

NUMERO: 2190A

ANNO: 2017

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Placido Daniele

MATERIA: Termodinamica e Trasmissione del Calore -  
Formulario - Prof. Giaretto

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

## FORMULARIO DI TERMODINAMICA E TRASMISSIONE DEL CALORE

### TERMODINAMICA

### **3 CAPITOLO- PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA**

#### 3.1 Sistemi chiusi

$$Q - L_i = \Delta U$$

$$\Phi - W_i = \frac{dU}{dt}$$

$$q - l_i = \Delta u$$

#### 3.2 Sistemi a deflusso

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}\right)_{vc} + (\sum_j \pm G_j x_j)_{sc} \text{ Derivata materiale grandezza estensiva}$$

$$\mathbf{G}(t) = \rho(t)[\mathbf{A} | \mathbf{w}|] \text{ Portata in massa attraverso condotto a sezione costante}$$

$$\mathbf{G}_u = \mathbf{G}_e - \left(\frac{dM}{dt}\right)_{vc}$$

$$\mathbf{G}_u = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{G}_e = \left(\frac{dM}{dt}\right)_{vc} \text{ Riempimento}$$

$$\mathbf{G}_e = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{G}_u = -\left(\frac{dM}{dt}\right)_{vc} \text{ Svuotamento}$$

$$\mathbf{W}_{sp} = \sum_{j=1}^N \pm (\mathbf{p}\mathbf{v})_j \mathbf{G}_j \text{ Potenza di spostamento}$$

$$l_t^{id}(\mathbf{P}) = - \int_{\Gamma} \mathbf{v} d\mathbf{p} \text{ lavoro tecnico ideale specifico}$$

#### 3.3 Formulazione del primo principio per i sistemi a deflusso

$$\Phi - W_t = \frac{dU(t)}{dt} + \frac{dE_p(t)}{dt} + \frac{dE_c(t)}{dt} + W_{sp}(t) + W_0(t)$$

$$\begin{aligned} \Phi - W_t = & \left[ \frac{dU(t)}{dt} + \frac{dE_p(t)}{dt} + \frac{dE_c(t)}{dt} + p_0 \frac{dV(t)}{dt} \right]_{vc} \\ & + \left[ \sum_{j=1}^N \pm G_j (u + p v + e_p + e_c)_j \right]_{sc} \end{aligned}$$

$$H = U - pV \text{ entalpia}$$

$$\oint_{\text{rev}} \frac{\delta Q}{T} = 0 \text{ uguaglianza di Clausius}$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; \delta Q = TdS \text{ entropia}$$

$$S_b - S_a = \int_a^b dS = \int_a^b \frac{\delta Q}{T} \text{ entropia tra due generici stati } a, b \text{ per una trasformazione reversibile}$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_{\text{irr}} \text{ secondo principio della termodinamica}$$

$$\Delta S = \oint_T \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{irr}} \text{ secondo principio della termodinamica}$$

$$\Delta s = \oint_T \frac{\delta q}{T} + s_{\text{irr}} \text{ secondo principio della termodinamica entalpia specifica}$$

$$\Delta S_{\text{isolato}} \geq 0$$

$$Q^+ - \frac{T^-}{T^+} Q^+ = |L(C)|_{\text{max}} = Q^+ \left(1 - \frac{T^-}{T^+}\right) = Q^+ \eta \text{ lavoro massimo ciclo di Carnot}$$

$$\frac{T^-}{T^+} Q^- - Q^- = |L(C)|_{\text{min}} = Q^- \left(\frac{T^+ - T^-}{T^-}\right) = Q^- \frac{1}{\epsilon_f} \text{ lavoro minimo ciclo di Carnot inverso}$$

#### 4.5 Formulazione del secondo principio per i sistemi a deflusso

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Phi(t)}{T} + \Sigma_{\text{irr}} \text{ secondo principio per i sistemi a deflusso}$$

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{vc}} + (\Sigma_{j=1}^N \pm G_j S_j)_{\text{sc}} = \frac{\Phi(t)}{T} + \Sigma_{\text{irr}} \text{ secondo principio per i sistemi a deflusso con derivata materiale entropia}$$

$$(\Sigma_{j=1}^N \pm G_j S_j)_{\text{sc}} = \frac{\Phi(t)}{T} + \Sigma_{\text{irr}} \text{ secondo principio per i sistemi a deflusso in condizioni stazionarie}$$

$$0 = \frac{|\Phi|}{T} - \frac{|\Phi|}{T'} + \Sigma_{\text{irr}} \Rightarrow \Sigma_{\text{irr}} = |\Phi| \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right) \geq 0 \text{ irreversibilità esterne}$$

$$G(s_u - s_e) = \frac{\Phi}{T} - \frac{|\Phi_0|}{T_0} + \Sigma_{\text{irr}} \text{ secondo principio per i sistemi a deflusso con flussi termici ai termostati attraverso cui sono scambiati}$$

$$W_{t,\text{max}} = \Phi \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + G[(h_e - h_u) - T_0(s_e - s_u)] \text{ massima potenza tecnica estraibile}$$

$q - \int_{\Gamma} p dv = \Delta u = c_v \Delta T$  *primo principio per sistemi chiusi in termini specifici*

$q + \int_{\Gamma} v dp = \Delta h = c_p \Delta T$  *primo principio per sistemi a deflusso in condizioni stazionarie e in termini specifici*

Trasformazione isocora

- Sistema chiuso:  $l_i^{id} = \int_{\Gamma} p dv = 0, q = c_v \Delta T$
- Sistema a deflusso:  $l_t^{id} = - \int_{\Gamma} v dp = -v(p_2 - p_1) = -R(T_2 - T_1), q = c_v \Delta T$

Trasformazione isobara

- Sistema chiuso:  $l_i^{id} = \int_{\Gamma} p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1), q = c_p \Delta T$
- Sistema a deflusso:  $l_t^{id} = - \int_{\Gamma} v dp = 0, q = c_p \Delta T$

Trasformazione isoterma

- Sistema chiuso:  $\Delta u = 0, q = l_i^{id} = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$
- Sistema a deflusso:  $\Delta h = 0, q = l_t^{id} = -RT \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$

$$l_i^{id} = l_t^{id} = RT \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) = -RT \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

Trasformazione adiabatica

$pv^{\gamma} = \text{cost}$  *equazione caratteristica dell'adiabatica reversibile*

$Tv^{\gamma-1} = \text{cost}; Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{cost}$  *equazioni equivalenti*

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  *esponente dell'adiabatica*

Trasformazione politropica

$pv^n = \text{cost}$  *equazione caratteristica della politropica reversibile*

$Tv^{n-1} = \text{cost}; Tp^{\frac{1-n}{n}} = \text{cost}$  *equazioni equivalenti*

$n = \frac{c_p - c}{c - c}$  *esponente della politropica*

$$1 - x = \frac{M_L}{M_L + M_V}$$

$$v = (1 - x)v_L + xv_V \text{ volume specifico in funzione del titolo}$$

$$x = \frac{v - v_L}{v_V - v_L} \text{ titolo del vapore noto il volume specifico della miscela}$$

$$s = (1 - x)s_L + xs_V \text{ entropia specifica in funzione del titolo}$$

$$x = \frac{s - s_L}{s_V - s_L} \text{ titolo del vapore nota l'entropia specifica della miscela}$$

$$h = (1 - x)h_L + xh_V \text{ entalpia specifica in funzione del titolo}$$

$$x = \frac{h - h_L}{h_V - h_L} \text{ titolo del vapore nota l'entalpia specifica della miscela}$$

#### 5.4.1 Calore di cambiamento di fase

$$r = h_V - h_L \text{ calore di vaporizzazione}$$

$$r = T \frac{dp}{dT} (v_V - v_L) \text{ equazione di Clausius-Clapeyron}$$

#### 5.4.2 Diagrammi e proprietà dei vapori saturi

$$s_V - s_L = \frac{r(T_S)}{T_S} = \frac{h_V - h_L}{T_S}$$

$$\left(\frac{dp}{dh}\right)_S = \frac{1}{v} \text{ pendenza di una isoentropica nel diagramma } p-h$$

#### 5.4.3 Processo di laminazione o di trafilazione

$$h_1 = h_2 = \text{cost} \text{ entalpia nel processo di laminazione (o trafilazione)}$$

$$W_a = -V(t) \frac{dp(t)}{dt} = W_t^{id} \text{ potenza dissipata nel processo}$$

$$l_a = -\int_{\Gamma} v dp = l_t^{id} \text{ lavoro specifico dissipato}$$

$$s_1 - s_2 = s_{irr} \Rightarrow s_1 < s_2 \text{ entropia nel processo di laminazione}$$

### 5.5 Gas di Van der Waals

$$pv = RT \left( 1 + \frac{A}{v} + \frac{B}{v^2} + \frac{C}{v^3} + \dots \right) = RTZ \text{ equazione viriale}$$

$d\mathbf{g} = \mathbf{v}d\mathbf{p} - \mathbf{s}d\mathbf{T} \Rightarrow \mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{p}, \mathbf{T})$  differenziale energia libera di Gibbs

$$\left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{v}}\right)_s = -\left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{s}}\right)_v \text{ prima equazione di Maxwell}$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{p}}\right)_s = \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{s}}\right)_p \text{ seconda equazione di Maxwell}$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v = \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{v}}\right)_T \text{ terza equazione di Maxwell}$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{T}}\right)_p = -\left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{p}}\right)_T \text{ quarta equazione di Maxwell}$$

$$\mathbf{T} = \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{s}}\right)_v = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{s}}\right)_p$$

$$-\mathbf{p} = \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{v}}\right)_s = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}}\right)_T$$

$$\mathbf{v} = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{p}}\right)_s = \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}}\right)_T$$

$$-\mathbf{s} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v = \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{T}}\right)_p$$

## 6.2 Entropia, energia interna, entalpia per una generica sostanza

$$d\mathbf{s} = \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v d\mathbf{T} + \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{v}}\right)_T d\mathbf{v} \text{ prima relazione di Gibbs per l'entropia}$$

$$d\mathbf{s} = c_v \frac{d\mathbf{T}}{\mathbf{T}} + \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v d\mathbf{v}$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{v}} \text{ per un gas ideale}$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{T}}\right)_v = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{v}-\mathbf{b}} \text{ per il gas di Van der Waals}$$

$$d\mathbf{s} = c_v + \mathbf{R} \frac{d\mathbf{v}}{\mathbf{v}-\mathbf{b}} \Rightarrow \mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + c_v \ln \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{T}_0} + \mathbf{R} \ln \left(\frac{\mathbf{v}-\mathbf{b}}{\mathbf{v}_0-\mathbf{b}}\right) \text{ espressione dell'entropia per il gas di Van der Waals}$$

$$d\mathbf{s} = \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{T}}\right)_p d\mathbf{T} + \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{p}}\right)_T d\mathbf{p} \text{ seconda relazione di Gibbs per l'entropia}$$

$$d\mathbf{s} = c_p \frac{d\mathbf{T}}{\mathbf{T}} - \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{T}}\right)_p d\mathbf{p}$$

## 6.4 Generalità sui calori specifici a pressione e volume costante

$c_p - c_v = R$  *relazione di Mayer per un gas ideale*

$c_p(T, p) - c_{v,0}(T) = R + \frac{2ap}{RT^2}$  *relazione di Mayer per un gas di Van der Waals*

$$c_p - c_v = T v \frac{\beta^2}{\kappa}$$

## 6.6 Coefficiente di Joule-Thomson

$\mu_{J-T} = \frac{1}{c_p} \left[ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right]$  *coefficiente di Joule-Thomson*

$\mu_{J-T} = \frac{1}{c_p} \left[ \frac{2a}{RT} - b \right]$  *espressione esplicita del coefficiente di Joule-Thomson*

$T_{\max} = \frac{27}{4} T_C$  *temperatura massima d'inversione*

$p_{\max} = 9p_C$  *pressione massima d'inversione*

## **CAPITOLO 7- MISCELE IDEALI DI GAS IDEALI E CENNI DI PSICROMETRIA**

$n_j = \frac{M_j}{\bar{M}_j}$  *numero di moli*

$M = \sum_{j=1}^{NC} M_j = \sum_{j=1}^{NC} n_j \bar{M}_j$  *massa totale*

$n = \sum_{j=1}^{NC} n_j$  *numero di moli totali*

$x_j = \frac{M_j}{M} \Rightarrow \sum_{j=1}^{NC} x_j = 1$  *frazione massica*

$y_j = \frac{n_j}{n} \Rightarrow \sum_{j=1}^{NC} y_j = 1$  *frazioni molari*

### 7.1 Modelli di Dalton-Gibbs e Amagat-Leduc per miscele ideali

$p = \sum_{j=1}^{NC} p_j$  *pressione parziale*

$U = M u = \sum_{j=1}^{NC} U_j = \sum_{j=1}^{NC} M_j u_j = \sum_{j=1}^{NC} n_j \bar{u}_j$  *energia interna parziale*

$p_j = \frac{n_j \bar{R} T}{V} = \frac{M_j R_j T}{V}$  *pressione parziale j-esimo componente*

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{\partial}{\partial T} (\sum_{j=1}^{NC} x_j h_j) = \sum_{j=1}^{NC} x_j c_{p,j} \text{ calore specifico a pressione costante}$$

$$\bar{c}_p = \left( \frac{\partial \bar{h}}{\partial T} \right)_v = \frac{\partial}{\partial T} (\sum_{j=1}^{NC} y_j \bar{h}_j) = \sum_{j=1}^{NC} y_j \bar{c}_{p,j} \text{ calore specifico molare a pressione costante}$$

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^{NC} x_j c_{p,j}}{\sum_{j=1}^{NC} x_j c_{v,j}} \neq \sum_{j=1}^{NC} x_j \gamma_j \neq \sum_{j=1}^{NC} y_j \bar{\gamma}_j \text{ esponente dell'adiabatica}$$

### 7.3 Entropia di mescolamento

$$\Delta S = - \left[ M_a R_a \ln \frac{p_{a,2}}{p_1} + M_b R_b \ln \frac{p_{b,2}}{p_1} \right] = - [M_a R_a \ln y_a + M_b R_b \ln y_b] \text{ differenza di entropia nel mescolamento adiabatico ed isobaro di due gas}$$