

TERMODINÂMICA

CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

R. Sobral

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

rodolfo.sobral@cefet-rj.br

Ementa

- 1 Informações
 - Informações Gerais
- 2 Breve Revisão
 - Cálculo Vetorial e Tensorial
- 3 Conceitos Básicos
 - Definições

Datas Importantes

Todas as datas importantes estão atualizadas no seguinte link:

`rodolfosobral.wixsite.com/rodolfosobral`

Aulas subsequentes a avaliações serão destinadas a vista de prova

**Repositiva apenas aos faltosos*

Normas

- Notas de Aula não substituem em **hipótese alguma** os livros texto;
- Uso de celular ou outro meio semelhante será proibido durante as avaliações;
- Tempo de duração das avaliações será de 1:40 minutos;
- Não será permitido a utilização de formulários.
- Permite-se a utilização de calculadora.

Não será fornecido formulário nas avaliações, visto que as equações devem ser deduzidas tal qual em sala de aula. As equações não demonstradas são empíricas.

Bibliografia Recomendada

[I] MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N., “Princípios de Termodinâmica para Engenharia”, LTC.;

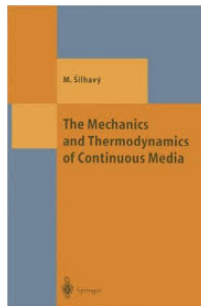
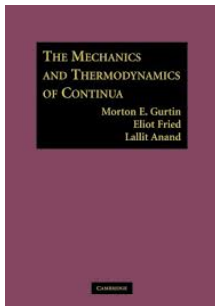
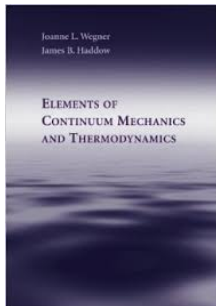
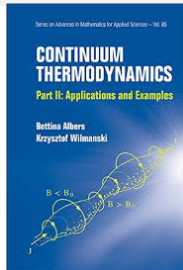
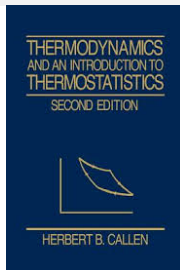
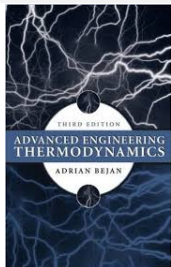
[II] MORAN, M. J. et al.; “Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos”, LTC;

[III] BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E., “Fundamentos da Termodinâmica”, Edgard Blucher.;

[IV] ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A., “Termodinâmica”, Bookman/McGraw-Hill;

[V] POTTER, M. C.; SCOTT, E. P., “Termodinâmica”, Thomson;

Vasta Bibliografia



Programa do Curso - Avaliação 01

- Breve Revisão
- Lei Zero da Termodinâmica
- Trabalho e Calor
- 1º Lei da Termodinâmica
- 2º Lei da Termodinâmica
- Substâncias Puras

Programa do Curso - Avaliação 02

- 3º Lei da Termodinâmica
- Geração de Entropia e Destruição de Exergia
- Ciclos de Potência
- Ciclos de Refrigeração
- Psicrometria
- Relações Termodinâmicas

Avaliação Final

Aos moldes da Avaliação 01 e 02, sendo obrigatória apenas aos discentes com média menor do que 7,0.

Avaliação Repositiva e Final conterão todo o conteúdo do curso.

Ementa

- 1 Informações
 - Informações Gerais
- 2 Breve Revisão
 - Cálculo Vetorial e Tensorial
- 3 Conceitos Básicos
 - Definições

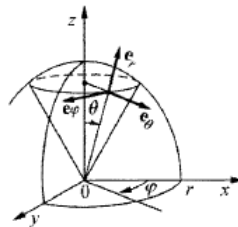
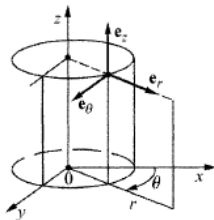
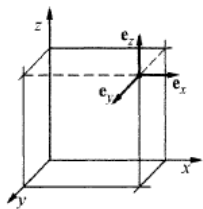
Breve Revisão - Cálculo Vetorial e Tensorial

- Escalares, Vetores e Tensores
- Forças de Superfície
- Delta de Kronecker
- Produto Interno
- Produto Vetorial
- Produto Tensorial
- Operador ∇
- Derivada Substancial
- Teorema de Gauss e Stokes
- Superfícies

Sistemas de Coordenadas

Os sistemas de coordenadas se dividem em três tipos, cada qual com aplicação específica a certos tipos de problemas.

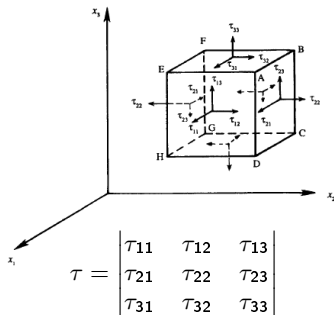
- Coordenadas Cartesianas (x, y, z)
- Coordenadas Cilíndricas (r, θ, z)
- Coordenadas Esféricas (r, θ, φ)



→ Revisar relações paramétricas ←

Escalares, Vetores e Tensores

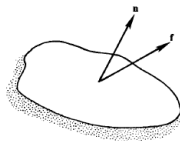
Em termodinâmica é preciso representar diversas grandezas com diferentes complexidades. Algumas grandezas são definidas através de apenas um componente, independente do sistema de coordenadas e são chamados escalares (ρ e T). Algumas outras são definidas por até três componentes e são chamadas de vetores ($\mathbf{x}$ e $\mathbf{v}$), mas certas outras variáveis denominadas tensores podem necessitar de mais do que três componentes para que haja descrição completa ($\boldsymbol{\tau}$ e $\mathbf{D}$).



Forças de Superfície

Área de superfície possui magnitude e orientação, portanto deve ser tratada como um vetor. A orientação da superfície é convenientemente especificada pela direção de um vetor unitário normal à superfície. Se $d\mathbf{A}$ é a magnitude de um elemento da superfície e $\mathbf{n}$ é o vetor normal à superfície, então a área de superfície pode ser representada como:

$$d\mathbf{A} = \mathbf{n}dA$$



Delta de Kronecker

Sendo e_1 , e_2 e e_3 base de vetores ortonormais, ou seja, ortogonais de norma unitária no espaço euclidiano respeitando-se as seguintes propriedades:

$$e_1 \cdot e_1 = 1$$

$$e_1 \cdot e_2 = 0$$

$$e_1 \cdot e_3 = 0$$

$$e_2 \cdot e_1 = 0$$

$$e_2 \cdot e_2 = 1$$

$$e_2 \cdot e_3 = 0$$

$$e_3 \cdot e_1 = 0$$

$$e_3 \cdot e_2 = 0$$

$$e_3 \cdot e_3 = 1$$

$$e_i \cdot e_j = \delta_{ij} \text{ (Delta de Kronecker)}$$

$$e_i \cdot e_j = 1, \text{ se } i = j$$

$$e_i \cdot e_j = 0, \text{ se } i \neq j$$

Produto Interno

O produto interno de dois vetores $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ é definido como o escalar

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{u} = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3 = \sum u_i v_i$$

Fica claro que $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{v}\| \cos \theta$, sendo u e v as normas eulerianas dos vetores e θ o ângulo entre eles. O produto interno é portanto a magnitude daquele vetor multiplicado pela componente deste na direção do primeiro.

Claramente, o produto interno $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}$ é igual a soma dos termos da diagonal do tensor $u_i \cdot v_j$.

$$\|\mathbf{u}\| \equiv (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})^{.5}$$

$$\left\langle f(z), g(z) \right\rangle = \int_z f(z) g(z) dz$$

Produto Vetorial

O produto vetorial entre os vetores $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$ é definido como vetor $\mathbf{w}$ cuja magnitude é:

$$\|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{v}\| \sin\theta$$

com direção resultante perpendicular ao plano de $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$.

Claramente, $\mathbf{u} \times \mathbf{v} = -\mathbf{v} \times \mathbf{u}$ e os vetores unitários obedecem a regra da mão direita, tal qual $\mathbf{a}^1 \times \mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^3$.

Produto Tensorial

Um tensor de segunda ordem T é uma transformação que associa a cada vetor v do $\mathbb{R}^n$ dado por $w = Tv$, satisfazendo às seguintes regras:

$$T(u + v) = Tu + Tv$$

$$T(\alpha v) = \alpha(Tv)$$

Dois vetores a e b de mesma dimensão definem o tensor de segunda ordem $a \otimes b$ a partir da regra abaixo:

$$(a \otimes b)v = a(b.v)$$

Componentes de um tensor de segunda ordem na base cartesiana retangular são:

$$T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 T_{\langle ij \rangle} e_{\langle i \rangle} \otimes e_{\langle j \rangle}$$

Operador ∇

Operador vetorial de Hamilton, também descrito por nabla, está representado nos diferentes tipos de sistemas de coordenadas:

$$\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} e_i$$

$$\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + e_\varphi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

O gradiente de um escalar é um vetor, orientado no sentido em que a variação da função f é máxima

Operador ∇

O gradiente de velocidades terá nove elementos como mostra:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix} \rightarrow \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$

A ação do operador gradiente sobre uma função f resulta em uma grandeza de ordem mais elevada, como mostra:

f	$\text{grad} f$
escalar (tensor de ordem zero)	vetor (tensor de ordem unitária)
vetor (tensor de ordem unitária)	matriz (tensor de ordem dois)

Operador ∇ .

O operador divergente reduz a ordem de um tensor sobre o qual atua. Assim, o divergente de um vetor é um escalar, de um tensor de segunda ordem é um tensor de primeira ordem. Sendo os vetores $\mathbf{v}$ e $\mathbf{q}$:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot (v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{q} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{q} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 q_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (q_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial q_\varphi}{\partial \varphi}$$

Derivada Substancial

Esse operador, quando aplicado a uma propriedade de uma partícula de fluido em movimento, com velocidade $\mathbf{v}$, fornece como resultado a derivada total em relação ao tempo da propriedade daquela partícula em movimento. Consideremos a componente v_x da velocidade da partícula de fluido. Temos que $v_x = v_x(t, x(t), y(t), z(t))$. A derivada total de v_x em relação ao tempo é dada por:

$$\frac{Dv_x}{Dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

Observando que dx/dt , dy/dt e dz/dt são as componentes de velocidade v_x , v_y e v_z , a equação pode ser escrita:

$$\frac{Dv_x}{Dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} v_x$$

Derivada Substancial

Logo tem-se para derivada substancial:

$$\frac{D}{Dt} v_x = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} \right) v_x$$

Para notação de índices ou tensorial cartesiana:

$$\frac{Dv_x}{Dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_x}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_x}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_x}{\partial x_3} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial}{\partial x_j} v_x$$

Derivada Substancial

Omitindo-se o sinal de somatório devido sua redundância, tem-se:

$$\frac{Dv_x}{Dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j} v_x = \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) v_x$$

Finalmente o operador substancial é definido como:

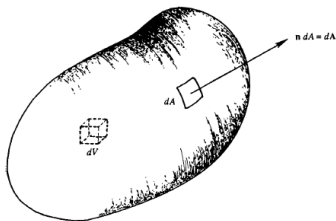
$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}$$

Em notação tensorial cartesiana:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j}$$

Teorema de Gauss

Seja V um volume limitado por uma superfície fechada A . Considere um elemento de superfície infinitesimal dA , sendo $\mathbf{n}$ vetor normal unitário exterior. O vector $\mathbf{n}dA$ de magnitude dA e direção $\mathbf{n}$ pode ser escrito como $d\mathbf{A}$. Para $Q(x)$ campo escalar, vetorial ou tensorial de qualquer ordem, tem-se:



Teorema de Gauss

$$\int_V \frac{\partial Q}{\partial x_i} dV = \int_A dA_i Q$$

Q sendo vetor, o teorema fica:

$$\int_V \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} dV = \int_A dA_i Q_i$$

denominado de Teorema da Divergência de Gauss, em notação vetorial:

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{Q} dV = \int_A d\mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}$$

Teorema de Gauss

Considerado-se o limite para volume infinitesimal e generalizando o campo derivativo Q tem-se:

$$\mathcal{D}Q = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_A dA_i \cdot Q$$

Tal propriedade abrange gradiente, divergente e rotacional de escalares, vetores e tensores Q :

$$\text{div}Q = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_A dA \cdot Q$$

$$\text{rot}Q = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_A dA \times Q$$

Rotacional

$$\text{rot} \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v}$$

$$\text{rot} \mathbf{v} = \det \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{pmatrix}$$

- Coordenadas Cartesianas

$$\left[\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] \mathbf{i} + \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right] \mathbf{j} + \left[\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right] \mathbf{k}$$

- Coordenadas Cilíndricas

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right] \mathbf{e}_r + \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] \mathbf{e}_\theta + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \mathbf{e}_z$$

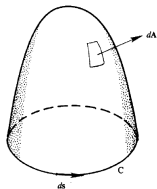
- Coordenadas Esféricas

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right] \mathbf{e}_r + \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] \mathbf{e}_\theta + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \mathbf{e}_z$$

Teorema de Stokes

O teorema de Stokes estabelece que o fluxo do rotacional de um vetor $\mathbf{u}$ através de uma superfície A é igual à integral de linha da projeção da velocidade sobre a tangente à curva C que limita a superfície considerada. Essa propriedade se expressa por:

$$\int_A (\nabla \times \mathbf{u}) \cdot d\mathbf{A} = \int_C \mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}$$



Superfícies

Qualquer superfície S , subconjunto da superfície ∂R que representa a fronteira da região tridimensional R , pode ser representada pela relação biparamétrica $(x, y, z) = \mathbf{f}(u, v)$, sendo u e v parâmetros independentes.

Superfícies

Sendo u e v parâmetros independentes e sendo $(x, y, z) = \mathbf{f}(u, v)$ diferenciável em relação a esses parâmetros, podemos caracterizar um vetor normal num ponto genérico sobre a superfície a partir do produto vetorial abaixo:

$$\mathbf{N} = \frac{\partial}{\partial u} [\mathbf{f}(u, v)] \times \frac{\partial}{\partial v} [\mathbf{f}(u, v)]$$

Superfícies

O elemento diferencial de superfície que integrado sobre S fornece a área desta superfície dada por

$$dS = \| \mathbf{N} \| dudv = \left\| \frac{\partial}{\partial u} [\mathbf{f}(u, v)] \times \frac{\partial}{\partial v} [\mathbf{f}(u, v)] \right\| dudv$$

Superfícies

O vetor normal unitário exterior à região R dado por

$$\mathbf{n} = \pm \frac{\mathbf{N}}{\|\mathbf{N}\|}$$

no qual a opção entre "+" ou menos "-" será feita de tal maneira que, em cada ponto sobre S , $\mathbf{n}$ aponte "para fora" da região R .

Exemplo de parametrização de uma casca esférica definida por $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$

$$x = r \cos v \operatorname{senu}$$

$$y = r \operatorname{senv} \operatorname{senu}$$

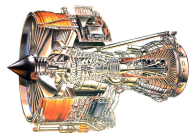
$$z = r \cos u$$

$$\text{com } 0 \leq v \leq 2\pi \text{ e } 0 \leq u \leq \pi$$

Ementa

- 1 Informações
 - Informações Gerais
- 2 Breve Revisão
 - Cálculo Vetorial e Tensorial
- 3 Conceitos Básicos
 - Definições

O que é Termodinâmica?



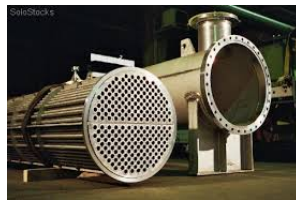
Características

União das palavras gregas **thérme** e **dýnamis** (calor e força).

- Descreve propriedades macroscópicas de um sistema em equilíbrio;
- Constituída sumariamente por 4 lei básicas;

Exemplo de Aplicações

- Geração de Energia e Equipamentos



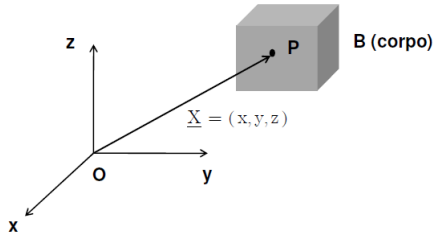
Hipótese do Meio Contínuo

Fluidos ou qualquer outro tipo de matéria são compostos de um grande número de moléculas em constante movimento, ou seja, a matéria é descontínua, discreta em escala microscópica. A descrição em nível molecular faz-se através de técnicas da mecânica estatística.

Para fins de engenharia, a termodinâmica clássica trabalha com descrições macroscópicas, negligenciando o fato de que as substâncias reais são compostas de moléculas discretas.

Consequência da Hipótese do Meio Contínuo

As propriedades do meio são consideradas como tendo um valor definido em cada ponto do espaço, podendo ser descritas como funções contínuas posição espacial e tempo. Estas funções são conhecidas como campos e podem ser escalares, vetoriais e tensoriais.

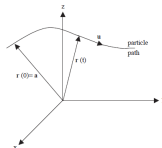


Descrição Euleriano e Lagrangiana

Existem dois modos de descrição do movimento do fluido.

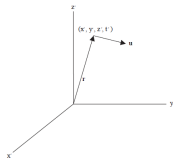
- Descrição Lagrangiana

Histórico individual da partícula fluida.



- Descrição Euleriana

Campo de escoamento, foco nas propriedades do escoamento num determinado ponto espacial como função temporal. As propriedades do campo são descritas como funções das coordenadas espaciais e tempo, geralmente utilizado na descrição de meios contínuos.



Definições

Sistema Parte do Universo a ser estudada (Quantidade fixa e identificável);

Vizinhança Restante do Universo;

Contorno Superfície que separa o sistema da vizinhança;

Universo Combinação de sistema e vizinhança.



Sistemas

- Aberto** Massa e energia podem transitar livremente entre sistema e vizinhança;
- Fechado** Energia pode transitar entre sistema e vizinhança, porém **massa não**;
- Isolado** Nem massa nem energia transitam entre sistema e vizinhança.

Descrição de Sistemas

- Conhecer as propriedades macroscópicas : p , T , V , n , m , ...;
- Condição do sistema (Homogêneo ou Heterogêneo) ;
- Se está em condição de equilíbrio;
- Número de componentes.

Tipos de propriedades - Point Functions

Extensiva Depende do *tamanho* (massa e n^o de moles) do sistema

$$(n, m, V, \dots)$$

Intensiva Independe do *tamanho* do sistema

$$(T, p, \bar{V} = \frac{V}{n}, \dots)$$

Específicas Propriedades extensivas por unidade de massa.

$$\nu = \frac{V}{m}$$

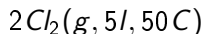
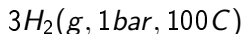
Propriedades específicas são intensivas

Estado de Equilíbrio de Sistemas

- I Definido pela coleção das propriedades macroscópicas denominadas variáveis de estado ($p, n, T, V, \dots$), independente do caminho percorrido até o equilíbrio.
- II Para sistema com um componente, requer "n" e 2 variáveis. Tendo-se as outras propriedades definidas na forma:

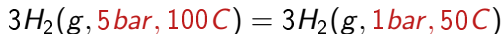
$$V = f(n, p, T) \quad \text{ou} \quad p = g(n, V, T)$$

- III Notação:

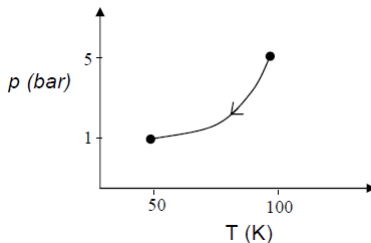


Mudança de Estado

I Notação:



II Caminho: Sequência de estados intermediários



Mudança de Estado

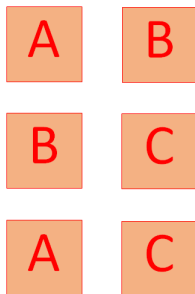
- III Processo: Descreve o caminho percorrido
 - a Reversível (sempre em equilíbrio)
 - b Irreversível (define a direção no tempo)
 - c Adiabático (não há transferência de calor entre sistema e vizinhança)
 - d Isobárico (pressão constante)
 - e Isotérmico (temperatura constante)
 - f Isocórico (volume constante)
 - g Isoentálpico (entalpia constante)
 - h Regime permanente (propriedades constantes no t)
 - i Regime transiente (propriedades variáveis no t)

Equilíbrio Térmico

Quando um corpo quente entra em contato com outro frio, calor flui do corpo quente para o corpo frio. Tal processo persiste até que haja equilíbrio térmico, neste ponto diz-se que ambos os corpos possuem a mesma "temperatura". Tal ideia compõe a **Lei "0" da Termodinâmica** e é representada através de termômetros e escalas termométricas.

Lei "0" da Termodinâmica

Se **A** e **B** estão em equilíbrio térmico e **B** e **C** estão em equilíbrio térmico, portanto conclui-se que **A** e **C** também estarão em equilíbrio térmico.



B age como um termômetro estando **A**, **B** e **C** todos a mesma "temperatura".

Temperatura

Necessita de:

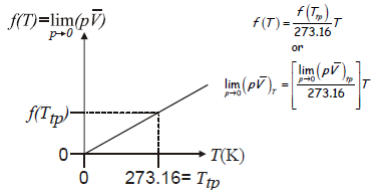
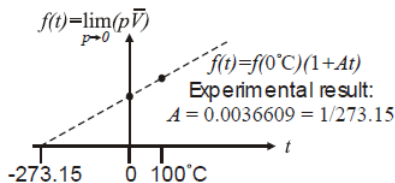
- I Substância;
- II Propriedades dependentes de T ;
- III Pontos de referência;
- IV Esquema de interpolação entre pontos de referência.

Temperatura

Termômetro de gás ideal com escala Celsius baseado na lei de Boyle.

$$\lim_{p \rightarrow 0} (p\bar{V})_T = \text{constante} = f(T)$$

Sendo os pontos de referência para fusão e evaporação fixos a 0°C e 100°C, tem-se a seguinte interpolação linear:



Note que $T = -273,15^\circ\text{C}$ é chamado de zero absoluto, tal procedimento define a escala absoluta (Kelvin), sendo $T = 273 \text{ K}$ o ponto triplo da água.

Gases Ideais

Para Lei de Boyle e escala Kelvin:

$$\lim_{p \rightarrow 0} (p\bar{V})_T = \left[\frac{\lim_{p \rightarrow 0} (p\bar{V})_T}{273.15} \right] \cdot T \equiv R \cdot T$$

válido para todos os gases ($p \rightarrow 0$)

Um gás ideal (sem interação molecular) obedece a expressão $p\bar{V} = RT$ para qualquer pressão.

$$R = \left[\frac{\lim_{p \rightarrow 0} (p\bar{V})_T}{273.15} \right] = 8.31451 \frac{J}{K.mol}$$

Gás constante

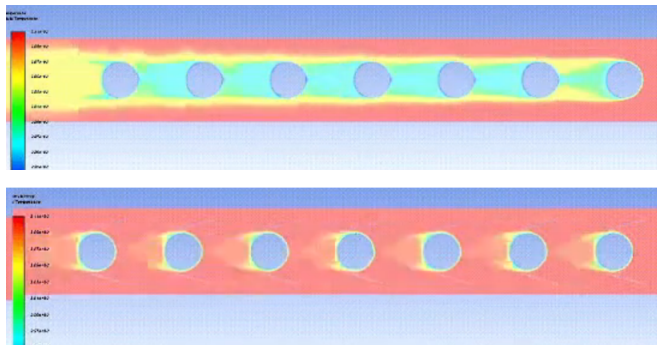
Resumindo ...

Geradores de vórtice são dispositivos comumente conhecidos por seus efeitos aerodinâmicos (C_{lift} e C_{drag}), atualmente tem sido utilizados também em sistemas termomecânicos no intuito de aprimoramento da transferência de calor mediante aumento na turbulência do escoamento.

Recapitulando ...

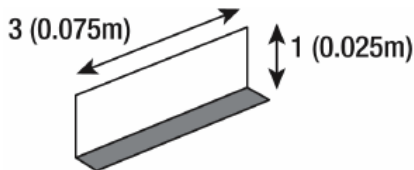


Recapitulando ...



Recapitulando ...

A respeito do vórtice de Karman oriundo da inserção de um gerador de vórtice retangular em uma tubulação cilíndrica, determine o rotacional num escoamento com $\mathbf{v} = -y\mathbf{i} + x\mathbf{j}$.



Recapitulando ...

Vídeo 01

Vídeo 02

Someone's sitting in the shade today because someone planted a tree a long time ago

Warren Buffett