

EM313

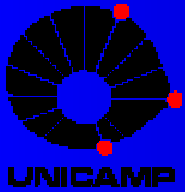
Termodinâmica I

2002



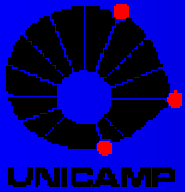
Avaliação

- Serão realizadas duas provas, com duração de 2 horas.
- É permitida a consulta a livros durante as provas.
- As provas serão realizadas nas seguintes datas:
- Primeira Prova: 26/09/2002
- Segunda Prova: 28/11/2002
- Serão também realizados testes semanais, com duração de 20 minutos, sem consulta.



Avaliação

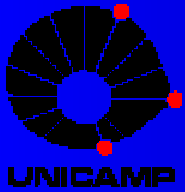
- Cada uma das duas provas terá peso de 33% na média final.
- A média da nota dos testes terá peso de 33% na determinação da média.



Bibliografia

Moran, M., Shapiro, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** New York: John Wiley.

Van Wylen, G.J., Sonntag, R. **Fundamentos de Termodinâmica Clássica.** São Paulo: Edgard Blücher.



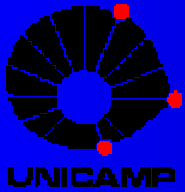
Internet

- **Página da disciplina**

www.fem.unicamp.br/~em313

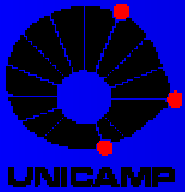
- **Correio eletrônico**

llagost@fem.unicamp.br



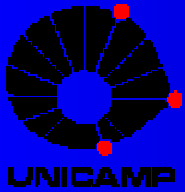
Introdução

- Princípios Básicos
 - Termodinâmica
 - Mecânica dos Fluidos
 - Transferência de Calor
- Unidades



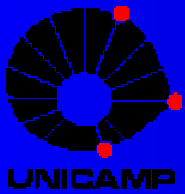
Termodinâmica

- Sistemas térmicos envolvendo calor e trabalho
- Ciclos motores e de refrigeração
- Propriedades das substâncias
- Análise de Sistemas
- Primeira Lei da Termodinâmica
- Segunda Lei da Termodinâmica
- Análise de volumes de controle
- Ciclos motores
- Ciclos de refrigeração



Mecânica dos Fluidos

- Transporte de energia por meio de fluidos
- Perda de carga em tubulações
- Potência de bombeamento
- Tipos de escoamentos
- Regime permanente
- Propriedades dos fluidos
- Efeitos da viscosidade



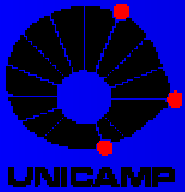
Mecânica dos Fluidos

- Campo de velocidades
- Aceleração

$$\vec{V} = \vec{i}u + \vec{j}v + \vec{k}w$$

$$\vec{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

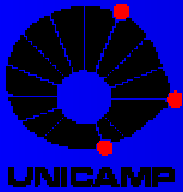
$$\vec{a} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial\vec{V}}{\partial z}$$



Mecânica dos Fluidos

- Tensão de Cisalhamento Viscoso

$$\tau_x = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$



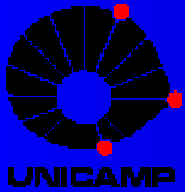
Transferência de Calor

- Condução
 - lei de Fourier
- Convecção
 - lei de Newton
 - convecção natural
 - convecção forçada
- Radiação Térmica
 - lei de Stefan-Boltzmann

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{W}]$$

$$\dot{Q} = hA(T_p - T_\infty) \quad [\text{W}]$$

$$\dot{Q} = \sigma A_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W}]$$



Unidades

- Sistema Internacional de Unidades (SI)
 - dimensões fundamentais
 - comprimento
 - massa
 - tempo
 - temperatura
 - corrente elétrica

Unidades Fundamentais do SI

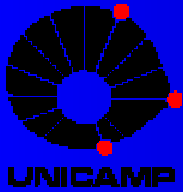
Grandeza Fundamental	Unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Temperatura	kelvin	K
Corrente elétrica	ampere	A

Unidades Derivadas do SI

Grandeza Derivada	Unidade	Símbolo	Relações
Força	newton	N	m kg/s^2
Pressão ou Tensão	pascal	Pa	N/m^2
Energia	joule	J	N m
Potência	watt	W	J/s
Carga elétrica	coulomb	C	A s
Potencial elétrico	volt	V	W/A
Resistência elétrica	ohm	Ω	V/A

Prefixos de Unidades no SI

Fator de Multiplicação	Nome do Prefixo	Símbolo do Prefixo
10^{-12}	pico	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	micro	u
10^{-3}	mili	m
10^3	kilo	k
10^6	mega	M
10^9	giga	G
10^{12}	tera	T

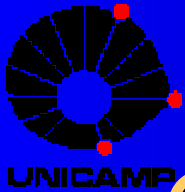


Conceitos Termodinâmicos

Termodinâmica Clássica

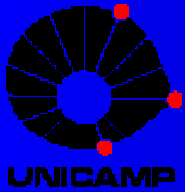
Conceitos básicos

- Sistema - objeto de estudo; fixo ou móvel, rígido ou deformável, fechado ou aberto.
- Fronteira - superfície que define o sistema; fixa ou móvel, rígida ou deformável, fechada ou aberta, isolante ou condutora de calor.
- Meio - tudo que é externo ao sistema.



Conceitos Termodinâmicos

- Propriedade - característica observável do sistema.
- Estado - condição em que se encontra o sistema, caracterizada pelo conjunto de propriedades do mesmo.
- Processo - mudança de um estado para outro.



Conceitos Termodinâmicos

- Ciclo termodinâmico - sucessão de processos por meio dos quais o sistema retorna ao estado inicial.
- Equilíbrio termodinâmico - condição em que o sistema não sofre mudanças espontâneas, mesmo submetido a pequenas perturbações.

Propriedades extensivas de um sistema

Propriedade	Símbolo	Unidade SI
• massa	m	kg
• volume	V	m ³
• energia	E	J
• energia interna	U	J
• entalpia	H	J
• entropia	S	J/K

entalpia:

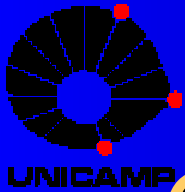
$$H = U + P V \quad [J]$$

Propriedades intensivas de um sistema

Propriedade	Símbolo	Unidade SI
• massa específica	ρ	kg/m^3
• volume específico	v	m^3/kg
• energia específica	e	J/kg
• energia interna esp.	u	J/kg
• entalpia específica	h	J/kg
• entropia específica	s	$\text{J}/(\text{kg K})$
• pressão	P	Pa
• temperatura	T	K

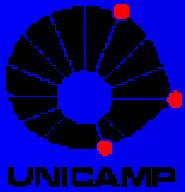
Pressão e Temperatura

- pressão absoluta
 - pressão atmosférica
 - pressão relativa ou manométrica
 - vácuo (relativo)
-
- temperatura termométrica ($^{\circ}\text{C}$ - celsius)
 - temperatura absoluta (K - kelvin)



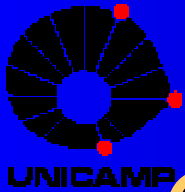
Conceitos Termodinâmicos

- Processo reversível - aquele que pode ser revertido de modo completo sem causar alterações no meio.
- Irreversibilidade - qualquer fenômeno dissipativo que impossibilite a reversibilidade de um processo (não-equilíbrio, atritos, efeito Joule).



Conceitos Termodinâmicos

- Calor - interação do sistema com o meio na qual ocorre transferência de energia associada a diferenças de temperatura, sem transporte de massa.
- Trabalho - interação do sistema com o meio na qual ocorre transferência de energia não associada a diferenças de temperatura e sem transporte de massa.

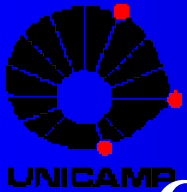


Conceitos Termodinâmicos

Convenção de sinais

- calor recebido pelo sistema: positivo
- calor transferido pelo sistema: negativo

- trabalho realizado pelo sistema: positivo
- trabalho recebido pelo sistema: negativo



Calor

- calor no processo 1-2:

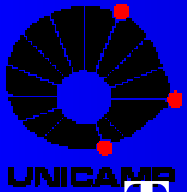
$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q \quad [\text{J}]$$

- calor por unidade de massa:

$$q_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{m} \quad [\text{J/kg}]$$

- taxa de transferência de calor:

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \quad [\text{W}]$$



Trabalho

- trabalho no processo 1-2:

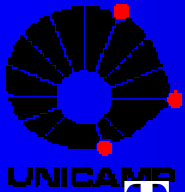
$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W \quad [\text{J}]$$

- trabalho por unidade de massa:

$$w_{1-2} = \frac{W_{1-2}}{m} \quad [\text{J/kg}]$$

- potência:

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} \quad [\text{W}]$$



Trabalho Mecânico

- trabalho de uma força:

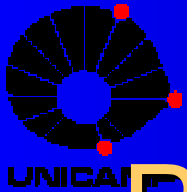
$$W_{1-2} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{S} \quad [J]$$

- trabalho de expansão:

$$W_{1-2} = \int_1^2 P \vec{A} \cdot d\vec{S} = \int_1^2 P dV \quad [J]$$

- trabalho de rotação:

$$W_{1-2} = \int_1^2 \vec{\tau} \cdot d\vec{\theta} \quad [J]$$

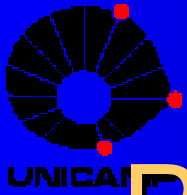


Propriedades das Substâncias

Definições

- substância pura
- substância simples compressível
- princípio de estado:

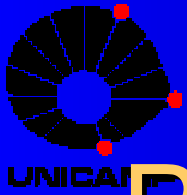
$$N_{\text{prop. ind.}} = N_{\text{formas}} W_{\text{rev}} + 1$$



Propriedades das Substâncias

Equilíbrio de Fases

- sólido
- líquido
- vapor
- regiões de saturação (P_{sat} , T_{sat}):
 - sólido + líquido
 - líquido + vapor
 - sólido + vapor
 - ponto triplo: sólido + líquido + vapor



Propriedades das Substâncias

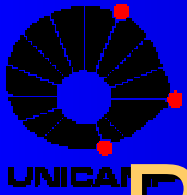
- Diagrama temperatura - volume
 - título de uma mistura líquido-vapor “x”:

$$x = \frac{m_{\text{vap.sat.}}}{m_{\text{líq.sat.}} + m_{\text{vap.sat.}}}$$

$$m_{\text{vapor}} = x m_{\text{total}}$$

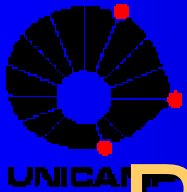
$$m_{\text{líquido}} = (1 - x) m_{\text{total}}$$

- ponto crítico: T_{cr} e P_{cr}



Propriedades das Substâncias

- Diagrama pressão - temperatura
- Diagrama pressão - volume específico
- Superfícies de
Pressão - Volume específico - Temperatura
- Tabelas de propriedades termodinâmicas
- Equações de estado



Propriedades das Substâncias

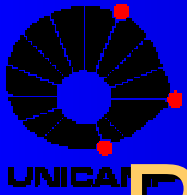
- Equação de estado do gás ideal

$$P V = n \bar{R} T \quad [\text{J}]$$

$$P v = \frac{1}{M_{\text{gás}}} \bar{R} T = R_{\text{gás}} T \quad [\text{J/kg}]$$

$$P \bar{v} = \bar{R} T \quad [\text{J/mol}]$$

$$\bar{R} = 8,31434 \quad [\text{J}/(\text{mol K})]$$

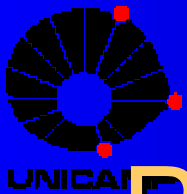


Propriedades das Substâncias

- Fator de compressibilidade

$$P \bar{v} = Z \bar{R} T \quad [\text{J/mol}]$$

$$Z = f(T_r, P_r), \quad \text{com} \quad T_r = \frac{T}{T_{cr}} \quad \text{e} \quad P_r = \frac{P}{P_{cr}}$$



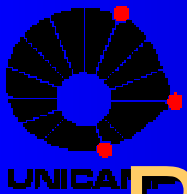
Propriedades das Substâncias

- Substância simples compressível
 - coeficiente de expansão volumétrica:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{p=\text{cte}} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p=\text{cte}} \quad [\text{K}^{-1}]$$

- compressibilidade isotérmica

$$\kappa = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_{T=\text{cte}} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{T=\text{cte}} \quad [\text{Pa}^{-1}]$$



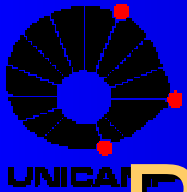
Propriedades das Substâncias

- Substância simples compressível
 - calor específico a volume constante:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_{v=\text{cte}} \quad [\text{J}/(\text{kg K})]$$

- calor específico a pressão constante:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_{p=\text{cte}} \quad [\text{J}/(\text{kg K})]$$



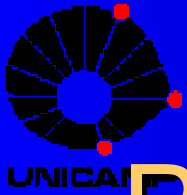
Propriedades das Substâncias

- Substância simples compressível
 - variação de energia interna específica $u(T,v)$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad [\text{J/kg}]$$

- variação de entalpia específica $h(T,p)$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dP \quad [\text{J/kg}]$$

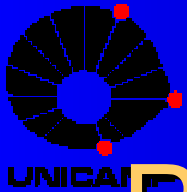


Propriedades das Substâncias

- Relações entre propriedades de gás ideal

$$u = u(T) \Rightarrow du = \left(\frac{du}{dT} \right) dT = c_v dT \quad [\text{J/kg}]$$

$$h = h(T) \Rightarrow dh = \left(\frac{dh}{dT} \right) dT = c_p dT \quad [\text{J/kg}]$$

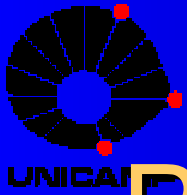


Propriedades das Substâncias

- Relações entre propriedades de gás ideal

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 du = \int_1^2 c_v dT \quad [\text{J/kg}]$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 dh = \int_1^2 c_p dT \quad [\text{J/kg}]$$



Propriedades das Substâncias

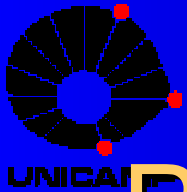
- Relações entre propriedades de gás ideal

$$h = u + Pv = u + R_{\text{gás}} T \quad [\text{J/kg}]$$

$$dh = du + R_{\text{gás}} dT$$

$$c_p dT = c_v dT + R_{\text{gás}} dT$$

$$c_p = c_v + R_{\text{gás}} \quad [\text{J}/(\text{kg K})]$$



Propriedades das Substâncias

- Processo adiabático para sistema

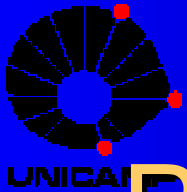
processo reversível: $\delta W = PdV$ [J]

processo adiabático: $\delta Q = 0$

gás ideal: $PV = mR_{\text{gás}}T$,

$du = c_v dT$, $dh = c_p dT$, $c_p - c_v = R_{\text{gás}}$

no caso: $-PdV = dU = mc_v dT = \frac{PV}{R_{\text{gás}}T} c_v dT$ [J]



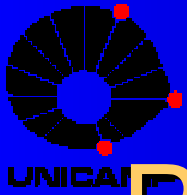
Propriedades das Substâncias

- Processo adiabático para sistema

$$-\frac{dV}{V} = \frac{c_v dT}{R_{\text{gás}} T} = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} \quad [\text{J}] \quad \text{pois} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow \frac{c_v}{R_{\text{gás}}} = \frac{1}{\gamma - 1}$$

$$\text{e} \quad \frac{dT}{T} = \frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} \Rightarrow -\gamma \frac{dV}{V} = \frac{dP}{P} \quad \text{e se} \quad \gamma = \text{cte} \Rightarrow PV^\gamma = \text{cte}$$

$$\text{Assim:} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma$$



Propriedades das Substâncias

- Trabalho em processo adiabático reversível para sistema contendo gás ideal

$$W_{1-2} = \int_1^2 P dV = PV^\gamma \int_1^2 \frac{1}{V^\gamma} dV$$

$$W_{1-2} = PV^\gamma \frac{V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}}{1-\gamma} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma}$$

Análise de Sistemas

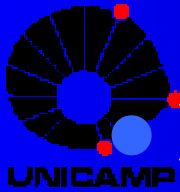
- Primeira Lei da Termodinâmica
 - conservação de energia

$$\delta Q - \delta W = dE \quad [J]$$

$$E = U + E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}}$$

$$dE = dU + dE_{\text{cin}} + dE_{\text{pot}}$$

$$E_{\text{cin}} = m \frac{v^2}{2} \quad \text{e} \quad E_{\text{pot}} = mgz$$



Primeira Lei da Termodinâmica

Para um processo qualquer :

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = (U_2 - U_1) + (E_{\text{cin}2} - E_{\text{cin}1}) + (E_{\text{pot}2} - E_{\text{pot}1}) \quad [\text{J}]$$

em termos de taxas :

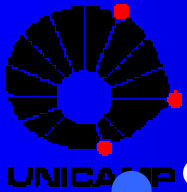
$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad [\text{W}]$$

não havendo variação da energia cinética nem potencial :

$$\text{forma diferencial: } \delta Q - \delta W = dU \quad [\text{J}]$$

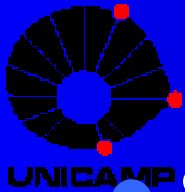
$$\text{forma de taxas: } \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \quad [\text{W}]$$

$$\text{forma integrada: } Q_{1-2} - W_{1-2} = U_2 - U_1 \quad [\text{J}]$$



● Segunda Lei da Termodinâmica

- sentido “natural” de processos:
 - processos dissipativos, envolvendo atrito
 - expansão livre de um gás ou vapor
 - transferência de calor
 - mistura de substâncias
 - reações químicas
- para a realização de tais processos no sentido oposto é necessária a ação de um agente externo
- a segunda lei estabelece uma distinção clara entre calor e trabalho

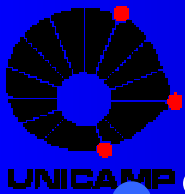


● Segunda Lei da Termodinâmica

– Enunciados Clássicos

- **Clausius:** É impossível construir um dispositivo que opere em ciclo termodinâmico e não produza outro efeito além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.

- **Kelvin-Planck:** É impossível construir um dispositivo que opere em ciclo termodinâmico e não produza outro efeito além da produção de trabalho e da troca de calor com um único “reservatório” térmico.



● Segunda Lei da Termodinâmica

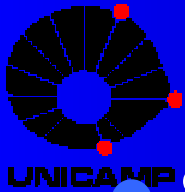
– Máquina Térmica:

- é um dispositivo que opera em ciclo termodinâmico e produz trabalho líquido positivo, recebendo calor de um reservatório térmico a alta temperatura e fornecendo calor para um reservatório térmico a baixa temperatura.

$$\text{Primeira Lei: } \oint \delta Q = \oint \delta W \quad [\text{J}]$$

$$\oint \delta Q = Q_A - |Q_B| = W_{\text{ciclo}} \quad [\text{J}]$$

$$\eta_t = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_A} = \frac{Q_A - |Q_B|}{Q_A} \quad \text{ou} \quad \eta_t = \frac{\dot{W}_{\text{ciclo}}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{Q}_A - |\dot{Q}_B|}{\dot{Q}_A}$$



● Segunda Lei da Termodinâmica

– Bomba Térmica:

- é um dispositivo que opera em ciclo termodinâmico, recebendo calor de um reservatório térmico a baixa temperatura, fornecendo calor para um reservatório térmico a alta temperatura, e para isso consome trabalho líquido.
- Refrigeradores: neste caso o efeito útil é o calor retirado do reservatório frio.
- Bombas de calor: neste caso o efeito útil é o calor fornecido ao reservatório quente.

Segunda Lei da Termodinâmica

– Bomba Térmica:

$$\text{Primeira Lei: } \oint \delta Q = \oint \delta W \quad [\text{J}]$$

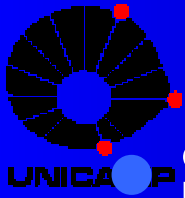
$$\oint \delta Q = -|Q_A| + Q_B = -|W_{\text{ciclo}}| \quad [\text{J}]$$

coeficiente de desempenho para refrigeradores :

$$\beta = \frac{Q_B}{|W_{\text{ciclo}}|} = \frac{Q_B}{|Q_A| - Q_B} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{\dot{Q}_B}{|\dot{W}_{\text{ciclo}}|} = \frac{\dot{Q}_B}{|\dot{Q}_A| - \dot{Q}_B}$$

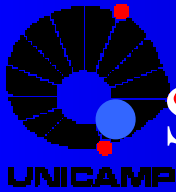
coeficiente de desempenho para bombas de calor :

$$\gamma = \frac{|Q_A|}{|W_{\text{ciclo}}|} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| - Q_B} \quad \text{ou} \quad \gamma = \frac{|\dot{Q}_A|}{|\dot{W}_{\text{ciclo}}|} = \frac{|\dot{Q}_A|}{|\dot{Q}_A| - \dot{Q}_B}$$



Segunda Lei da Termodinâmica

- ciclos internamente reversíveis: não ocorrem irreversibilidades no interior do sistema.
- Ciclo de Carnot:
 - processos reversíveis:
 - 1-2: aquecimento (Q_A) a temperatura constante T_A ;
 - 2-3: expansão adiabática;
 - 3-4: resfriamento (Q_B) a temperatura constante T_B ;
 - 4-1: compressão adiabática.
- O rendimento térmico do ciclo de Carnot é função apenas das temperaturas T_A e T_B .



Segunda Lei da Termodinâmica

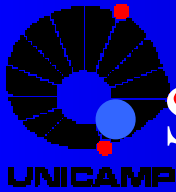
– Escala Absoluta de Temperatura

$$\eta_{1,2} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \Rightarrow \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = f(T_1, T_2)$$

$$\eta_{2,3} = \frac{Q_2 - |Q_3|}{Q_2} \Rightarrow \frac{|Q_3|}{|Q_2|} = f(T_2, T_3)$$

$$\eta_{1,3} = \frac{Q_1 - |Q_3|}{Q_1} \Rightarrow \frac{|Q_3|}{|Q_1|} = f(T_1, T_3)$$

$$\frac{|Q_3|}{|Q_1|} = \frac{|Q_3|}{|Q_2|} \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \Rightarrow f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) * f(T_2, T_3)$$



Segunda Lei da Termodinâmica

– Escala Absoluta de Temperatura

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) * f(T_2, T_3)$$

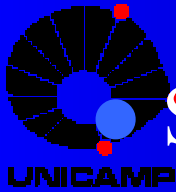
fazendo $f(T_1, T_2) = \frac{g(T_1)}{g(T_2)}$ e $f(T_2, T_3) = \frac{g(T_2)}{g(T_3)}$

Lord Kelvin: $g(T) = T$ e $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{baixa}}}{T_{\text{alta}}}$

e considerando a temperatura do ponto triplo da água :

$$T_{\text{triplo}} = 273,16\text{K} = 0,01^\circ\text{C}$$

fica definida a escala absoluta kelvin



Segunda Lei da Termodinâmica

– Desigualdade de Clausius

Para um ciclo de Carnot :

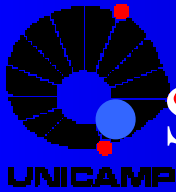
$$\oint_{\text{Carnot}} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_A}{T_A} - \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$$

Para ciclos irreversíveis :

$$\oint_{\text{Irrev}} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_{A\text{Irrev}}}{T_A} - \frac{|Q_{B\text{Irrev}}|}{T_B} < 0$$

De modo geral :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$



Segunda Lei da Termodinâmica

– A propriedade entropia

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Rev}} \Rightarrow S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Rev}}$$

para misturas de líquido e vapor saturados :

$$s = (1 - x) s_{\text{líq}} + x s_{\text{vap}}$$

para processos reversíveis :

$$\delta Q_{\text{Rev}} = T dS \Rightarrow Q_{1-2_{\text{Rev}}} = \int_1^2 \delta Q_{\text{Rev}} = \int_1^2 T dS$$

Segunda Lei da Termodinâmica

– Efeito das irreversibilidades sobre a entropia

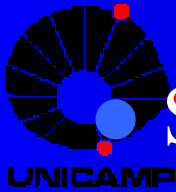
processo 1 – 2 : irreversível

processo 2 – 1 : reversível

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right) = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Irrev}} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Rev}} < 0$$

$$\int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Rev}} = S_1 - S_2 \Rightarrow \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{Irrev}} < S_2 - S_1$$

para um processo qualquer : $S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$



Segunda Lei da Termodinâmica

– Efeito das irreversibilidades sobre a entropia

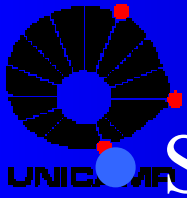
em forma diferencial: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$

na forma de taxa: $\frac{dS}{dt} \geq \frac{\dot{Q}}{T}$

Definindo irreversibilidade I :

$$\delta I = dS - \frac{\delta Q}{T} \quad \text{e} \quad \dot{I} = \frac{dS}{dt} - \frac{\dot{Q}}{T}$$

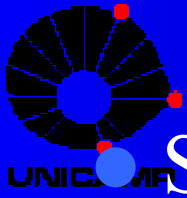
I corresponde à produção de entropia
devida às irreversibilidades



Segunda Lei da Termodinâmica

– Efeito das irreversibilidades sobre a entropia

- a entropia de um sistema fechado só pode aumentar devido ao recebimento de calor ou pela ocorrência de irreversibilidades;
- a entropia de um sistema fechado só pode diminuir por meio da retirada de calor;
- a entropia de um sistema não pode diminuir durante um processo adiabático;
- a entropia de um sistema isolado não pode diminuir;
- todos os processos adiabáticos e reversíveis são isentrópicos.



Segunda Lei da Termodinâmica

– Princípio do aumento da entropia

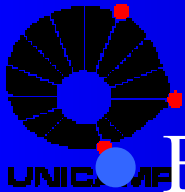
$$dS_{\text{sist}} \geq \frac{\delta Q}{T} \quad \text{e} \quad dS_{\text{meio}} = -\frac{\delta Q}{T}$$

na forma de taxa : $\frac{dS}{dt} \geq \frac{\dot{Q}}{T}$

Definindo irreversibilidade I :

$$\delta I = dS - \frac{\delta Q}{T} \quad \text{e} \quad \dot{I} = \frac{dS}{dt} - \frac{\dot{Q}}{T}$$

I corresponde à produção de entropia
devida às irreversibilidades



Equações TdS

– substância simples compressível

$$1^{\text{a}} \text{ Lei: } \delta Q - \delta W = dU$$

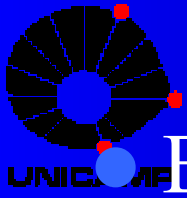
$$\text{processo reversível: } \delta Q = TdS \quad \text{e} \quad \delta W = PdV$$

$$1^{\text{a}} \text{ equação T - dS: } TdS = dU + PdV$$

$$\text{como } dH = dU + PdV + VdP$$

$$2^{\text{a}} \text{ equação T - dS: } TdS = dH - VdP$$

essas equações envolvem apenas propriedades termodinâmicas, e tem aplicabilidade geral.



Equações TdS

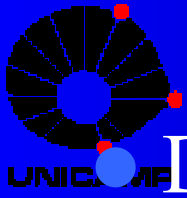
– gás ideal

$$du = c_v dT \quad e \quad P = \frac{R_{\text{gás}} T}{v}$$

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + \int_1^2 R_{\text{gás}} \frac{dv}{v}$$

$$\text{com } c_v = \text{cte.} \Rightarrow s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R_{\text{gás}} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$\text{com } c_p = \text{cte.} \Rightarrow s_2 - s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_{\text{gás}} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$



Diagramas Temperatura - Entropia

– eficiência de processos

eficiência adiabática de compressão :

$$\eta_{\text{compr}} = \frac{W_{\text{isen}}}{W_{\text{real}}}$$

eficiência adiabática de expansão :

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{isen}}}$$

Análise de Volumes de Controle

- Conservação de massa em um sistema

$$m_{\text{SIST}} = \text{cte.} \Rightarrow \frac{dm_{\text{SIST}}}{dt} = 0$$

- Conservação de massa em vol. de controle

$$\frac{dm_{\text{VC}}}{dt} = \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_e - \sum_{\text{saídas}} \dot{m}_s$$

Análise de Volumes de Controle

- Cons. quant. movimento em sistema

$$\sum \vec{F} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} \quad e \quad \sum \vec{T} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt}$$

- Cons. quant. movimento em vol. de controle

$$\vec{F}_{\text{grav}} + \vec{F}_{\text{press}} + \vec{F}_{\text{vis}} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \rho \vec{V} dV + \sum_{\text{saídas}} \vec{V}_s \dot{m}_s - \sum_{\text{entradas}} \vec{V}_e \dot{m}_e$$

Análise de Volumes de Controle

- Forças atuando em volume de controle

$$\sum_{VC} \vec{F} = \vec{F}_{\text{grav}} + \vec{F}_{\text{press}} + \vec{F}_{\text{vis}}$$

$$\vec{F}_{\text{grav}} = \rho \vec{g} V$$

$$\vec{F}_{\text{press}} = - \iint_{SC} \vec{n} P dA$$

$$\vec{F}_{\text{vis}} = \iint_{SC} \vec{\tau} dA$$

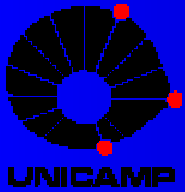
Análise de Volumes de Controle

- Conservação de energia em sistema

$$\dot{Q}_{\text{sis}} - \dot{W}_{\text{sis}} = \frac{d(E_{\text{sis}})}{dt}$$

- Conservação de energia em vol. de controle

$$\dot{Q}_{\text{VC}} - \dot{W}_{\text{VC}} = \frac{d(E_{\text{VC}})}{dt} + (\dot{m}e)_s - (\dot{m}e)_e + (\dot{m}pv)_s - (\dot{m}pv)_e$$



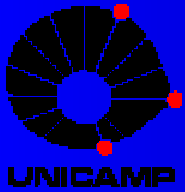
Análise de Volumes de Controle

- Conservação de energia em vol. de controle

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$h = u + pv$$

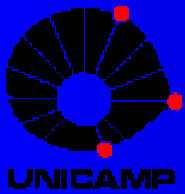
$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \frac{d(E_{VC})}{dt} + (\dot{m}h)_s - (\dot{m}h)_e$$



Análise de Volumes de Controle

- Conservação de energia em vol. de controle
 - Regime Permanente

$$\frac{d(E_{VC})}{dt} = 0$$
$$\dot{m}_s = \dot{m}_e$$
$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} = h_s - h_e$$

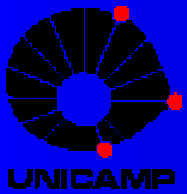


Análise de Volumes de Controle

- Conservação de energia, regime permanente
 - Formato adequado para escoamento de líquidos

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}g} - \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}g} = \left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_s - \left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_e + \frac{1}{g} [u_s - u_e]$$

$$\left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_e = \left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_s + \frac{1}{g} \left[u_s - u_e - \frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} \right] + \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}g}$$



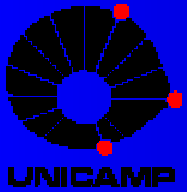
Análise de Volumes de Controle

- Conservação de energia, regime permanente
- Equação de Bernoulli
 - escoamento incompressível, reversível e adiabático
 - trabalho nulo

$$\left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_e = \left[\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right]_s$$

para uma linha de corrente :

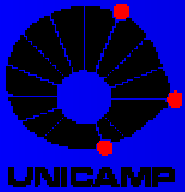
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$



Análise de Volumes de Controle

- Equação de Bernoulli
- P : pressão estática ou termodinâmica
- $\rho V^2/2$: pressão dinâmica
- $P_T = P + \rho V^2/2$: pressão total ou de estagnação
- Medição de velocidade por tubo de Pitot

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P)}{\rho}}$$

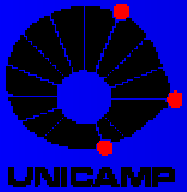


Análise de Volumes de Controle

- Equação de Bernoulli
- Fluidos em repouso

$$\rho V^2/2 = 0$$

$$P_1 - P_2 = \rho g(z_2 - z_1)$$



Análise de Volumes de Controle

- Seleção do vol. de controle
 - Caracterização dos objetivos da análise
 - Estabelecimento das hipóteses
 - Identificação dos parâmetros conhecidos
 - Esquematização da configuração
 - Definição da superfície de controle

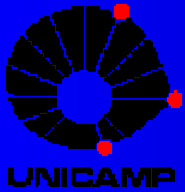
Análise de Volumes de Controle

- Balanço de entropia para sistema

$$\frac{dS_{sis}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{sis}}{T} + \dot{\sigma}_{sis}$$

- Balanço de entropia para vol. de controle

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_{SC} \frac{\dot{Q}}{T} + \sum_e (\dot{m}s)_e - \sum_s (\dot{m}e)_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

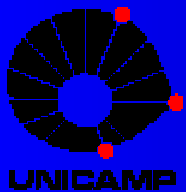


Análise de Volumes de Controle

Balanco de entropia para vol. de controle

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \iint_{SC} \frac{\dot{Q}''}{T} dA + \sum_e (\dot{m}s)_e - \sum_s (\dot{m}s)_s + \dot{\sigma}_{VC}$$

$$e \quad \frac{dS_{VC}}{dt} = s \frac{dm_{VC}}{dt} + m_{VC} \frac{ds}{dt}$$



Análise de Volumes de Controle

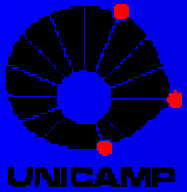
Balanço de entropia para vol. de controle

se reg. permanente:
$$\dot{m}(s_e - s_s) + \frac{\dot{Q}_{VC}}{T} + \dot{\sigma}_{VC} = 0$$

se proc. reversível:
$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{T} = \dot{m}(s_s - s_e)$$

se proc. isentrópico:
$$s_e = s_s$$

para gás ideal:
$$T \frac{ds}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - v \frac{dp}{dt}$$



Análise de Volumes de Controle

Trabalho de compressão isentrópica

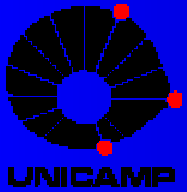
$$1a. \text{ Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$\text{caso particular: } q - w = h_s - h_e$$

$$\text{se proc. reversível: } q = \int \delta q = \int T ds$$

$$q = \int_e^s T ds = \int_e^s dh - \int_e^s v dP = h_s - h_e - \int_e^s v dP$$

$$w = - \int_e^s v dP$$



Análise de Volumes de Controle

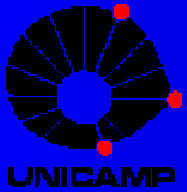
Conversão de energia: bocais e difusores

$$1a. \text{ Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

$$V_s = \sqrt{2(h_e - h_s) + V_e^2}$$

$$\text{Eficiência isen trópica: } \eta_{\text{bocal}} = \frac{V_{\text{real}}^2}{V_{\text{isen tr}}^2}$$



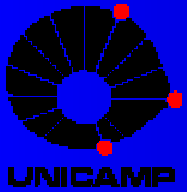
Análise de Volumes de Controle

Conversão de energia: turbinas térmicas

$$1a. \text{ Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$\text{se } \dot{Q}_{\text{turb}} = 0 \Rightarrow \dot{W}_{\text{turb}} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} \right]$$

$$\text{Eficiência isen trópica: } \eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{W_{\text{isen tr}}}$$



Análise de Volumes de Controle

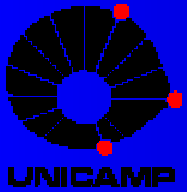
Conversão de energia: turbinas a gás

$$\text{1a. Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$\text{compr.: se } \dot{Q}_{\text{comp}} = 0 \Rightarrow -\frac{\dot{W}_{\text{comp}}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

$$\text{turbina: se } \dot{Q}_{\text{turb}} = 0 \Rightarrow \frac{\dot{W}_{\text{turb}}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4)$$

$$(T_3 - T_4) > (T_2 - T_1)$$



Análise de Volumes de Controle

Eficiência isentrópica: turbinas a gás

Processo isentrópico: $s_s = s_e$

Eficiência isentrópica do compressor: $\eta_{\text{compr}} = \frac{W_{\text{isen tr}}}{W_{\text{compr}}}$

Eficiência isentrópica da turbina: $\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{W_{\text{isen tr}}}$

Ciclo Rankine Ideal

$$1a. \text{ Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$\text{bomba: se } \dot{Q}_b = 0 \Rightarrow -\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \cong v(P_2 - P_1)$$

$$\text{caldeira: } \frac{\dot{Q}_{cald}}{\dot{m}} = h_3 - h_2$$

$$\text{turbina: se } \dot{Q}_{turb} = 0 \Rightarrow \frac{\dot{W}_{turb}}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

$$\text{condensador: } -\frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{m}} = h_4 - h_1$$

Ciclo Rankine Ideal

Trabalho líquido do ciclo

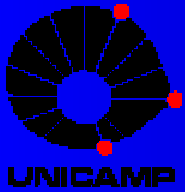
$$W_{\text{ciclo}} = \frac{\dot{W}_{\text{turb}}}{\dot{m}} - \frac{|\dot{W}_b|}{\dot{m}} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

Eficiência térmica do ciclo

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{cald}}}$$

Ciclo Rankine Real

- Comparação com o Ciclo Rankine Ideal
- Irreversibilidades
 - Perdas térmicas
 - Perdas de carga
- Regeneração
- Reaquecimento



Ciclo Refrigeração por Compressão

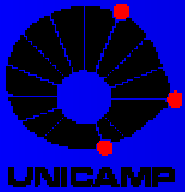
$$1a. \text{ Lei: } \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \dot{m} \left[h_s - h_e + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right]$$

$$\text{compressor: se } \dot{Q}_{\text{comp}} = 0 \Rightarrow -\frac{\dot{W}_{\text{comp}}}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

$$\text{condensador: } \frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{\dot{m}} = h_3 - h_2$$

$$\text{válvula expansão: se } \dot{Q}_{\text{exp}} = 0 \Rightarrow h_3 = h_4$$

$$\text{evaporador: } \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$



Ciclo Refrigeração por Compressão

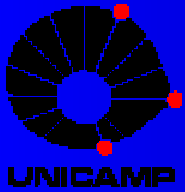
Refrigerador

Trabalho líquido do ciclo

$$w_{\text{ciclo}} = - \frac{|\dot{W}_{\text{comp}}|}{\dot{m}} = (h_1 - h_2)$$

Coeficiente de desempenho do refrigerador

$$\beta_{\text{refr}} = \frac{q_{\text{evap}}}{|w_{\text{ciclo}}|}$$



Ciclo Refrigeração por Compressão

Bomba de Calor

Trabalho líquido do ciclo

$$W_{\text{ciclo}} = -\frac{|\dot{W}_{\text{comp}}|}{\dot{m}} = (h_1 - h_2)$$

Coeficiente de desempenho da bomba de calor

$$\gamma_{\text{bomba de calor}} = \frac{q_{\text{cond}}}{W_{\text{ciclo}}}$$

É o fim ?