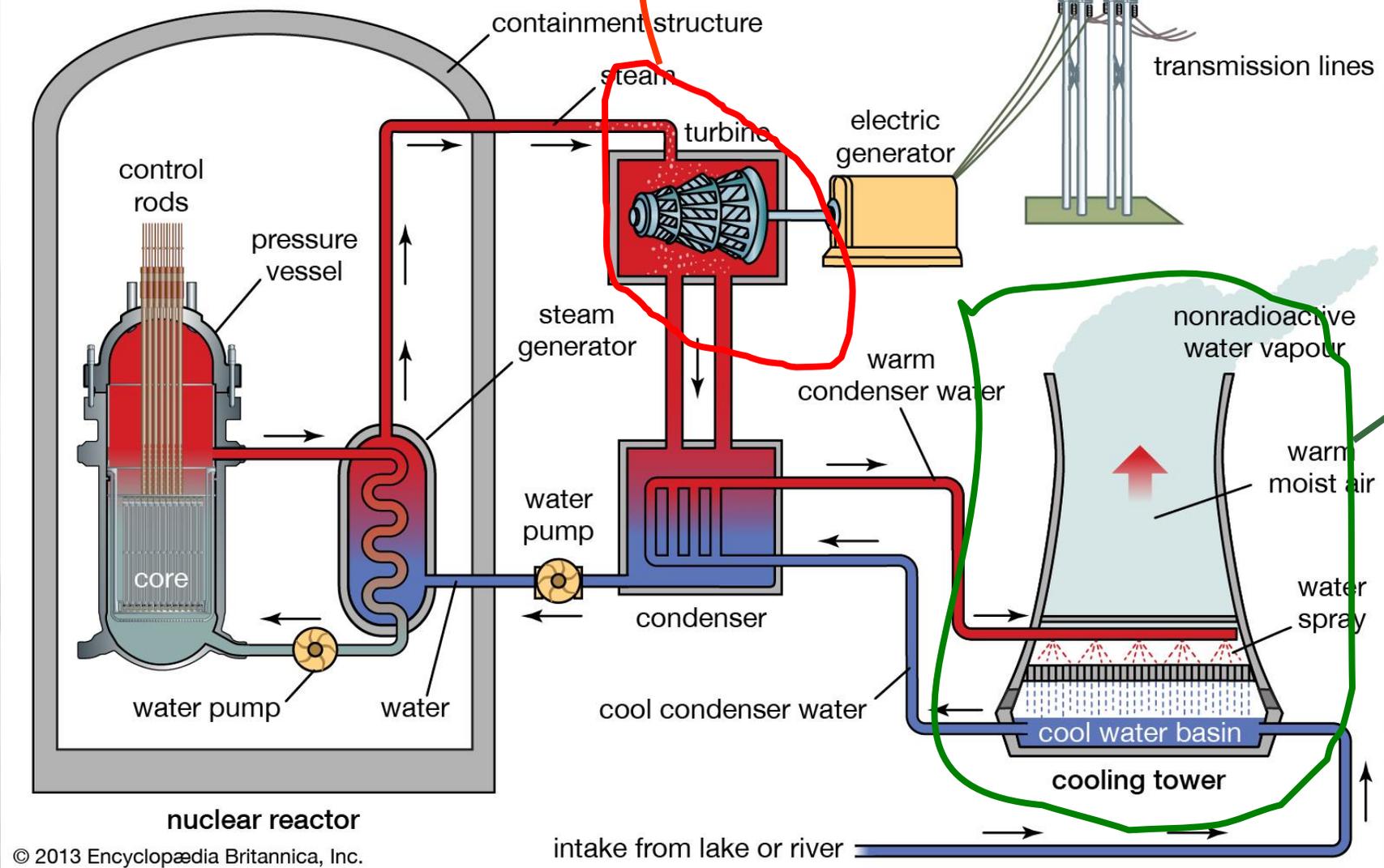
Illustration. GE LM6000 engine. Courtesy GE Marine & Industrial Engines

Componentes básicos de uma central termelétrica a turbina a gás



MS-7000 – GE

Nuclear power plant



Volume de controle em torno da turbina vapor

Volume de controle em torno da torre de resfriamento

em torno da turbina a vapor

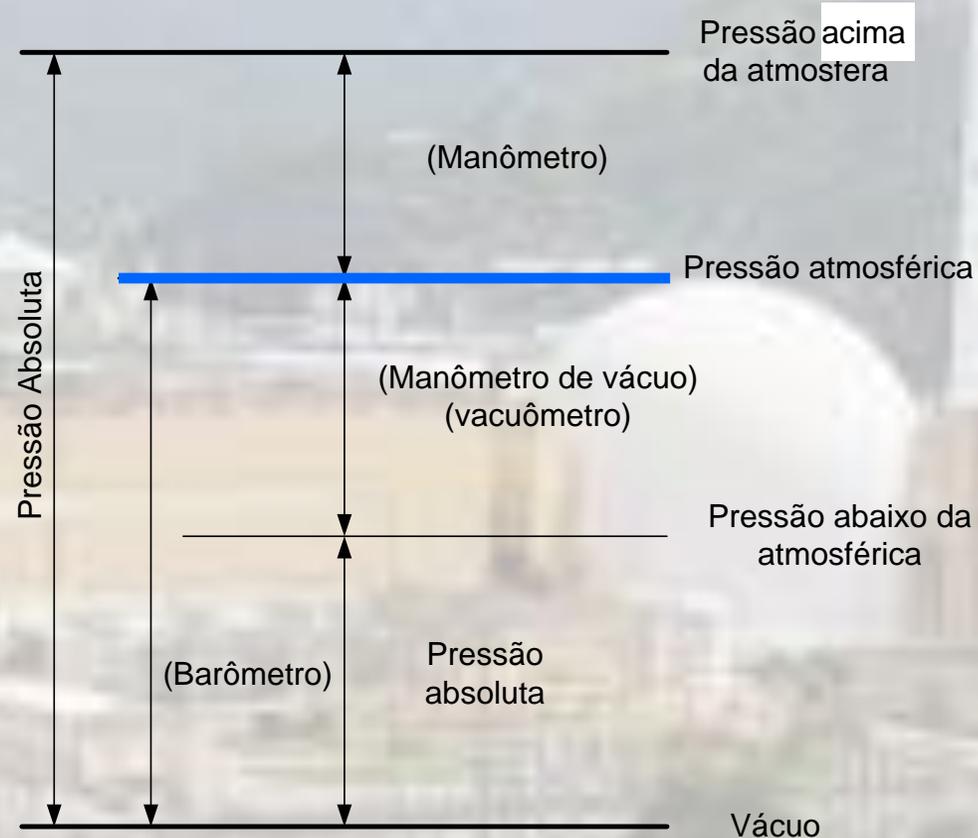
© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.



Pressão

Pressão é a componente normal da força por unidade de área que age em um fluido em repouso e é igual em todas as direções em torno de um ponto do meio fluido.

A pressão pode ser pressão absoluta ou pressão relativa. Os adjetivos *absoluta* e *relativa* ou *manométrica* dependem do instrumento que foi utilizado para realizar a medição. Estes instrumentos estão indicados entre parênteses no esquema ao lado.



Pressão

Uma *atmosfera padrão* vale 760 mmHg e em outras unidades ela vale:

- 1 atmosfera padrão = 760 mmHg (*milímetros de coluna de mercúrio a 0 °C*),**
- = 29,92 inHg (*polegadas de coluna de mercúrio a 0 °C*),**
- = $1,01325 \times 10^5$ N/m² (*newton por metro quadrado*),**
- = 101,325 kPa (*quilopascal*),**
- = 1,01325 bar (*bar*),**
- = 14,696 lbf/in² ou psi (*libra-força por polegada quadrada*),**
- = 760 Torr (*Torricelli*).**

No sistema internacional 1 bar vale 10^5 N/m², sendo que a unidade N/m² recebe o nome de *pascal* ou, abreviadamente, Pa. Nesse curso, será usado preferencialmente um múltiplo da unidade pascal, qual seja o *quilopascal*, ou, kPa (10^3 N/m² = 1 kPa). Alternativamente, a unidade *bar* também poderá estar presente. A vantagem de se utilizar a unidade *bar* é que 1 bar vale aproximadamente 1 atmosfera padrão.

Pressão manométrica

Determine a pressão absoluta em psia e em kPa de um gás que está em uma tubulação que possui um manômetro instalado, cuja indicação é de 10 psig de pressão manométrica.

Use 700 mmHg como a pressão barométrica de São Paulo (P_{atm}).

Solução:

Já foi visto que $P_{atm} = 700$ mmHg equivale à 13,536 psia.

$$\text{Assim, } P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

$$P_{abs} = 10 + 13,536 = 23,536 \text{ psia}$$

Regra de três p/ transformar

Unidades:

$$\left. \begin{array}{l} 14,696 \text{ psia} \leftrightarrow 101,325 \text{ kPa} \\ 23,536 \text{ psia} \leftrightarrow P_{abs} \text{ kPa} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$P_{abs} = \frac{23,536}{14,696} \times 101,325 = 162,274 \text{ kPa}$$

Volume Específico e Densidade

O *volume específico* é a razão entre o volume, V , ocupado por uma dada substância e a sua massa, m . A *densidade* é o inverso do volume específico. Às vezes o que este texto chama de densidade, em outros lugares é conhecido por *massa específica*. Entretanto, face à grande difusão e uso corrente do termo densidade, o mesmo será adotado preferencialmente.

Os símbolos gregos v e ρ serão usados para designarem o volume específico e a densidade, na ordem. No sistema internacional, a unidade do volume específico é m^3/kg , e a unidade da densidade é o seu recíproco. Resultando em:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \left[\text{m}^3 / \text{kg} \right]$$

Volume Específico e Densidade

A densidade (ou massa específica) da água vale aproximadamente 1000 kg/m^3 nas condições ambientes. Determine seu volume específico.

Solução:

$$\rho = 1000 \text{ kg / m}^3 \Rightarrow v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1000} = 0,001 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

A densidade de um gás vale $1,2 \text{ kg/m}^3$. Determine seu volume específico.

Solução:

$$\rho = 1,2 \text{ kg / m}^3 \Rightarrow v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,2} = 0,833 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Diagrama Termodinâmico

As substâncias puras, como a água isenta de gases e sais minerais, tem um comportamento termodinâmico bastante previsível e característico.

As substâncias puras podem existir e coexistir nas fases *sólida*, *líquida* e *vapor* isoladamente ou em suas combinações, tais como mistura *líquido-vapor*, mistura *sólido-líquido* (copo de água pura com gelo, por exemplo), ou *sólido-vapor*.

As propriedades pressão, temperatura e volume específico têm seus valores inter-relacionados para cada substância, o que permite a construção de tabelas e diagramas, como será visto. Esse é chamado “princípio de estado termodinâmico”.

Uma projeção da região de equilíbrio entre as fases líquida e vapor está ilustrada no diagrama Temperatura-volume específico na figura seguinte.

Diagrama Termodinâmico – temperatura – volume específico

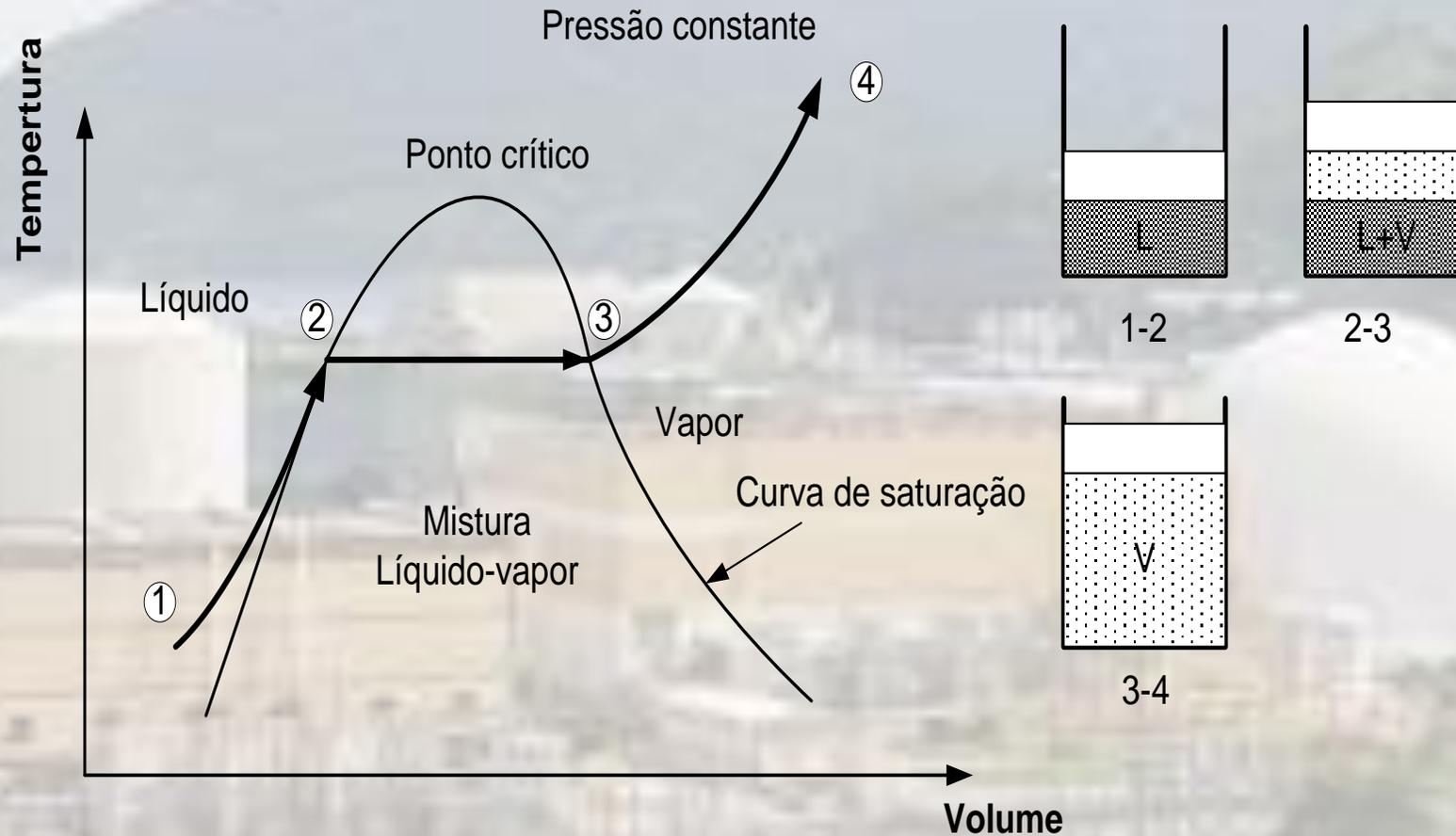
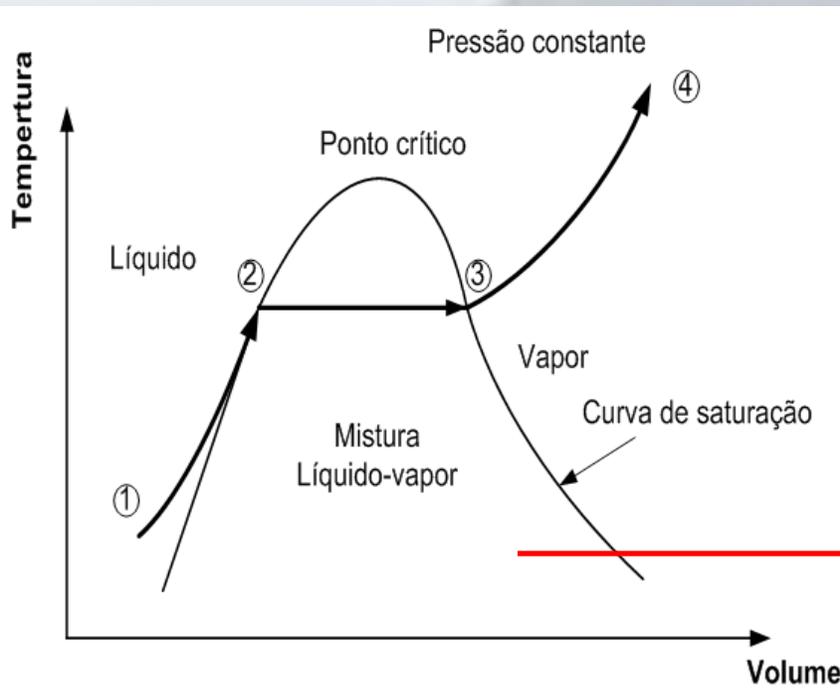


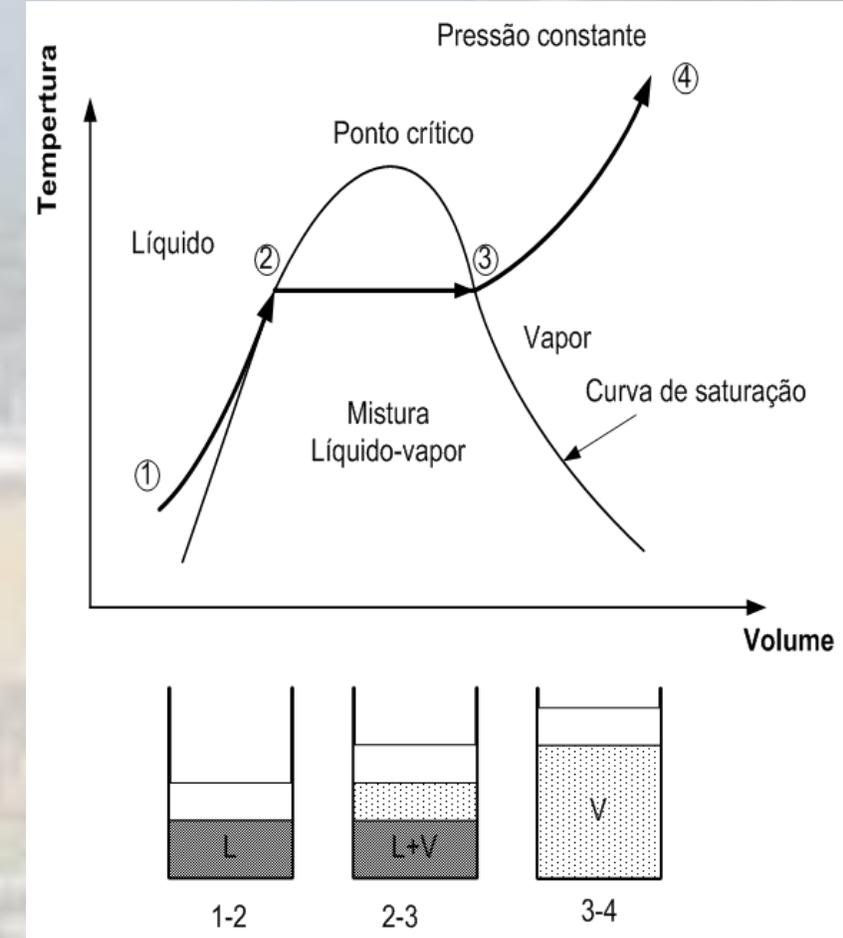
Diagrama Termodinâmico – temperatura – volume específico



- A linha (1, 2, 3 e 4) também é uma linha de pressão constante (*isobárica*).
- Uma linha horizontal neste diagrama representa um processo de temperatura constante (*isotérmica*).
- Uma linha vertical, processo de volume constante (*isocórica*).
- Existe uma relação funcional entre a pressão e a temperatura que recebe o nome de *curva de pressão de vapor*, que pode ser fornecida nas formas gráfica, analítica e tabelada.

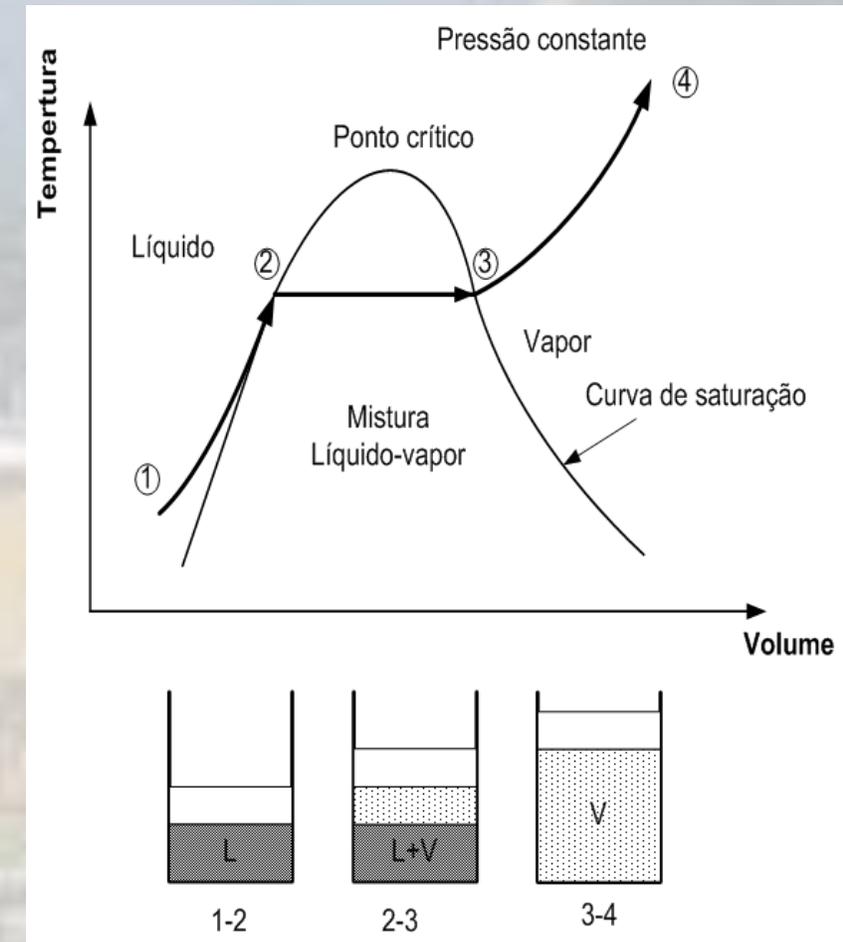
Mudança de fase líquido-vapor

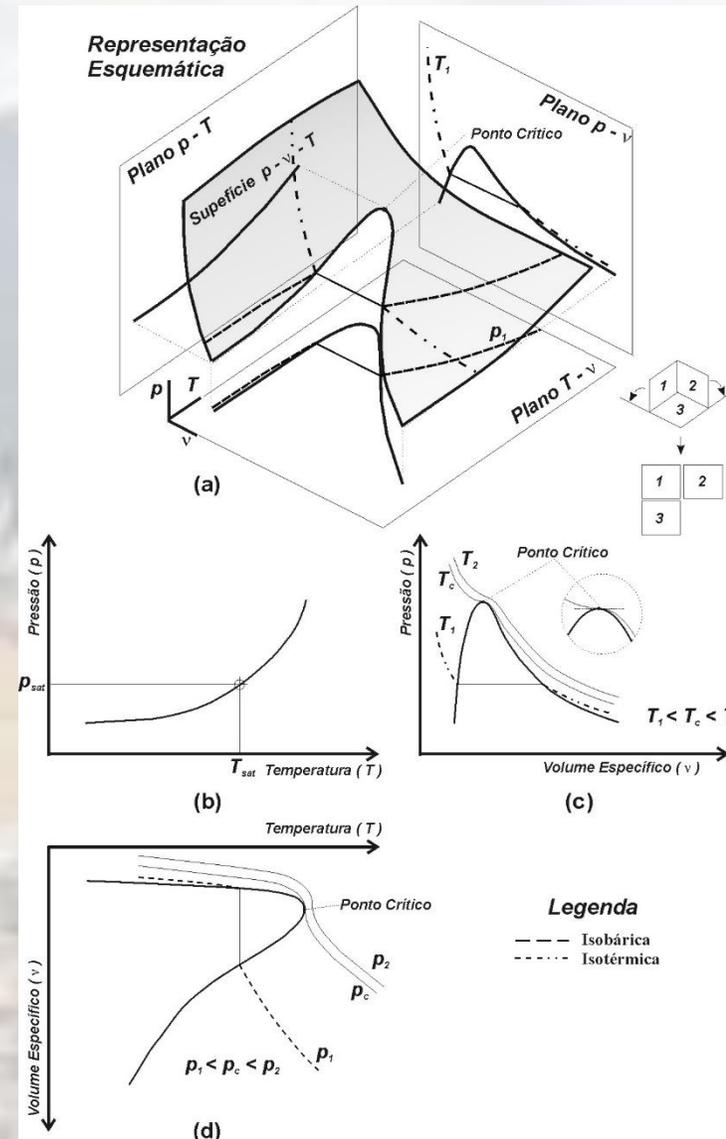
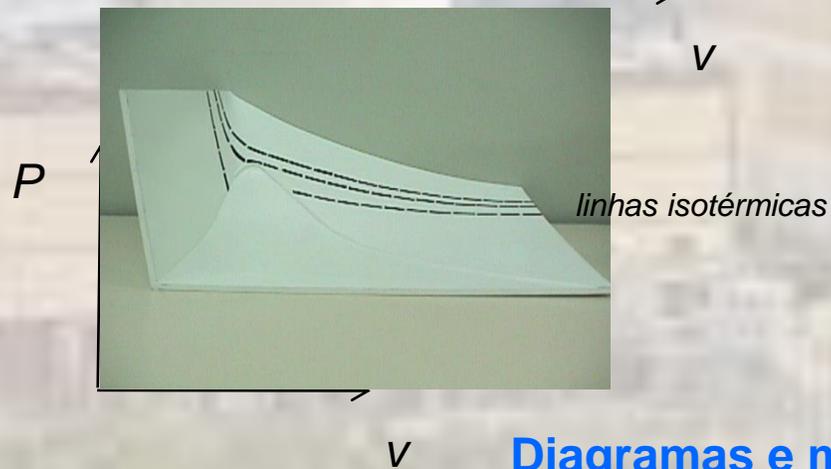
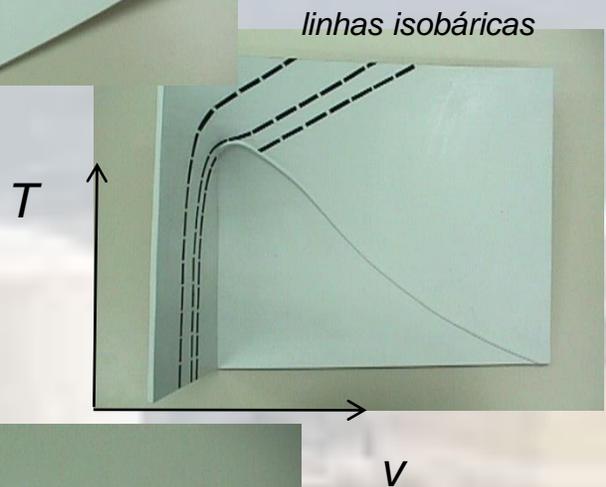
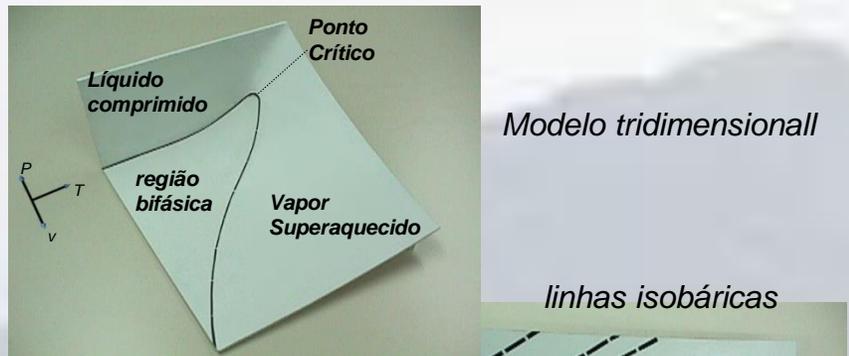
- Se a uma quantia de água, inicialmente na fase líquida e estado 1 (líquido comprimido), for fornecido calor e mantida a pressão constante, a massa do líquido vai se aquecer até que o estado 2 (líquido saturado) seja atingido. Ilustrado pelo arranjo cilindro-êmbolo 1 → 2.
- Na medida em que o fornecimento de calor continuar, o processo de vaporização se iniciará. A temperatura da água irá parar de aumentar e estacionará em um valor que dependerá da pressão imposta, até que todo o líquido contido seja evaporado. Ilustrado pelo arranjo cilindro-êmbolo 2 → 3.



Mudança de fase líquido-vapor

- Quando toda a massa de líquido evaporar, o estado 3 será atingido, sendo chamado de vapor saturado.
- E qualquer aplicação futura de calor implicará em um aquecimento de vapor e, por isso, o estado 4 é chamado de vapor superaquecido. Ilustrado pelo arranjo cilindro-êmbulo 3 → 4.
- Note que o processo demonstrado pela linha 1 → 4 é isobárico.





Diagramas e modelo 3D

Mudança de fase líquido-vapor

- No processo de vaporização do exemplo anterior (2 → 3) a temperatura permaneceu inalterada, e seu valor dependia da pressão.
- A relação funcional entre temperatura e vapor recebe o nome de *curva de pressão de vapor* ou *curva de saturação*. Essa relação é geralmente fornecida na forma gráfica, analítica ou de tabela. O gráfico ao lado indica essa curva para a água.
- Tabelas de vapor indicam a curva de pressão de vapor para a água para misturas líquido-vapor, tendo como dado de entrada a temperatura ou pressão.

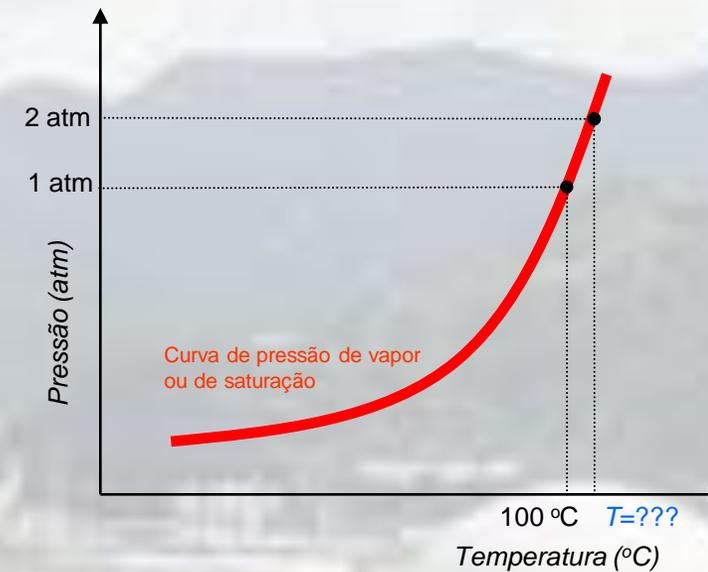


Tabela de saturação

Pressão (atm)	Temperatura (°C)
1	100
2	~120

Tabela de Saturação do vapor de água

T °C	P kPa	Volume Específico m ³ /kg			Entalpia Específica kJ/kg			T °C
		v_L	v_{LV}	v_V	h_L	h_{LV}	h_V	
0,01	0,6113	0,00100	206,14	206,14	0,01	2501,4	2501,4	0,01
5	0,8721	0,00100	147,12	147,12	20,98	2489,6	2510,6	5
10	1,2276	0,00100	106,38	106,38	42,01	2477,8	2519,8	10
15	1,7051	0,00100	77,93	77,93	62,99	2465,9	2528,9	15
20	2,339	0,00100	57,79	57,79	83,96	2454,1	2538,1	20
25	3,169	0,00100	43,36	43,36	104,89	2442,3	2547,2	25
30	4,246	0,00100	32,89	32,89	125,79	2430,5	2556,3	30
35	5,628	0,00101	25,22	25,22	146,68	2418,6	2565,3	35
40	7,384	0,00101	19,52	19,52	167,57	2406,7	2574,3	40
45	9,593	0,00101	15,26	15,26	188,45	2394,8	2583,2	45
50	12,349	0,00101	12,03	12,03	209,33	2382,8	2592,1	50
55	15,758	0,00101	9,567	9,568	230,23	2370,7	2600,9	55
60	19,94	0,00102	7,670	7,671	251,13	2358,5	2609,6	60
65	25,03	0,00102	6,196	6,197	272,06	2346,2	2618,3	65
70	31,19	0,00102	5,041	5,042	292,98	2333,8	2626,8	70
75	38,58	0,00103	4,130	4,131	313,93	2321,4	2635,3	75
80	47,39	0,00103	3,406	3,407	334,91	2308,8	2643,7	80
85	57,83	0,00103	2,827	2,828	355,90	2296,0	2651,9	85
90	70,14	0,00104	2,360	2,361	376,92	2283,2	2660,1	90
95	84,55	0,00104	1,981	1,982	397,96	2270,1	2668,1	95
100	101,325	0,00104	1,672	1,6729	419,04	2257,1	2676,1	100
105	120,82	0,00105	1,418	1,4194	440,15	2243,7	2683,8	105
110	143,27	0,00105	1,209	1,2102	461,30	2230,2	2691,5	110
115	169,06	0,00106	1,036	1,0366	482,48	2216,5	2699,0	115
120	198,53	0,00106	0,891	0,8919	503,71	2202,6	2706,3	120
125	232,1	0,00107	0,770	0,7706	524,99	2188,5	2713,5	125
130	270,1	0,00107	0,667	0,6685	546,31	2174,2	2720,5	130
135	313,0	0,00108	0,581	0,5822	567,59	2159,7	2727,3	135
140	361,3	0,00108	0,508	0,5089	589,13	2144,8	2733,9	140
145	415,4	0,00109	0,445	0,4463	610,63	2129,7	2740,3	145

Exemplo

Usando as tabelas de vapor, determine os estados (líquido, sólido, vapor ou mistura líquido-vapor) da água para as seguintes condições:

- (a) $T = 25^\circ\text{C}$ e $P = 101,325 \text{ kPa}$ (pressão normal),
- (b) $T = 120^\circ\text{C}$ e $P = 101,325 \text{ kPa}$,
- (c) $T = 5^\circ\text{C}$ e $P = 0,8721 \text{ kPa}$

Solução:

Dica: esboce o diagrama T - v indicando a temperatura de saturação para a pressão indicada

- (a) Das tabelas para $T = 25^\circ\text{C}$ obtém-se $P_{sat} = 3,169 \text{ kPa}$. Como $P = 101,325 \text{ kPa} > P_{sat} \rightarrow$ estado líquido (comprimido);
- (b) Das tabelas para $T = 120^\circ\text{C}$ obtém-se $P_{sat} = 198,53 \text{ kPa}$. Como $P = 101,325 \text{ kPa} < P_{sat} \rightarrow$ estado vapor (superaquecido);
- (c) Das tabelas para $T = 5^\circ\text{C}$ obtém-se $P_{sat} = 0,8721 \text{ kPa}$. \rightarrow estado saturação líquido-vapor.

Título e volume específico na região de mudança de fase

Quando uma substância está na região de mudança de fase, define-se o **título** x como sendo a razão entre a massa de vapor presente e a massa total da substância. Isto é:

$$x = \frac{m_v}{m_T}$$

Propriedades médias como o volume específico da mistura líquido-vapor saturada são obtidas a partir do título. Isto é:

$$v = xv_V + (1 - x)v_L$$

onde, os índices “L” e “V” indicam líquido saturado e vapor saturado, respectivamente. São dados obtidos das tabelas de vapor saturadas. Na terminologia inglesa o título é chamado de “vapor quality”.

Exemplo de uso do título e volume específico

Sabendo que o título é 10% para o sistema de mistura líquido-vapor de água esquematizado ao lado, cuja temperatura medida vale 130 °C, pede-se:

- (a) Qual a pressão absoluta do sistema que é indicada pelo instrumento (supondo que indique P_{abs});
- (b) O volume específico somente da fase vapor;
- (c) O volume específico somente da fase líquida;
- (d) O volume específico (médio) do sistema.

Solução:

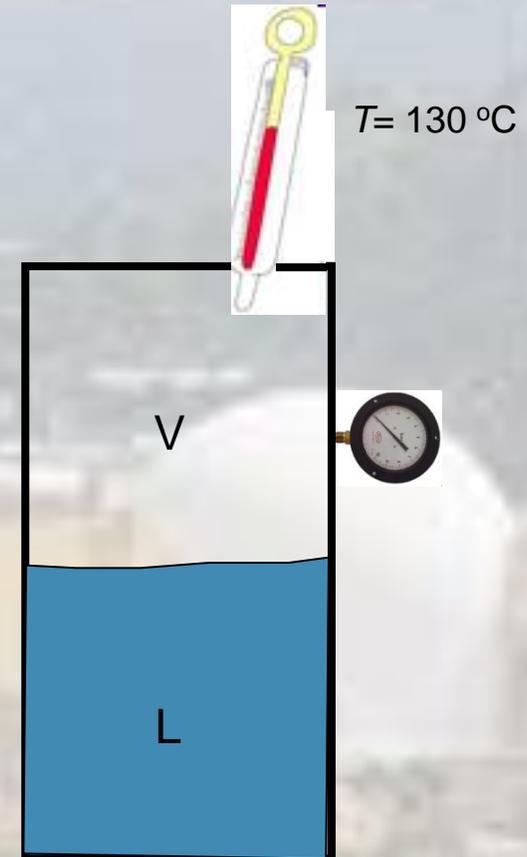
• Da tabela de saturação $p/ T = 130 \text{ °C}$, $P_{sat} = 270,1 \text{ kPa}$;

(b) Da mesma tabela, $v_V = 0,6685 \text{ m}^3/\text{kg}$;

(c) Ainda da mesma tabela, $v_L = 0,00107 \text{ m}^3/\text{kg}$;

(d) O volume específico (médio) da mistura é obtido usando a expressão anterior, ou seja:

$$v = xv_V + (1-x)v_L = 0,1 \times 0,6685 + (1-0,1) \times 0,00107 = 0,06781 \text{ m}^3 / \text{kg}$$



Outro exemplo de uso do título e volume específico

Com relação ao exemplo anterior, suponha que o volume do tanque seja de $0,5 \text{ m}^3$. Então, pede-se:

- (a) A massa total de água contida no sistema;
- (b) A massa de vapor de água e o volume ocupado pela fase de vapor;
- (c) A massa de líquido e o volume ocupado pela fase líquida;

Solução:

(a) Sabendo que $v = 0,06781 \text{ m}^3/\text{kg}$, então $v = \frac{V}{m} \Rightarrow m = \frac{V}{v} = \frac{0,5}{0,06781} = 7,374 \text{ kg}$

(b) Da definição do título, vem $x = \frac{m_v}{m} \Rightarrow m_v = x \times m = 0,1 \times 7,37 = 0,737 \text{ kg}$

$$\text{e } V_v = v_v \times m_v = 0,493 \text{ m}^3$$

(c) A massa de líquido é a diferença entre a massa total e a de vapor, isto é:

$$m_L = m - m_v = 7,374 - 0,737 = 6,637 \text{ kg} \quad \text{e} \quad V_L = V - V_v = 0,5 - 0,493 = 0,007 \text{ m}^3$$

Nota: tente fazer o cálculo dos volumes das fases pela definição de volume específico.

Diagrama completo da água

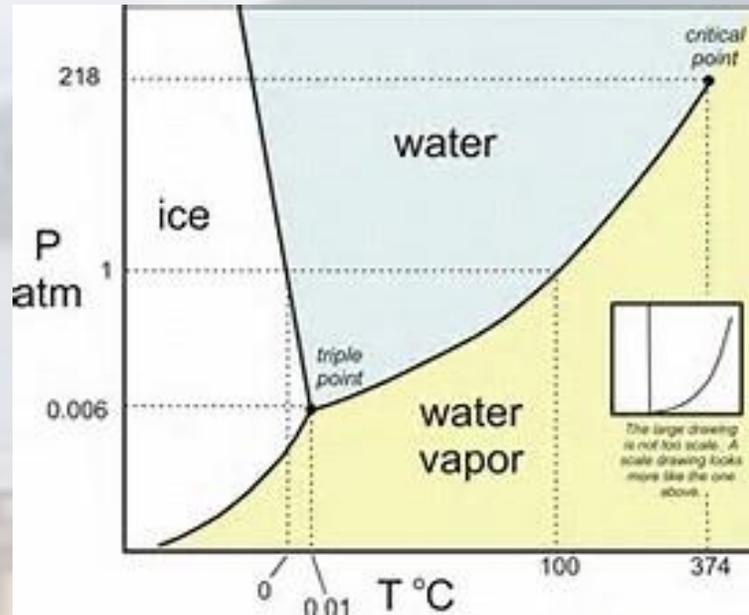
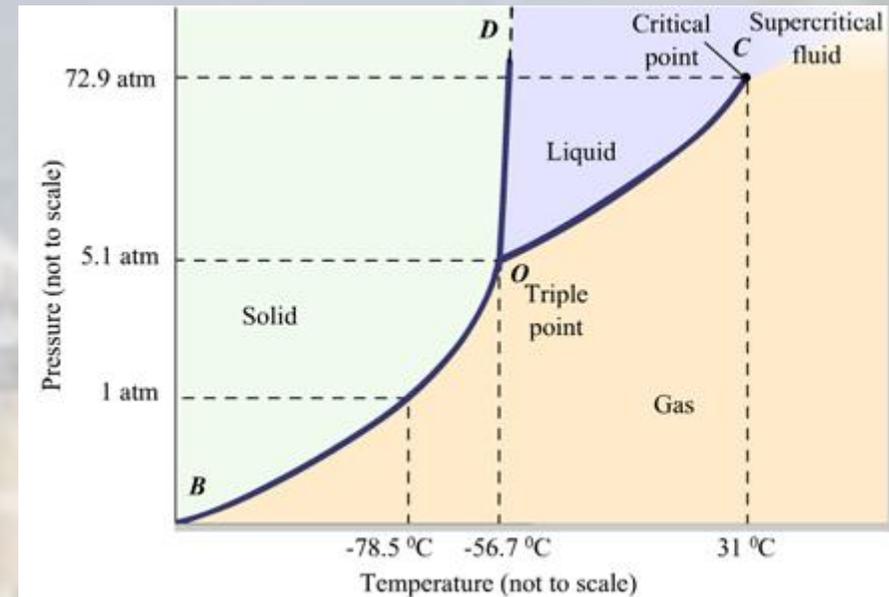


Diagrama completo do CO₂



Experimento da Danfoss com CO₂ nas três fases e pontos crítico e triplo

<https://youtu.be/zu-S1GxmKCo>