

CAPITOLO 7 – TEMPO DI RITORNO EXERGETICO

POTENZIALE CHIMICO

Per un sistema semplice aperto con r costituenti non reattivi, in equilibrio stabile, la relazione fondamentale ha la forma $U = U(S, n_1, \dots, n_r, V)$. Si chiama potenziale chimico del costituente i -esimo la grandezza

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S, n', V} \quad (1)$$

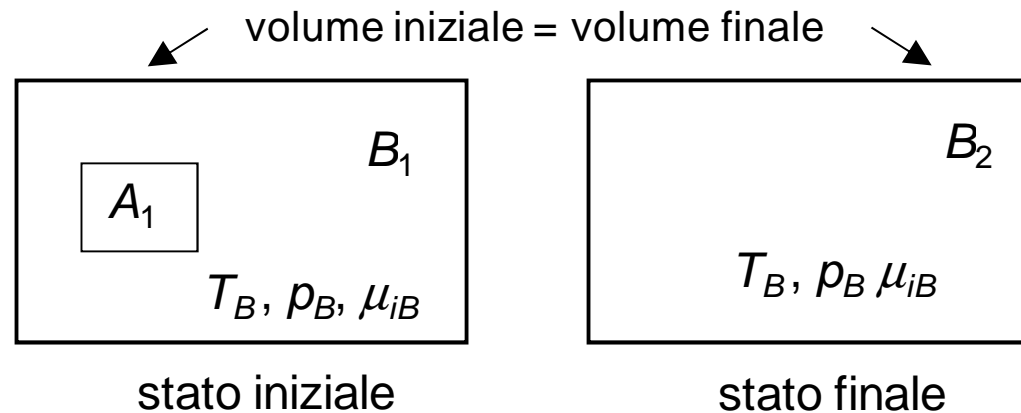
L'equazione di Gibbs assume la forma

$$dU = T dS - p dV + \sum_{i=1}^r \mu_i dn_i$$

Anche se i costituenti sono reattivi, si assumono nella (1) non reattivi; la variazione dn_i si ottiene prendendo particelle del costituente i -esimo dall'esterno.

EXERGIA

Si consideri un sistema semplice aperto A , che è contenuto entro un sistema semplice aperto B . Questo, idealizzazione dell'atmosfera terrestre, passa soltanto attraverso stati di equilibrio stabile con valori fissati della temperatura T_B , della pressione p_B e dei potenziali chimici μ_{iB} . Il sistema composto AB è chiuso e ha volume fissato.



Tutti i costituenti di A presenti anche in B ; stato iniziale A_1 di A scelto arbitrariamente. Vogliamo determinare il lavoro massimo che può essere compiuto da AB in un weight process alla fine del quale tutta la materia è contenuta in B .

Il lavoro massimo si ottiene con tutti e soli i processi reversibili, e vale:

$$(W_{1 \rightarrow 2})_{\max} = (U_1 - U_2)_A - T_B (S_1 - S_2)_A + p_B (V_1 - V_2)_A - \sum_{i=1}^r \mu_{iB} (n_{i1} - n_{i2})_A$$

ovvero
$$(W_{1 \rightarrow 2})_{\max} = \bar{E}_1 - \bar{E}_2 \quad (1)$$

dove
$$\bar{E} = U - T_B S + p_B V - \sum_{i=1}^r \mu_{iB} n_i \quad (2)$$

è detta exergia di A .

La (1) e la (2) danno il lavoro massimo ottenibile da AB per ogni stato finale di A . Se, nello stato finale, A ha volume zero e numeri di moli zero, allora l'energia e l'entropia di A sono zero. Con questa scelta dello stato finale, il lavoro massimo ottenibile in un weight process di AB è dato dalla (2), con le proprietà di A valutate nello stato iniziale.

I valori dell'exergia specifica molare dei combustibili chimici si calcolano con una espressione diversa, la cui deduzione richiede conoscenze di termodinamica chimica. Per approfondimenti: E. Zanchini, T. Terlizze, Molar exergy and flow exergy of pure chemical fuels, *Energy* 34 (2009) 1246–1259.

Per i calcoli del ritorno exergetico di interventi di risparmio energetico, che non richiedono grande precisione, si può approssimare l'exergia specifica di un combustibile chimico con il suo potere calorifico inferiore (lower heating value).

Il potere calorifico inferiore di un combustibile chimico è la quantità di calore che si deve sottrarre ai prodotti di combustione (adiabatica, completa) dell'unità di massa del combustibile, a pressione costante, per riportarli alla temperatura iniziale dei reagenti, lasciando però l' H_2O in stato (metastabile) di gas ideale (il termine più preciso è: entalpia di reazione standard).

I valori del potere calorifico inferiore (entalpia di reazione standard) dei combustibili chimici sono tabulati.

TEMPO DI RITORNO EXERGETICO

Un intervento di miglioramento dell'efficienza energetica ha un consumo di exergia (di fonti energetiche primarie) per la sua realizzazione C_{ex} . Esso produce, ogni anno, un risparmio di exergia, R_{ex} , rispetto alla situazione attuale o ad un altro intervento di minore qualità.

Si chiama tempo di ritorno exergetico il numero n_{ex} di anni che soddisfa la relazione $n_{ex} R_{ex} = C_{ex}$.

$$n_{ex} = \frac{C_{ex}}{R_{ex}}$$

CONSUMO DI EXERGIA PER LA REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

Il consumo di exergia dovuto alla realizzazione dell'impianto si trova sommando i consumi di exergia dovuti alla realizzazione dei materiali che lo costituiscono e al loro assemblaggio e posa in opera. L'exergia necessaria per la realizzazione di un kg di ciascun materiale (approssimata con il potere calorifico inferiore dei combustibili utilizzati) è già disponibile in tabelle. Essa viene spesso (impropriamente) chiamata *embodied energy* (energia immagazzinata).

Material	Embodied energy MJ/kg
Bricks	
General	3
Limestone	0.85
Cement	
General	4.6 ± 2
Portland cement, wet kiln	5.9
Portland cement, dry kiln	3.3
Mortar (1:3 cement:sand mix)	1.4
Mortar (1:4)	1.21
Concrete	
General (1:2:4 cement:sand:aggregate as used in construction of buildings)	0.95
Precast concrete (cement:sand:aggregate)	2
High strength (1:1:2)	1.39
Non-structural mass concrete (1:3:6)	0.77
Glass	
General	15
Fibreglass (Glasswool)	28
Steel	
General (typical, 42.3% recycled)	24.4
General, primary	35.3
General, secondary	9.5
Stainless	56.7
Timber	
General	8.5
Glue laminated timber	12
Hardboard	16
Furniture	23

G.P. Hammond, C.I. Jones, Embodied energy and carbon in construction materials,
 Proceedings of Institution of Civil Engineers, Energy 161 (2) 2008 87-98

La *embodied energy* è, totalmente o parzialmente, exergia distrutta. Per alcuni materiali (legno, plastica) una parte della embodied energy è recuperabile; questa parte viene detta *feedstock energy*, e può essere eventualmente detratta dal consumo di exergia.

Per il polietilene, l'*embodied energy* è 84.4 MJ/kg. Non considereremo disponibile la *feedstock energy*.

Energia primaria corrispondente ad 1 kWh di energia elettrica: 2.175 kWh
Delibera EEN 3/08 dell'Agenzia per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG)

COSTO EXERGETICO DEI DUE IMPIANTI

IMPIANTO A POMPA DI CALORE	
Elemento	Costo MWh
Sonde	40.1
Tubi polietilene	392.7
Pompe di calore	18.6
Serbatoio freddo	8.4
Deumidificatori	3.4
Sistema fotovoltaico 51.2 kWp * 8.5 MWh/kWp	435.2
Caldaia a pellet	6.8
TOTALE	905.2

IMPIANTO TRADIZIONALE	
Elemento	Costo MWh
Caldaia a gas	8.5
Pompe di calore aria-aria	38
TOTALE	46.5

DIFFERENZA: 858.7 MWh

SENZA FOTOVOLTAICO: 470 MWh

DIFFERENZA: 423.5 MWh

CONSUMO ANNUO DI EXERGIA

Impianto a pompa di calore con fotovoltaico: **24.56 MWh termica**

Impianto a pompa di calore senza fotovoltaico : 24.56 MWh termica + 52.25 MWh elettrica = 24.56 + 113.64 = **132.80 MWh primaria**

Impianto tradizionale: 153.04 MWh termica + 32.67 MWh elettrica = 153.04 + 71.06 termica = **224.1 MWh primaria**

DIFFERENZA: 858.7 MWh

DIFFERENZA: 423.5 MWh

CONSUMO ANNUO: 24.56 MWh

CONSUMO ANNUO: 132.8 MWh

Risparmio exergetico annuo con fotovoltaico: $224.1 - 24.56 = 199.54$ MWh

Risparmio exergetico annuo senza fotovoltaico: $224.1 - 132.8 = 91.3$ MWh

Ritorno exergetico con fotovoltaico: $n_{ex} = 858.7 / 199.54 = 4.30$ anni

Ritorno exergetico senza fotovoltaico: $n_{ex} = 423.5 / 91.3 = 4.64$ anni

Mentre il tempo di ritorno economico degli impianti a pompa di calore accoppiata al terreno è assai lungo, e non incoraggia gli investimenti, il ritorno exergetico è ottimo: meno di cinque anni con una durata di oltre 50.

Bisogna agire sui costi e introdurre incentivi adeguati