



FORMULARIO TÉRMICO (TERMODINÁMICA)

Modelos termodinámicos de sustancias	1
Modelo de gas perfecto	1
Modelo de líquido perfecto	1
Modelo de sustancia pura perfecta	2
Modelo de mezcla homogénea perfecta	2
Modelo de mezcla bifásica binaria ideal	2
Energía.....	3
Trabajo.....	3
Calor	3
Ecuación de la energía mecánica y ecuación de la energía interna.....	3
Balance energético en sistemas abiertos.....	3
Entropía y exergía.....	4
Irreversibilidad y rendimientos.....	4
Balances de magnitudes aditivas en volumen de control ($\vec{v}_A=0$ si VC fijo).....	4
Potenciales, ecuaciones de estado, y coeficientes	5
Cambio de fase en sustancias puras.....	6
Mezclas.....	6
Mezclas monofásicas.....	6
Mezclas bifásicas.....	7
Equilibrio líquido-vapor	7
Equilibrio líquido-sólido_no_volátil	8
Equilibrio líquido-gas_condensable	8
Equilibrio líquido-gas_no_condensable	8
Propiedades coligativas	8
Aire húmedo	8
Mezclas reactivas. Combustión.....	9
Máquinas térmicas: motores, frigoríficos y bombas. Rendimientos	10

Modelos termodinámicos de sustancias

Modelo de gas perfecto

Gas perfecto = gas ideal (moléculas independientes, i.e. $pV=mRT$) y caloríficamente perfecto (T lineal con Q , i.e. $c_v=cte$). p y T han de ser valores absolutos ($0\text{ }^\circ\text{C}\equiv 273,15\text{ K}$), y $R\equiv R_u/M$, con $R_u=8,3\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$. ([Ver datos](#))

Ecuación de estado (térmica): $pV=mRT=nR_uT$ o $p=\rho RT$.

Ecuación de estado energética: $\Delta U=mc_v\Delta T$.

Evolución adiabática y sin fricción: $pV^\gamma=cte$ (o $T/p^{(\gamma-1)/\gamma}=cte$), con $\gamma\equiv c_p/c_v$ y $c_p-c_v=R$.

Entalpía y entropía específicas: $\Delta h=c_p\Delta T$, $\Delta s=c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0}$.

Modelo de líquido perfecto

Líquido perfecto = líquido ideal (incompresible e indilatable, i.e. $\rho=cte$) y caloríficamente perfecto (T lineal con Q , i.e. $c=cte$). ([Ver datos](#)). El modelo de sólido perfecto es similar ([Ver datos](#)).

Ecuación de estado (térmica): $\rho=cte$.

Ecuación de estado energética: $\Delta U=mc\Delta T$.

Ecuación de la hidrostática: $\Delta p=-\rho g\Delta z$ (para gases es la misma en forma diferencial).

Entalpía y entropía específicas: $\Delta h = c\Delta T + \frac{\Delta p}{\rho}$, $\Delta s = c \ln \frac{T}{T_0}$.

Modelo de sustancia pura perfecta

Combinación de los modelos de líquido perfecto y de gas perfecto, y de la ecuación de Clapeyron. No vale cerca del punto crítico ni a muy altas presiones. Queda definido por las constantes: M (masa molar), c_p (capacidad térmica del gas), T_b (temperatura de ebullición, a $p_0=100$ kPa), h_{LVb} (entalpía de ebullición), ρ (densidad del líquido), y c (capacidad térmica del líquido). La ecuación de Clapeyron es:

$$\ln\left(\frac{p_{\text{sat}}}{p_0}\right) = \frac{-h_{LVb}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b}\right) \quad (\text{se usa más la correlación de Antoine: } \frac{p_v}{p_u} = \exp\left[A - \frac{B}{\frac{T}{T_u} + C}\right])$$

Funciones termodinámicas tomando como referencia el estado líquido en el punto triple ($h_{\text{liq, tr}}=0$ y $s_{\text{liq, tr}}=0$; el punto triple se puede aproximar por la temperatura de fusión, $T_{\text{tr}} \approx T_f$, y la presión de vapor correspondiente, $p_{\text{tr}} = p_v(T_f)$):

- Entalpía y entropía específicas en estado líquido (i.e. cuando $p > p_{\text{sat}}(T)$, incluyendo líquido saturado):

$$h = c(T - T_{\text{tr}}) + \frac{p - p_{\text{tr}}}{\rho}, \quad s = c \ln \frac{T}{T_{\text{tr}}}.$$

- Entalpía y entropía específicas en estado vapor (i.e. cuando $p < p_{\text{sat}}(T)$, incluyendo vapor saturado):

$$h = c(T_b - T_{\text{tr}}) + h_{LVb} + c_p(T - T_b), \quad s = c \ln \frac{T_b}{T_{\text{tr}}} + \frac{h_{LVb}}{T_b} + c_p \ln \frac{T}{T_b} - R \ln \frac{p}{p_0} = \frac{h_{LV, \text{tr}}}{T_{\text{tr}}} + c_p \ln \frac{T}{T_{\text{tr}}} - R \ln \frac{p}{p_{\text{tr}}}.$$

- Entalpía y entropía específicas en estado bifásico (i.e. cuando $p = p_{\text{sat}}(T)$), en función de $x \equiv m_v / (m_v + m_L)$:

$$h = (1-x)h_L + xh_V, \quad s = (1-x)s_L + xs_V, \text{ siendo L y V los estados saturados calculados como se ha indicado.}$$

Modelo de mezcla homogénea perfecta

Una mezcla homogénea multicomponente monofásica (de gases o líquidos) se dice que es ideal si al mezclarse no se calienta/enfría ni se expande/contrae. Para cálculos volumétricos y energéticos puede aplicarse el modelo de sustancia pura perfecta con: $v(T, p, x_i) = \sum x_i v_i^*(T, p)$, $c_p(T, p_0, x_i) = \sum x_i c_{p,i}^*(T, p_0)$, pero la entropía de la mezcla es mayor que la de los componentes por separado, con un $\Delta S_{\text{mixing}} = -nR \sum x_i \ln x_i$, siendo x_i las fracciones molares. Con fracciones másicas también vale $v = \sum y_i v_i^*$ y $c_p = \sum y_i c_{p,i}^*$, pero $\Delta S_{\text{mixing}} = -nR \sum x_i \ln x_i$ solo vale con fracciones molares.

Medida de la composición:

$$x_i \equiv \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{y_i / M_i}{\sum y_i / M_i}, \quad y_i \equiv \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i}, \quad \rho_i \equiv \frac{m_i}{V} = y_i \rho, \quad c_i \equiv \frac{n_i}{V} = \frac{\rho_i}{M_i} = \frac{x_i}{\sum x_i M_i} \rho$$

$$\text{Masa molar media: } M \equiv \frac{m}{n} = \frac{\sum x_i M_i}{\sum \frac{y_i}{M_i}}$$

Modelo de mezcla ideal (MMI) monofásica:

$$v(T, p, x_i) \stackrel{\text{IMM}}{=} \sum x_i v_i^*(T, p), \quad c_p(T, p_0, x_i) \stackrel{\text{IMM}}{=} \sum x_i c_{p,i}^*(T, p_0), \quad s(T, p, x_i) \stackrel{\text{IMM}}{=} \sum x_i s_i^*(T, p) - R \sum x_i \ln x_i$$

Nota. Con el modelo MMI, el c_p molar de la mezcla en la forma $c_p = \sum x_i c_{p,i}$, necesita los $c_{p,i}$ molares de cada sustancia. El c_p másico de la mezcla también se puede poner en la forma $c_{p, \text{mas}} = \sum y_i c_{p,i, \text{mas}}$. Si se dispone de los $c_{p,i, \text{mas}}$, el c_p molar de la mezcla es $c_{p, \text{mol}} = \sum x_i c_{p,i, \text{mas}} M_i$, o bien $c_{p, \text{mol}} = c_{p, \text{mas}} M_{\text{mix}}$.

Densidad de una mezcla binaria. De $v = x_1 v_1 + x_2 v_2$, $M_m / \rho_m = x_1 M_1 / \rho_1 + x_2 M_2 / \rho_2$, que en gases queda $M_m / \rho_m = R_u T / p$.

Densidad de una mezcla binaria, en fracciones másicas: $1 / \rho_m = y_1 / \rho_1 + y_2 / \rho_2$. $M_m = x_1 M_1 + x_2 M_2 = 1 / (y_1 / M_1 + y_2 / M_2)$.

Modelo de mezcla bifásica binaria ideal

$m = m_L + m_V$, $V = V_L + V_V$, $H = H_L + H_V$, $S = S_L + S_V$ (i.e. despreciando fenómenos interfaciales).

Equilibrio líquido-vapor de una mezcla binaria ideal (ley de Raoult): $\frac{x_{V1}}{x_{L1}} = \frac{p_1^*(T)}{p}$, $\frac{1-x_{V1}}{1-x_{L1}} = \frac{p_2^*(T)}{p}$

Fracciones molares totales: $x_{01} = x_{V1}x_{V0} + x_{L1}(1-x_{V0})$, $1-x_{01} = (1-x_{V1})x_{V0} + (1-x_{L1})(1-x_{V0})$

$$v(T, p, x_{ij}) = x_{V0}(x_{V1}v_{V1} + x_{V2}v_{V2}) + x_{L0}(x_{L1}v_{L1} + x_{L2}v_{L2}) \rightarrow \frac{x_{01}M_1 + x_{02}M_2}{\rho_m} = x_{L0} \left(\frac{x_{L1}M_1}{\rho_1} + \frac{x_{L2}M_2}{\rho_2} \right) + x_{V0} \frac{RT}{p}$$

$$h(T, p, x_{ij}) = x_{V0}(x_{V1}h_{V1} + x_{V2}h_{V2}) + x_{L0}(x_{L1}h_{L1} + x_{L2}h_{L2})$$

$$s(T, p, x_{ij}) = x_{V0}(x_{V1}s_{V1} + x_{V2}s_{V2} + \Delta s_{\text{mixing}_V}) + x_{L0}(x_{L1}s_{L1} + x_{L2}s_{L2} + \Delta s_{\text{mixing}_L})$$

fase gaseosa (ref. sat-líquido): $v_V(T, p, x_{Vj}) = \sum x_{Vj} \frac{RT}{p} = \frac{RT}{p}$, $h_V(T, p, x_{Vj}) = \sum x_{Vj} [h_{LV,ref,j} + c_{p,Vj}(T - T_{ref,j})]$

fase líquida (ref. sat-líquido): $v_L(T, p, x_{Lj}) = \sum x_{Lj} \frac{M_i}{\rho_{Lj}(T)}$, $h_L(T, p, x_{Lj}) = \sum x_{Lj} c_{Lj}(T - T_{ref,j})$

Energía

Trabajo

Trabajo (mecánico): $W \equiv - \int_{\text{frontier}} \vec{F}_{\text{int}} \cdot d\vec{r} = \int_{\text{non dissipative frontier}} \vec{F}_{\text{ext}} \cdot d\vec{r} \xrightarrow{E_{\text{mdf}}=0, \Delta E_m=0, \nabla p=0} W = - \int p dV$

Trabajo eléctrico: $W \equiv \int V(t)I(t)dt$. Trabajo contra un muelle: $W = \int k(x - x_n) dx$

Trabajo útil: $W_u \equiv W + \int p_{\text{atm}} dV$

Energía (total) de una masa de control (Primer Principio a masa fija): $\Delta E \equiv W|_{Q=0}$, $\Delta E|_{\text{aislado}}=0$. $\boxed{\Delta E = W + Q}$

(Magnit. conservativas: $m \equiv \sum m_i = cte$, $\vec{P} \equiv \sum m_i \vec{v}_i = \sum m_i \vec{r}_i = m \vec{v}_{cm} = cte$, $\vec{L} \equiv \sum \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i = cte$ y $E = cte$.)

Energía mecánica (MC): $\Delta E_m \equiv (W + \int p dV)_{E_{\text{mdf}}=0}$

Calor

$Q \equiv \Delta E - W = \int \dot{Q} dt = \int KA(T - T_\infty) dt$. [Transmisión de calor](#) (conducción, convección, radiación, cambiadores)

Proceso adiabático y sin fricción de un gas perfecto de MC: $pV^\gamma = cte$, o $TV^{\gamma-1} = cte$. Para MC o VC: $T/p^{(\gamma-1)/\gamma} = cte$.

Ecuación de la energía mecánica y ecuación de la energía interna

Energía mecánica degradada por fricción (MC): $E_{\text{mdf}} \equiv W + \int p dV - \Delta E_m \geq 0$

Energía interna (MC): $\Delta U \equiv \Delta E - \Delta E_m = Q + E_{\text{mdf}} - \int p dV$. Modelo de sustancia perfecta: $\Delta U = m c_v \Delta T^{\text{MSP}}$

Balance energético en sistemas abiertos

Balances másico: $\Delta m = \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} dm_e$, i.e. incremento de masa del sistema entre dos instantes = aporte neto.

Balances másico: $\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{aberturas}} \dot{m}_e$, i.e. incremento temporal de masa del sistema = aporte neto instantáneo.

Balance energético: $\Delta E = W + Q + \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} \int h_{t,e} dm_e$ (la entalpía es suma de la energía más el trabajo de flujo)

Balance energético: $\frac{dE}{dt} = \dot{W} + \dot{Q} + \sum_{\text{aberturas}} \dot{m}_e h_{t,e}$, i.e. incremento temporal de energía del sistema = aporte neto.

Entalpía y entalpía total: $H \equiv U + pV$, $h \equiv u + pv$, $h_t \equiv h + e_m = e + pv = u + pv + e_m$. (para VC mejor usar $\rho \equiv 1/v$).

Velocidad media, v , caudal, \dot{V} , y gasto másico, \dot{m} , de un flujo fluido a través de A : $\dot{m} = \rho v A = \rho \dot{V}$.

Balance energético para un volumen de control en régimen estacionario (una entrada y una salida): $\Delta h_t = q + w$.

Balance energético mecánico VC en RE (ecuación de Bernoulli generalizada): $w = \int \frac{dp}{\rho} + \Delta e_m + e_{mdf}$

Balance energético térmico VC en RE: $q + e_{mdf} = \Delta u + \int pd \left(\frac{1}{\rho} \right)$

Estado total o de remanso de un líquido incompresible (VC en RE): $p_t \equiv p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gz$, $T_t \equiv T$

Estado total o de remanso de un gas perfecto (VC en RE): $\left(\frac{p_t}{p} \right)^\gamma = \frac{T_t}{T} = 1 + \frac{v^2}{2c_p T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$ $\left(M \equiv \frac{v}{c} \right)$

Despresurización rápida y sin fricción de un depósito de gas: $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^\gamma = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{\gamma - 1}$

Presurización rápida (con fricción) de un depósito de gas: $m_2(u_2 - u_0) - m_1(u_1 - u_0) = (h_{te} - u_0)(m_2 - m_1)$

Entropía y exergía

Variación general de entropía: $dS = \frac{1}{T} dU + \frac{p}{T} dV - \sum_{i=1}^c \frac{\mu_i}{T} dn_i$, ($S \equiv -k \sum p_i \ln p_i$ o $\Delta S \equiv \int \frac{Q_{rev}}{T}$)

-de una fuente térmica: $\Delta S_0 = \frac{Q_0}{T_0}$

-de un líquido perfecto: $S - S_0 = mc \ln \frac{T}{T_0}$

-de un gas perfecto: $S - S_0 = m \left(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0} \right) = m \left(c_p \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{V}{V_0} \right) = m \left(c_p \ln \frac{V}{V_0} + c_v \ln \frac{p}{p_0} \right)$

Generación de entropía: $S_{gen} \equiv \Delta S - \int \frac{dQ}{T} \geq 0$

Variación general de exergía: $\Delta \Phi \equiv W_u \Big|_{\Delta S_{univ}=0} = W_{u,min}$

Irreversibilidad y rendimientos

Irreversibilidad: $I \equiv W_u - W_u \Big|_{\Delta S_{univ}=0} \geq 0$

Variación general de exergía de una masa de control sin cambio de composición: $\Delta \Phi = \Delta (E + p_0 V - T_0 S)$

Rendimientos energético y exergético de un motor térmico: $\eta_e \equiv \frac{-W}{Q_1}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Rendimientos de un refrigerador: $\eta_e \equiv \frac{Q_2}{W}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

Rendimientos de una bomba de calor: $\eta_e \equiv \frac{-Q_1}{W}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

Balances de magnitudes aditivas en volumen de control ($\vec{v}_A = 0$ si VC fijo)

Magnitud	Acumul.	Producción	Flujo impermeable	Flujo permeable
----------	---------	------------	-------------------	-----------------

masa	dm	=	0	+0	$+\sum dm_e$
momento	$d(m\vec{v})$	=	$m\vec{g} dt$	$+\vec{F}_A dt$	$+\sum \vec{v}_e dm_e - \sum p_e A_e \vec{n}_e dt_e$
energía	$d(me)$	=	0	$+dW+dQ$	$+\sum h_{te} dm_e - \sum p_e A_e (\vec{n}_e \cdot \vec{v}_A) dt_e$
entropía	$d(ms)$	=	dS_{gen}	$+dQ/T$	$+\sum s_e dm_e$
exergía	$d(m\phi)$	=	$-T_0 dS_{gen}$	$+dW_u + (1-T_0/T)dQ$	$+\sum \psi_e dm_e$

Balances exergético: $\Delta\Phi = W_u + Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - T_0 S_{gen} + \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} \int \psi_e dm_e$

Exergía unitaria de un flujo (másico o molar) sin cambio de composición: $\psi = h_t - T_0 s = e + pv - T_0 s$

Balances de magnitudes aditivas para un volumen de control en régimen estacionario con 2 aberturas:

Magnitud	Ecuación de balance estacionario
masa	$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$
momento	$\vec{F}_A + m\vec{g} = \dot{m}(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) + (p_2 A_2 \vec{n}_2 - p_1 A_1 \vec{n}_1)$
energía	$h_{t_2} - h_{t_1} = w + q$
entropía	$s_{gen} = s_2 - s_1 - q/T$
exergía	$w_u = \psi_2 - \psi_1 + T_0 s_{gen} - (1 - T_0/T)q$

Potenciales, ecuaciones de estado, y coeficientes

Energía interna: $dU = Tds - pdV + \sum \mu_i dn_i$ (ec. Gibbs). Euler: $U = TS - pV + \sum \mu_i n_i$. Gibbs-Duhem: $0 = SdT - Vdp + \sum n_i d\mu_i$

Entalpía: $H = U + pV$, $dH = Tds + Vdp + \sum \mu_i dn_i$

Función de Helmholtz: $A = U - TS$, $dA = -SdT - pdV + \sum \mu_i dn_i$

Función de Gibbs: $G = U + pV - TS = H - TS = \sum \mu_i n_i$, $dG = -SdT + Vdp + \sum \mu_i dn_i$

Relaciones de Maxwell: e.g. $\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial p} = \frac{\partial^2 G}{\partial p \partial T} \Rightarrow \left. \frac{\partial(-S)}{\partial p} \right|_{T, n_i} = \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{p, n_i}$

Capacidad térmica: $c_p \equiv T \left. \frac{\partial s}{\partial T} \right|_{p, n_i} = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{p, n_i}$, $c_v \equiv T \left. \frac{\partial s}{\partial T} \right|_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{v, n_i}$, $\gamma \equiv \frac{c_p}{c_v}$, $c_p - c_v = \frac{\alpha^2 v T}{\kappa}$

Coefficiente de dilatación térmica: $\alpha \equiv \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_{p, n_i} \stackrel{\text{MGI}}{=} \frac{1}{T}$

Coefficiente de compresibilidad, y velocidad del sonido: $\kappa \equiv -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_{T, n_i} \stackrel{\text{MGI}}{=} \frac{1}{p}$, $c \equiv \sqrt{\left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_s} = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_s}} \stackrel{\text{MGI}}{=} \sqrt{\gamma RT}$

Coefficiente de Joule-Thomson: $\mu_{JK} \equiv \left. \frac{\partial T}{\partial p} \right|_h = \frac{-(1 - \alpha T)v}{c_p}$

Expresiones generales en variables T, p : $dv = \alpha v dT - \kappa v dp$, $dh = c_p dT + (1 - \alpha T)v dp$, $ds = \frac{c_p}{T} dT - \alpha v dp$

Factor de compresibilidad: $Z \equiv \frac{pv}{RT}$, $\frac{\Delta h^{cc}}{RT_{CR}} \equiv T_R^2 \int_{p_R \rightarrow 0}^{p_R} \left. \frac{\partial Z}{\partial T_R} \right|_{p_R} \frac{dp_R}{p_R}$, $\frac{\Delta s^{cc}}{R} \equiv \int_{p_R \rightarrow 0}^{p_R} \left(Z - 1 + T_R \left. \frac{\partial Z}{\partial T_R} \right|_{p_R} \right) \frac{dp_R}{p_R}$

Ecuación de estado de una sustancia linealmente dilatante: $\rho(T, p) = \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0)]$

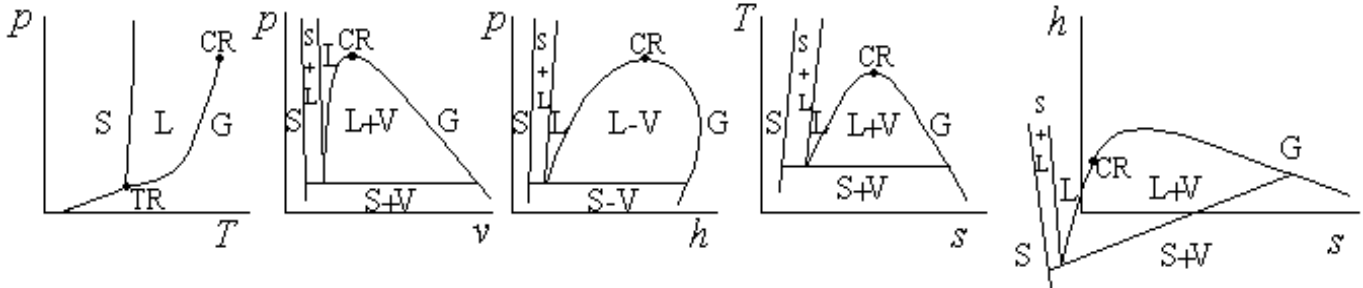
Ecuación de estado de van der Waals: $\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$

Ecuación de estado en variables reducidas, $f(p/p_{CR}, v/v_{CR}, T/T_{CR}) = 0$:

Modelo de van der Waals: $\left(p_R + \frac{3}{v_R^2}\right)\left(v_R - \frac{1}{3}\right) = \frac{8}{3}T_R \Rightarrow Z = \frac{1}{1 - \frac{1}{3v_R}} - \frac{9}{8} \frac{1}{v_R T_R}$

Modelo de estados correspondientes ([MEC](#)).

Cambio de fase en sustancias puras



Ecuación de Clapeyron ($g_L = g_V$): $\left. \frac{dp}{dT} \right|_{sat} = \frac{h_V - h_L}{T(v_V - v_L)} \xrightarrow{v_V \gg v_L, v_V = RT/p, h_{LV} = const} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{-h_{LV}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$

Ecuación de Antoine: $\ln\left(\frac{p}{p_u}\right) = A - \frac{B}{\frac{T}{T_u} + C}$ (p_u y T_u son valores unitarios; A, B y C dependen de ellos)

Ecuación de Guggenheim: $\ln\left(\frac{p}{p_{cr}}\right) = K \left(1 - \frac{T_{cr}}{T}\right)$ con $K \approx 6$

Fracción másica de vapor: $x \equiv \frac{m_V}{m_V + m_L}$. La densidad media es $1/\rho_m = (1-x)/\rho_L + x/\rho_V = (1-x)/\rho_L + xRT/p$ ($R = R_u/M$)

Fracción volumétrica de vapor (*void fraction*): $\phi \equiv V_V/(V_L + V_V)$. La densidad media es $\rho_m = (1-\phi)\rho_L + \phi\rho_V$.

Entalpía de una mezcla bifásica: $h \equiv \frac{H}{m} = \frac{m_V h_V + m_L h_L}{m_V + m_L} = x h_V + (1-x) h_L = h_L + x h_{LV}$

Calor necesario para mantener un flujo de salida de vapor: $\dot{Q} = \dot{m} h_{LV} \left(1 + \frac{v_L}{v_{LV}}\right) \approx \dot{m} h_{LV}$

Mezclas

Mezclas monofásicas

Medida de la composición. Fracciones molares x_i , fracciones másicas y_i , concentración c_i , masa molar M :

$$x_i \equiv \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{y_i / M_i}{\sum y_i / M_i}, \quad y_i \equiv \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i}, \quad \rho_i \equiv \frac{m_i}{V} = y_i \rho, \quad c_i \equiv \frac{n_i}{V} = \frac{\rho_i}{M_i} = \frac{x_i}{\sum x_i M_i} \rho, \quad M \equiv \frac{m}{n} = \frac{\sum x_i M_i}{\sum \frac{y_i}{M_i}}$$

Modelo de mezcla ideal monofásica (MMI o IMM; al mezclarse, ni se calienta/enfría ni se expande/contrae):

$$v(T, p, x_i) \stackrel{IMM}{=} \sum x_i v_i^*(T, p), \quad c_p(T, p_0, x_i) \stackrel{IMM}{=} \sum x_i c_{p_i}^*(T, p_0), \quad s(T, p, x_i) \stackrel{IMM}{=} \sum x_i s_i^*(T, p) - R \sum x_i \ln x_i$$

Densidad de una mezcla binaria. De $v = x_1 v_1 + x_2 v_2$, $M_m/\rho_m = x_1 M_1/\rho_1 + x_2 M_2/\rho_2$, que en gases queda $M_m/\rho_m = R_u T/p$.

Densidad de una mezcla binaria, en fracciones másicas: $1/\rho_m = y_1/\rho_1 + y_2/\rho_2$. $M_m = x_1 M_1 + x_2 M_2 = 1/(y_1/M_1 + y_2/M_2)$.

Balances másico y energético: $\Delta m = \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} \int dm_e, \Delta E = W + Q + \sum_{\text{tiempo}}^{\text{aberturas}} \int h_{t,e} dm_e, h(T, p, x_i) \stackrel{IMM}{=} \sum x_i h_i^*(T, p)$

Potencial químico: $\mu_i \equiv T \frac{\partial S}{\partial n_i} \Big|_{U,V,n_j}$ Equilibrio: $\nabla \left(\mu_i + M_i g z - \frac{1}{2} M_i (\vec{\Omega} \times \vec{r})^2 \right) = 0$, sin campos externos: $\nabla \mu_i = 0$

Variación general de entropía: $dS = \frac{1}{T} dU + \frac{p}{T} dV - \sum_{i=1}^C \frac{\mu_i}{T} dn_i$, $U = TS - pV + \sum \mu_i n_i$, $G \equiv H - TS = \sum \mu_i n_i$

Varianza: $V=2+C-F$ (los 2 por T y p , los C por los x_i , los $-F$ porque en cada fase hay una ec. Gibbs-Duhem)

Potencial químico en una mezcla ideal: $\mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^*(T, p) + RT \ln x_i$

$$\left. \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} \right|_{p,T,n_j} = \frac{RT}{x_i}$$

$$\left. \frac{\partial \mu_i}{\partial p} \right|_{T,n_i} = \left. \frac{\partial V}{\partial n_i} \right|_{T,p} = v_i \begin{cases} \stackrel{\text{PLM}}{=} \frac{M_i}{\rho_{Li}} \Rightarrow \mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^\oplus(T, p^\oplus) + \frac{p-p^\oplus}{\rho_{Li}/M_i} + RT \ln x_i \\ \stackrel{\text{PGM}}{=} \frac{RT}{p} \Rightarrow \mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^\oplus(T, p^\oplus) + RT \ln \frac{p}{p^\oplus} + RT \ln x_i \end{cases}$$

$$\left. \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \right|_{T,n_i} = \left. \frac{-\partial S}{\partial n_i} \right|_{T,p} = -s_i \Rightarrow g_i = \mu_i = h_i - T s_i = h_i + T \left. \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \right|_{T,n_i} \Rightarrow \left. \frac{\partial \frac{\mu_i}{T}}{\partial \frac{1}{T}} \right|_{T,n_i} = h_i$$

Potencial químico de un gas ideal: $\mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^\oplus(T, p^\oplus) + RT \ln \frac{p}{p^\oplus} + RT \ln x_i$

Potencial químico de un líquido incompresible: $\mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^\oplus(T, p^\oplus) + \frac{p-p^\oplus}{\rho_{Li}/M_i} + RT \ln x_i$

Balance exergético: $\Delta \Phi = \Delta(E + p_0 V - T_0 S)_{n_i} + \sum n_i (\mu_i - \mu_{i0})_{T_0, p_0} = W_u + \int \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dQ - T_0 S_{gen} + \sum^{\text{aberturas}} \int \psi_e \dot{n}_e dt$

Exergía que fluye por un conducto por unidad de gasto molar: $\psi \equiv (h_i - T_0 s)_{n_i} + \sum x_i (\mu_i - \mu_{i0})_{T_0, p_0}$

Exergía química molar de un componente puro de la mezcla de referencia sin cambio de fase: $\psi_{i0} = -RT_0 \ln x_{i0}$

Exergía de un componente condensable: $\psi_{i0} = -RT_0 \ln x_{i0} + RT_0 \ln \frac{p^*(T_0)}{p_0} + \frac{p_0 - p^*(T_0)}{\rho_L / M} \approx -RT_0 \ln \frac{x_{i0} p_0}{p^*(T_0)}$

Mezclas bifásicas

EQUILIBRIO LÍQUIDO-VAPOR

Modelo de mezcla ideal bifásica binaria: $m=m_L+m_V$, $V=V_L+V_V$, $H=H_L+H_V$, $S=S_L+S_V$

$$v(T, p, x_{ij}) = x_{V0} (x_{V1} v_{V1} + x_{V2} v_{V2}) + x_{L0} (x_{L1} v_{L1} + x_{L2} v_{L2}) \rightarrow \frac{x_{01} M_1 + x_{02} M_2}{\rho_m} = x_{L0} \left(\frac{x_{L1} M_1}{\rho_1} + \frac{x_{L2} M_2}{\rho_2} \right) + x_{V0} \frac{RT}{p}$$

$$h(T, p, x_{ij}) = x_{V0} (x_{V1} h_{V1} + x_{V2} h_{V2}) + x_{L0} (x_{L1} h_{L1} + x_{L2} h_{L2})$$

$$s(T, p, x_{ij}) = x_{V0} (x_{V1} s_{V1} + x_{V2} s_{V2} + \Delta S_{\text{mixing}_V}) + x_{L0} (x_{L1} s_{L1} + x_{L2} s_{L2} + \Delta S_{\text{mixing}_L})$$

$$\text{fase gaseosa (ref. sat-líqu.j): } v_V(T, p, x_{Vj}) = \sum x_{Vj} \frac{RT}{p} = \frac{RT}{p}, \quad h_V(T, p, x_{Vj}) = \sum x_{Vj} [h_{LV,ref,j} + c_{p,Vj} (T - T_{ref,j})]$$

$$\text{fase líquida (ref. sat-líqu.j): } v_L(T, p, x_{Lj}) = \sum x_{Lj} \frac{M_i}{\rho_{Lj}(T)}, \quad h_L(T, p, x_{Lj}) = \sum x_{Lj} c_{Lj} (T - T_{ref,j})$$

Equilibrio líquido-vapor de una mezcla binaria ideal (ley de Raoult): $\frac{x_{V1}}{x_{L1}} = \frac{p_1^*(T)}{p}$, $\frac{1-x_{V1}}{1-x_{L1}} = \frac{p_2^*(T)}{p}$

Fracciones molares totales: $x_{01} = x_{V1}x_{V0} + x_{L1}(1 - x_{V0})$, $1 - x_{01} = (1 - x_{V1})x_{V0} + (1 - x_{L1})(1 - x_{V0})$

EQUILIBRIO LÍQUIDO-SÓLIDO_NO_VOLÁTIL

Solubilidad: $x_{L,s} = K_{s,x}^{dis}(T)$ or $c_{L,s} = K_{s,c}^{dis}(T)$

$$\text{disolvente } \mu_{L,dis} = \mu_{V,dis} \Rightarrow x_{V,dis} = \frac{p_{dis}^*(T)}{p} x_{L,dis} = \frac{p_{dis}^*(T)}{p} (1 - x_{L,s})$$

$$\text{soluto } \mu_{S,s}^* = \mu_{L,s} = \mu_{L,s}^\infty + RT \ln x_{L,s} \Rightarrow \ln x_{L,s} = \frac{-g_{S \rightarrow aq,s}}{RT} \Rightarrow x_{L,s} = K_{s,x}^{dis}(T) \left[\frac{d \ln x_{L,s}}{d(1/T)} = \frac{-h_{S \rightarrow aq,s}}{R} \right]$$

EQUILIBRIO LÍQUIDO-GAS_CONDENSABLE

Solubilidad (ley de Henry): $x_{L,s} = K_{s,xx}^{dis}(T) x_{G,s} \frac{p}{p^\oplus}$ o $\frac{c_{L,s}}{c_{G,s}} = H_s(T)$ o $\rho_{L,s} = S_s(T) p_{G,s}$

$$\text{disolvente } \mu_{L,dis} = \mu_{V,dis} \Rightarrow x_{V,dis} = \frac{p_{dis}^*(T)}{p} x_{L,dis} = \frac{p_{dis}^*(T)}{p} (1 - x_{L,s})$$

$$\text{soluto } \mu_{G,s} = \mu_{L,s} = \mu_{L,s}^\infty + RT \ln x_{L,s} = \mu_{G,s}^\oplus + RT \ln \frac{x_{L,s} p^\oplus}{x_{G,s} p} \Rightarrow \ln \frac{x_{L,s} p^\oplus}{x_{G,s} p} = \frac{-g_{G \rightarrow aq,s}}{RT} = \ln K_{s,xx}^{dis}(T)$$

EQUILIBRIO LÍQUIDO-GAS_NO_CONDENSABLE

e.g. H₂O + aire_seco. Disolución del aire en agua a 25 °C: $H = c_L/c_G$, $H_{N_2} = 0,018$, $H_{O_2} = 0,036$. $x_{V,y} = p_y^*(T)/p$.

PROPIEDADES COLIGATIVAS

Presión de gases ideales: $p = \sum n_i RT / V$

Presión de vapor con soluto no volátil: $p_v = p_v^*(1 - x_s)$

Temperatura de ebullición con soluto no volátil: $T_b = T_b^* + \frac{RT_b^{*2}}{h_{LV}} x_s$

Temperatura de congelación con soluto volátil o no volátil: $T_f = T_f^* - \frac{RT_f^{*2}}{h_{SL}} x_s$

Presión osmótica: $p = p^* + n_s RT / V$.

Aire húmedo

Equilibrio líquido (H₂O) + gas_no_condensable (aire_seco). Aire en agua: $H = c_L/c_G$, $H_{N_2} = 0,018$, $H_{O_2} = 0,036$.

Fracción molar de vapor de agua en saturación (equilibrio líquido-vapor, ley de Raoult): $x_{v,sat} = \frac{p^*(T)}{p}$

$$\text{Humedad relativa: } \phi \equiv \frac{x_v}{x_{v,sat}} = \frac{x_v}{\frac{p^*(T)}{p}} = \frac{p}{M_{va} + 1} \frac{p^*(T)}{p} = \exp \left[\frac{h_{LV}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{dew}} \right) \right] = \exp \left[3985 \cdot \left(\frac{1}{T - 39} - \frac{1}{T_{dew} - 39} \right) \right]$$

$$\text{Humedad absoluta o relación de mezcla: } w \equiv \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_{va}}{\frac{1}{x_v} - 1} = \frac{M_{va}}{\frac{p}{\phi p^*(T)} - 1} = \frac{M_{va}}{\frac{p}{p^*(T_{dew})} - 1}$$

$$\text{Temperatura rocío } (T_{dew}): p^*(T_{dew}) = \phi p^*(T) \Rightarrow \frac{T_{dew}}{T_u} = \frac{1}{\frac{1}{T} - \frac{\ln \phi}{B}} - C, \quad T_{dew} = \frac{1}{\frac{1}{T - 39} - \frac{\ln \phi}{3985}} + 39$$

Entalpía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco: $h \equiv \frac{H}{m_a} \stackrel{\text{PGM}}{=} c_{pa}(T - T_0) + w[h_{LV_0} + c_{pv}(T - T_0)]$

Temperatura de saturación adiabática o de bulbo húmedo (T_{wet}): $h(p, T, \phi) = h(p, T_{\text{wet}}, 1) \rightarrow$:

$$c_{pa}(T - T_0) + w[h_{LV_0} + c_{pv}(T - T_0)] = c_{pa}(T_{\text{wet}} - T_0) + \frac{M_{va}}{\frac{p}{p^*(T_{\text{wet}})} - 1} [h_{LV_0} + c_{pv}(T_{\text{wet}} - T_0)]$$

Exergía (por unidad de masa de aire seco) del aire húmedo respecto al aire ambiente en condiciones (p_0, T_0, ϕ_0) :

$$\psi = (c_{pa} + wc_{pv})T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + \bar{w})R_a T_0 \ln \frac{p}{p_0} + R_a T_0 \left[(1 + \bar{w}) \ln \frac{1 + \bar{w}_0}{1 + \bar{w}} + \bar{w} \ln \frac{\bar{w}}{\bar{w}_0} \right]$$

donde $\bar{w} \equiv n_v/n_a = w/M_{va}$ es la relación molar de mezcla. Respecto a esa referencia, la exergía de un flujo de agua

pura (a T_w , sea líquido o vapor) es: $\psi_w = (h - T_0 s) - R_v T_0 \ln \phi_0 = c_L T_0 \left(\frac{T_w}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_w}{T_0} \right) - R_v T_0 \ln \phi_0$

Gradiente adiabático atmosférico: $\frac{dT}{T} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{dp}{p}$, $\frac{dp}{dz} = -\rho g = -\frac{p}{RT} g$, $\Rightarrow \Gamma \equiv -\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} = -9.8 \text{ °C/km}$

Mezclas reactivas. Combustión

Estequiometria: $\sum_{i=1}^C \nu_{ir}' M_i = \sum_{i=1}^C \nu_{ir}'' M_i$ o $0 = \sum_{i=1}^C \nu_{ir} M_i$ para el conjunto de reacciones independientes $r=1..R$

Grado de avance ξ , y afinidad A , de una reacción dada ($0 = \sum \nu_i M_i$): $\xi \equiv \frac{n_i - n_{i0}}{\nu_i}$, $A \equiv -\sum_{i=1}^C \nu_i \mu_i$

Potencial de Gibbs: $G \equiv U + pV - TS = H - TS = \sum_{i=1}^C n_i \mu_i$,

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^C \mu_i dn_i = -SdT + Vdp - Ad\xi \rightarrow \left. \frac{\partial G}{\partial \xi} \right|_{T,p} = -A, \quad \left. \frac{\partial A}{\partial T} \right|_{p,\xi} = \left. \frac{\partial S}{\partial \xi} \right|_{T,p}, \quad \left. \frac{\partial A}{\partial p} \right|_{T,\xi} = \left. \frac{-\partial V}{\partial \xi} \right|_{T,p}$$

Entalpía de formación: $h_f^\oplus(298 \text{ K}, 100 \text{ kPa}, \forall \text{ elemento}) = 0$, $h_f^\oplus(298 \text{ K}, 100 \text{ kPa}, \text{ compuesto})$ por calorim.

Entropía absoluta: $s(0 \text{ K}, \forall p, \forall \text{ compuesto}) = 0$, $s^\oplus(298 \text{ K}, 100 \text{ kPa}, \text{ compuesto}) = \int_{T=0 \text{ K}}^{T=298 \text{ K}} \frac{c_p(T, p^\oplus)}{T} dT$

Función de Gibbs de formación: $g_f^\oplus \equiv h_f^\oplus - T^\oplus \sum_{i=1}^C \nu_i s_i^\oplus$ para la reacción de formación del compuesto

Entalpía de reacción y poder calorífico: $h_r^\oplus \equiv \left. \frac{\partial H}{\partial \xi} \right|_{p^\oplus, T^\oplus} = \sum_{i=1}^C \nu_i h_{fi}^\oplus = \sum_{i=1}^C \frac{\dot{n}_i h_{fi}^\oplus}{\dot{n}_{\text{fuel}, in}} \equiv -\text{PC}$ (PCS; PCI si $h_{f_{H_2O}^\oplus(v)}$)

Función de Gibbs de reacción y trabajo máximo: $g_r^\oplus \equiv \left. \frac{\partial G}{\partial \xi} \right|_{p^\oplus, T^\oplus} = -A^\oplus = \sum_{i=1}^C \nu_i g_i^\oplus = h_r^\oplus - T^\oplus s_r^\oplus = w_{u, \min}^\oplus = \Delta \psi_r^\oplus$

Balance energético y temp. de comb. adiabática para la reacción $aM_{\text{fuel}} + bM_{\text{air}} + cM_{\text{other}} = \sum_{i=1}^C x_i M_i$, $\sum_{i=1}^C x_i = 1$

$$0 = q + a(h_{fuel}^{\oplus} + c_{p_{fuel}}(T_{e,f} - T^{\oplus})) + b(h_{air}^{\oplus} + c_{p_{air}}(T_{e,a} - T^{\oplus})) + c(h_{other}^{\oplus} + c_{p_{other}}(T_{e,other} - T^{\oplus})) - \sum_{i=1}^{C_{prod}} x_i(h_i^{\oplus} + c_{p_i}(T_s - T^{\oplus}))$$

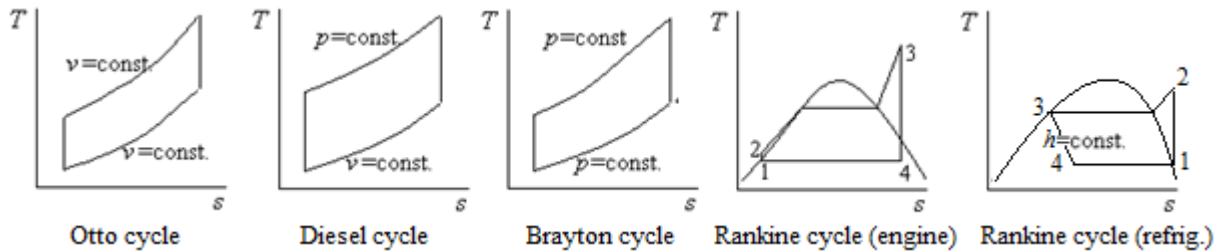
$$= q + aPCI + (ac_{p_{fuel}} + bc_{p_{air}} + cc_{p_{other}})(T_e - T^{\oplus}) - \sum_{i=1}^{C_{exhaust}} x_i c_{p_i}(T_s - T^{\oplus})$$

$$T_{ad} = T^{\oplus} + \frac{aPCI + ac_{p_{fuel}}(T_{e,fuel} - T^{\oplus}) + bc_{p_{air}}(T_{e,air} - T^{\oplus}) + cc_{p_{other}}(T_{e,other} - T^{\oplus})}{\sum_{i=1}^{C_{exhaust}} x_i c_{p_i}} \approx T^{\oplus} + \frac{aPCI}{c_{p_{air}}}$$

Composición de equilibrio (fase gas.): $0 = A \equiv -\sum_{i=1}^C \nu_i \mu_i \rightarrow \prod_{i=1}^C \left(\frac{x_i p}{p^{\oplus}}\right)^{\nu_i} = K(T, p^{\oplus}) = \exp\left[\frac{-g_r^{\oplus}}{RT^{\oplus}} + \frac{h_r^{\oplus}}{RT^{\oplus}}\left(1 - \frac{T^{\oplus}}{T}\right)\right]$

Velocidad de reacción ($\sum_{i=1}^C \nu_{ir}' M_i \rightarrow \sum_{i=1}^C \nu_{ir}'' M_i$): $\frac{\dot{\xi}}{V} = \frac{d\xi}{V dt} = \frac{dn_i}{V \nu_i dt} = \frac{dc_i}{\nu_i dt} = k(T, p) \prod c_i^{\nu_i} = B_a \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \prod c_i^{\nu_i}$

Máquinas térmicas: motores, frigoríficos y bombas. Rendimientos



Rendimiento energético de un motor térmico: $\eta_e \equiv \frac{W_{neto}}{Q_{entra}}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$

Rendimiento energético del ciclo Otto: $\eta_{e,Otto} = \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$

Rendimiento energético del ciclo Diesel: $\eta_{e,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{r_c^{\gamma} - 1}{\gamma(r_c - 1)}$, mixto $\eta_{e,dual} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{r_p r_c^{\gamma} - 1}{\gamma r_p (r_c - 1) + r_p - 1}$

Rendimiento energético de un ciclo Brayton: $\eta_{e,Brayton} = \frac{W_{net}}{Q_{pos}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$; $\pi|_{w,max} = \left(\eta_c \eta_T \frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$

Rendimiento energético de un ciclo Rankine: $\eta_{e,Rankine} = \frac{W_T - W_B}{Q_{caldera}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = \frac{c_p(T_3 - T_4)}{h_{lv_1} + c_p(T_3 - T_2)}$

Rendimiento isoentrópico de un compresor: $\eta_C \equiv \frac{w_s}{w} = \frac{h_{2_t} - h_{1_t}}{h_2 - h_1} = \frac{c_p(T_{2_t} - T_{1_t})}{c_p(T_2 - T_1)} = \frac{\left(\frac{p_{2_t}}{p_{1_t}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{2_t}}{T_{1_t}} - 1}$

Rendimiento isoentrópico de una turbina: $\eta_T \equiv \frac{w}{w_s} = \frac{h_{1_t} - h_{2_t}}{h_1 - h_2} = \frac{c_p(T_{1_t} - T_{2_t})}{c_p(T_1 - T_2)} = \frac{1 - \frac{T_{2_t}}{T_{1_t}}}{1 - \left(\frac{p_{2_t}}{p_{1_t}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$

Rendimiento isoentrópico de un difusor: $\eta_D \equiv \frac{\Delta e_s}{\Delta e} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_{2_i} - h_1} \stackrel{PGM}{=} \frac{c_p (T_{2'} - T_1)}{c_p (T_{2_i} - T_1)} = \frac{\left(\frac{p_{2_i}}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{2_i}}{T_1} - 1}$

Rendimiento isoentrópico de una tobera: $\eta_N \equiv \frac{\Delta e}{\Delta e_s} = \frac{h_{1_i} - h_{2'}}{h_{1_i} - h_{2_i}} \stackrel{PGM}{=} \frac{c_p (T_{1_i} - T_2)}{c_p (T_{1_i} - T_{2_i})} = \frac{1 - \frac{T_2}{T_{1_i}}}{1 - \left(\frac{p_2}{p_{1_i}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$

Potencia necesaria para la propulsión de un vehículo: $\dot{W}_{total} = \dot{W}_{accel} + \dot{W}_{climb} + \dot{W}_{roll} + \dot{W}_{fluid-drag}$
 con $\dot{W}_{accel} = mav$, $\dot{W}_{climb} = mgv \cos \theta$, $\dot{W}_{roll} = \mu mgv \cos \theta$, $\dot{W}_{fluid-drag} = c_D A \frac{1}{2} \rho v^3$

Potencia propulsante: $\dot{W}_{prop} = Fv_0$, siendo v_0 la velocidad de avance y F el empuje, que para sistemas propulsivos con ruedas o hélices es proporcional al par motor, para cohetes es $F_{rocket} = \dot{m}_p v_e + (p_e - p_0) A_e$, y para aerorreactores simples es $F_{turbojet} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) v_e - \dot{m}_a v_0 + (p_e - p_0) A_e \approx \dot{m}_a (v_e - v_0)$, donde v_e es la velocidad de escape.

Rendimientos energético y exergético de un refrigerador: $\eta_e \equiv \frac{Q_2}{W}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

Rendimientos energético y exergético de una bomba de calor: $\eta_e \equiv \frac{Q_1}{W}$, $\eta_x \equiv \frac{\eta_e}{\eta_{e,max}}$, $\eta_{e,max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$