

GIUSEPPE MARSOTTO (INGiuseppe)

L'EXERGIA: NON TUTTA L'ENERGIA È UGUALE!

28 December 2012

Questo articolo è un tentativo da parte mia di mettere in luce alcuni concetti prettamente di Ingegneria Energetica, molto specialistici, che molti dei Tecnici ed Ingegneri, magari diplomati e/o laureati in *tempi passati*, non hanno trattato nella loro carriera di studio e, difficilmente, hanno trovato poi nella vita lavorativa. Cosa tratterò? Ovviamente non tutto quello che in un corso specialistico universitario si tratta, ma almeno gli argomenti principali riguardanti la definizione e l'applicazione di **Exergia** e dell'**Analisi Exergetica**, che spesso obbliga a scelte ed azioni in **contraddizione** con quelle che verrebbero assunte da Tecnici che non hanno mai sentito questa espressione, che troppo spesso si scandalizzano tanto (per nulla) sulle scelte energetiche di Tecnici di più ATTUALE competenza.



Andiamo con ordine, in quanto il tema è abbastanza complesso, ma molto affascinante.

Prima di tutto, dare una definizione etimologica di Exergia, come si potrebbe fare per l'energia, poco serve, e penso non ci sia neppure; Exergia ed Analisi Exergetica non hanno troppa letteratura alle spalle, ma molta applicazione sperimentazione, il che rende difficile studiar la materia e collocarla nel giusto ambito, problematica tipica delle tecniche nate "sul campo" e non "sui libri".

Ma non scoraggiamoci; la definizione più comune è: *l'exergia di un sistema è il **massimo lavoro** ottenibile dall'interazione sistema-ambiente circostante.*

La definizione vuol dire tutto e niente, anzi, ahimè ho visto che rischia di essere dannosa per chi non ne sa nulla; indi per cui non mi soffermo su questa definizione, che è esatta ma cruda.

CONSIDERAZIONI INIZIALI

Provocazione: che differenza c'è tra un kWh usato da un apparecchio elettrico

domestico e lo stesso scambiato in uno scambiatore di calore?

Be', nessuno in termini **quantitativi**, ma in termini **qualitativi** sì, e molta!

Ma cosa c'è realmente di diverso tra questi due stessi quantitativi di energia? Distinguiamo dapprima la diversa **natura** della forma energetica scambiata, una elettrica e l'altra termica.

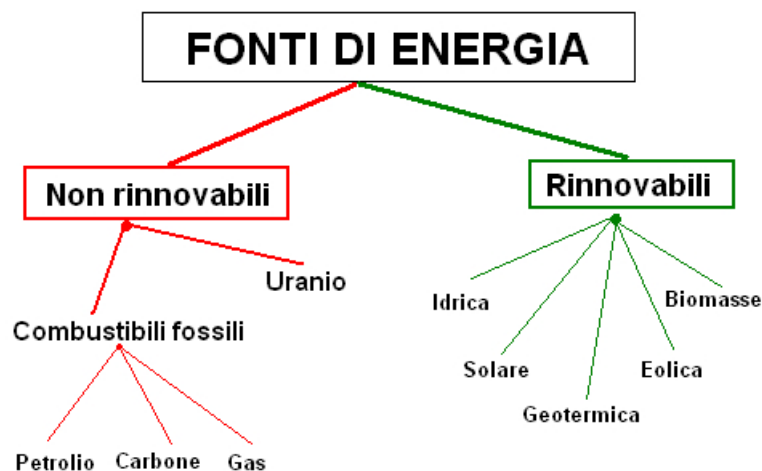
Quindi, vediamo le varie forme energetiche (dilemma da sempre quello di classificarle **TUTTE** e **COMPLETAMENTE**)

Forme in cui si manifesta l'Energia:

- **MECCANICA** [macroscopica] cinetica e potenziale
- **CHIMICA** [microscopica: Energia Interna]
- **TERMICA** [quanti di energia: fononi]
- **NUCLEARE**
- **ELETTROMAGNETICA** [Elettrostatica e Magnetica]
- **RADIANTE** [quanti di energia: fotoni]

Questo è **un elenco** delle *più importanti* forme di Energia presenti in natura, o meglio, quelle più usate e conosciute dall'Uomo.

Ben altro paio di maniche è la classificazione delle **FONTI** di energia, ossia delle **sostanze** o **situazioni** in cui si trovano oggetti inanimati o meno, dove è possibile riscontrare la presenza di energia, nelle forme elencate sopra; qui una classificazione.



In natura riscontriamo che le **Rinnovabili** sono forme meccaniche (idraulica ed eolico), termiche (geotermia, solare termico e termodinamico), radiante (solare FV), mentre le **Non-Rinnovabili** sono chimiche (fossili) e nucleare.

Altra importante considerazione da fare è quella relativa ai **processi di trasformazione** da una forma all'altra o alla stessa forma trasmessa tra sistemi. Il concetto che sta sotto è quello di **DEGRADAZIONE DELL'ENERGIA**.

Ma prima di tutto andrebbe fatta una distinzione qualitativa tra tutte queste forme

elencate (si possono trovare in letteratura anche altre classificazioni, soprattutto per gli aspetti matematici e fisici dell'energia): si possono distinguere due diverse forme:

- **ENERGIA ORGANIZZATA**
- **ENERGIA DISORGANIZZATA**

L'ENERGIA ORGANIZZATA è a sua volta quella:

- Potenziale : cioè tutta quella dove è possibile individuare un potenziale, sia esso elettrico, magnetico, gravitazionale ed altri ancora, magari ancora da scoprire.
- Cinetica ORGANIZZATA : quella di un flusso di particelle ipoteticamente organizzate in moto uniforme, con velocità **relativa** pari a zero.

Punti cruciali di queste forme energetiche:

- Qualsiasi trasformazione tra una e l'altra si realizza a rendimento unitario.
- Ogni trasformazione tra due sistemi di energia organizzata avviene solo attraverso scambio alla frontiera di lavoro.
- I trasferimenti di energia organizzata avvengono senza modifica dell'Entropia dei sistemi che interagiscono.

L'ENERGIA DISORGANIZZATA è quella interna di sistemi materiali, l'energia Termica (o meglio RADIANTE TERMICA), quella chimica e associata a fenomeni turbolenti.

Punti cruciali di queste forme energetiche:

- Esiste un limite superiore di conversione tra forma disorganizzata ed organizzata, dipendente dalle variabili termodinamiche del sistema in conversione.
- Necessariamente, la conversione di energie disorganizzate coinvolgono l'aumento entropico dei sistemi in esame.

REVERSIBILITÀ ED IRREVERSIBILITÀ

Ancora dobbiamo aggiungere la definizione, prettamente Termodinamica, ma estendibile anche ad ambiti diversi, di processo **Reversibile** ed **Irreversibile**.

In realtà, il concetto va esteso a qualunque applicazione fisica, in merito, ricordo, un bellissimo libro che lessi, "Che cos'è l'Entropia" di Vittorio Silvestrini, che veramente

fa luce sul tema.

La nascita del concetto, così come lo conosciamo, ovvero puramente Termodinamico, non deve trarre in inganno. Nel mondo, nei sistemi gravitazionali, tutto è Entropico, ovvero ha un verso ben definito di come si evolvono spontaneamente **o MENO (!!)** i sistemi. Vediamo il concetto ai suoi albori, ahimè spiegato non con definizione ma attraverso un elenco di caratteristiche.

Dicasi processo Reversibile, un processo che:

- Non può mai essere totalmente realizzato.
- **NON ESISTE** (nei sistemi gravitazionali entropici) ma fa da **limite**, per confronto con i reali processi.
- Rappresenta un'astrazione matematico-filosofica che fa da base delle definizioni dei processi reali che si allontanano dal Reversibile a causa dei fenomeni entropici gravitazionali (meglio chiamati come Irreversibilità, ossia isteresi, attriti, turbolenza, miscelamenti, anisotropie macro/microscopiche ecc...).

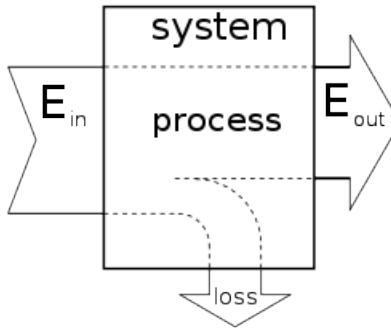
Dicasi processo Irreversibile, un processo che:

- Rappresenta i reali processi in natura.
- Intrinsecamente apporta un aumento dell'Entropia (intesa come variabile termodinamica e non generale).

A sua volta classificabili sono i fenomeni entropici:

- **Perdita di lavoro meccanico diretta:** attriti, isteresi, resistenze ohmiche, turbolenza (erosione dell'acqua di un ruscello sulle rocce, lenta usura del filamento di Tungsteno di una lampadina..).
- **Spontaneità direzionale degli eventi:** reazioni chimiche libere, diffusioni/espansioni libere, ritorno allo standard ambientali di variabili e caratteristiche di situazioni e sostanze (caduta di massi in montagne per liberarsi della loro energia potenziale, equalizzazione della temperatura della tazza di caffè bollente con quella ambientale...).

Il calcolo delle Irreversibilità, spesso è un ricorso alla misura della differenza tra la variabile studiata in teoria e quella misurata nella realtà, ovvero, si ritiene che tutto quello che produce irreversibilità è contenuto nella frazione differenziale tra il Reversibile teorico ed il reale. Tutto questo (sfido qualcuno a dimostrarmi il contrario..) è sempre positivo.



250px-Efficiency diagram by Zureks svg

Esempio: Impianti Idroelettrico.



A disposizione la potenza:

$$P_d = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_d$$

dove:

- ρ = densità dell'acqua $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$)
- g = costante gravitazionale ($9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$)
- Q = portata d'acqua $\text{[m}^3\text{]/s}$
- H = altezza utile [m]

Mentre otteniamo solo la potenza elettrica all'alternatore P_e .

Tutto ciò che differisce tra le due sono perdite (nella condotta, nella macchina, nell'alternatore):

$$P_r = P_d - P_e$$

Questo è un caso dove tutte le perdite (a parte quelle termiche dell'alternatore) sono

della prima natura, ovvero perdite di lavoro meccanico dirette.

Questo esempio è utile perchè mette in luce come sia veritiero, ed estendibile a *tutto*, il postulato dell'Entropia:

l'Entropia di un sistema isolato aumenta sempre.

Termodinamicamente si esprime la potenza persa per lavoro in produzione entropica con la seguente:

$$W_r = T_0(S_f - S_i)$$

Inseriamo le perdite di forma termica, che sono date dall'entropia generata nei vari scambi di potenza termica, alle varie temperature a cui si sviluppano, e vengono sommate; (ricordo che $Q = S \cdot T$) :

$$\sum_{r=1}^N Q_r / T_r$$

Risulta quindi:

$$P_r = (S_f - S_i) - \sum_{r=1}^N Q_r / T_r > 0$$

Se sono moltiplicate le grandezze per la portata massica, risulta Potenza come unità di misura. Questa formula è comune per il solo uso termodinamico e non per tutte le altre vicende su cui l'Entropia può essere utilizzata, soprattutto per i sistemi termomeccanici, macchine a fluido, ecc...

EXERGIA E CALCOLI EXERGETICI

Vediamo il **Primo Principio della Termodinamica**. Non è altro che un bilancio in-out di una regione di controllo dell'energia. La scrittura migliore a mio avviso è questa:

$$dE = dQ - dW$$

Vediamo il **Secondo Principio della Termodinamica**. Estende il Primo Principio, non all'Energia, ma all'Entropia.

$$dS > 0$$

Formula generale dell'Exergia:

$$ENERGIA = EXERGIA + ANERGIA$$

Il contributo Anergetico, è la parte Energetica NON utilizzabile, quindi, secondo la *cruda* definizione riportata all'inizio, non fa parte dell'Exergia. Il contributo Anergetico è lo STATO BASE DEL CONTENUTO ENERGETICO, e per sapere se è ESTRAIBILE del lavoro MECCANICO da quel sistema, quel sistema deve possedere un'aliquota exergetica.

Esempio: aria in pressione a 200 [atm], aria di composizione standard, a temperatura ambiente (15[C°]), FERMA (!!), ad un'altezza di 0 [m] (sul riferimento geodetico), possiede l'Exergia, ovvero **energia convertibile in lavoro meccanico** per 199 [atm] di espansione (non centra NULLA il Rendimento della macchina dove avviene l'espansione (!!), stiamo parlando di ipotetico lavoro meccanico estraibile).

Ovviamente non può espandere fino a pressione (ASSOLUTA) pari a 0 [atm], in quanto quest'aria "vive" in un ambiente gravitazionale entropico che è (ripeto è!!) a pressione ambiente di 1 [atm], quindi la pressione REALMENTE utilizzabile e DECURTATA della parte ambientale, che è quella **ANERGETICA. SULLA LUNA AVREBBE ESPANSO FINO A 0 [atm], IN QUANTO L'AMBIENTE LUNARE è (!!)** A PRESSIONE 0 [atm].

Definiamo le forme di Exergia legate alla natura in cui si manifesta l'Energia stessa, come di seguito.

EXERGIA TERMICA

Legando il primo ed il secondo principio della termodinamica, risulta la definizione di Exergia termica (non si trattano tutte le formule di passaggio)

$$B_q = Q_r(1 - T_0 / T_r)$$

Deriva dal fatto che lo scambio di calore possiede exergia, cioè è utilizzabile solo se è a temperatura diversa da quella ambientale. Si intuisce che maggiore è la temperatura a cui si scambia calore, maggiore è l'Exergia, cioè la QUALITÀ dell'Energia posseduta. Scambiare calore a temperatura ambiente è buttar via energia totalmente per nulla, significa aumentare l'Entropia del sistema.

Esempio: il riscaldamento degli ambienti domestici; tutta energia buttata, o meglio,

l'exergia finale è zero!

EXERGIA MECCANICA ED ELETTRICA

L'exergia meccanica è PER DEFINIZIONE Exergia pura al 100%.

$$B_m = W$$

Purtroppo sento dire che quella elettrica sia più pura. Non è così, in quanto l'Energia elettrica è di natura duale a quella magnetica, che è intrinsecamente legata a movimenti di cariche nel tempo; movimento significa intrinsecamente riportare la propria energia a quella cinetica, che è meccanica quindi pura. Tutto questo appena descritto è una CONVERSIONE, (intrinseca, all'interno dei fenomeni elettrici), e quindi, come ogni conversione, porta a perdite intrinseche; in questo caso, il fatto stesso che si CREI un campo magnetico, ne è sintomo di perdita. Il punto di vista di questo vale solo in ambito energetico, ed è spesso in contraddizione con altri concetti della fisica. Non è altresì corretto dire che l'Energia Elettrica sia di maggior qualità di quella Meccanica, perché a sua volta prodotta dalla Meccanica; questo ragionamento va bene solo per i sistemi energetici di produzione dove si fa Analisi Exergetica. Il fattore di qualità dell'Energia Elettrica è di circa 1,05. Qualitativamente, queste perdite pesano abbastanza poco sulla natura dell'Exergia Elettrica.

$$B_e = W / 1.05$$

EXERGIA CHIMICA

L'Exergia chimica, è rapportata alla situazione Standard ambientale. Si è definito che l'ambiente di riferimento è composto dal seguente sistema, riportato in tabella.



oil wells

Sostanza	Exergia chimica [kJ/kmol]	Entalpia di formazione [kJ/kmol]	Massa molare standard [kg/kmol]
H ₂ O	11710	241818	18,015
CO	275430	-110525	28,01
H ₂	238490	0	2,016
O ₂	3970	0	31,999
N ₂	720	0	28,014
CO ₂	20140	-393509	44,01
CH ₄	836510	-74520	16,043

L'Exergia Chimica è la somma di due componenti, una di miscelazione delle speci e l'altra del quantitativo energetico delle stesse in relazione alle concentrazioni e tipologie di sostanze presenti. La tabella riporta gli elementi che vengono standardizzati come "AMBIENTE" di riferimento. Ad esempio il metano CH₄ contiene exergia perchè un suo qualsiasi quantitativo rispetto all'aria possiede energia chimica di formazione del metano, convertibile in lavoro.

La formula è coerente e ben spiegata così:

$$B_k = \sum_{i=1}^N [x_i R_0 T_0 \ln(x_i) + x_i E k_i]$$

EXERGIA FISICA

Niente di diverso fisicamente da quello appena esposto. Un artificio per lo studio dei sistemi, prettamente Energetici, che serve a determinare perti di Exergia meccanica.

$$B_f = h - h_0 - T_0(S - S_0)$$

con h entalpia e S entropia.

BILANCI EXERGETICI ED APPLICAZIONI

Il bilancio di exergia per un qualsiasi sistema è:

$$B_e + B_i = B_u + B_d + B_p$$

con:

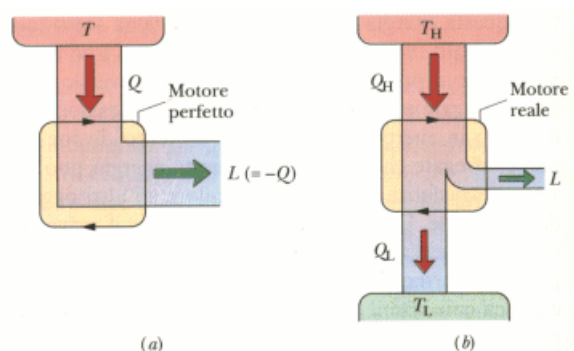
- B_e = Exergia entrante (nel mio volume di controllo);
- B_i = Exergia immagazzinata ("acchiappata e mantenuta" dal mio volume di controllo);
- B_u = Exergia utile (riscontrabile nella definizione dell'utilità del componente studiato);
- B_d = Exergia distrutta (parte anergetica intrinseca della trasformazione);
- B_p = Exergia persa (parte ancora utilizzabile ma non utilizzata);

Vediamone alcune applicazioni ai **SISTEMI ENERGIVORI**:

Automobile:

- Exergia entrante B_e = exergia chimica del combustibile;
- Exergia immagazzinata B_i = nessuna (nemmeno quella termica, perchè quando la spegniamo si raffredda (unica parte: eventuali incrostazioni d'olio/ combustibile, residue nelle pareti, ancora con componenti exergetiche chimiche));
- Exergia utile B_u = Flusso di potenza meccanica che vince le perdite per attrito che si oppongono al moto, più il flusso degli ausiliari (intesi come necessari al processo e/o desiderati dal conducente);
- Exergia distrutta B_d = attriti del cilindro, e tutti quelli interni nella conversione chimico termo-meccanica ((trasferimento alla componente anergetica);
- Exergia persa B_p = fumi caldi (ancora utilizzabili, ma non utilizzati);

Entra Exergia pregiata come quella di un prodotto non solo esauribile, ma trattato in raffineria, che si trascina con se il contenuto exergetico delle operazioni che lo hanno prodotto ed esce solo energia per vincere delle perdite.



Condensatore di vapore:

- Exergia entrante B_e = quantità energetica termica e di pressione (la pressione è al di sotto di quella ambientale, quindi è diversa dallo standard, quindi esiste lavoro meccanico estraibile (un'ipotetico sistema che espande l'ambiente a pressione ambiente all'interno del condensatore che si trova a più bassa pressione)) ed il contributo cinetico;
- Exergia immagazzinata B_i = nessuna (quando si spegne non resta nulla);
- Exergia utile B_u = calore latente ceduto all'acqua (in questo caso è bene definire lo **scopo** del condensatore, quello di far condensare, cioè far perdere energia al flusso di vapore fino a condensarlo; potrebbe esser strano che la funzione di un organo sia quello di perdere energia, ma è alla base della trasformazione fisica che avviene in esso);
- Exergia distrutta B_d = vortici interni creati dall'iterazione tubazioni, flusso di vapore entrante;
- Exergia persa B_p = difficilmente riscontrabile. Potrebbe essere quella del non completo cambio di fase, ma sostanzialmente questo non avviene, visto che si estrae liquido saturo;

Vediamone alcune applicazioni ai **SISTEMI ENERGETICI**:

FV:

- Exergia entrante B_e = exergia radiante della luce nella suo COMPLETO spettro, in forma elettromagnetica (diviso 1,05 cioè NON pura);
- Exergia immagazzinata B_i = residue cariche non passanti la banda di valenza (trascurabile);
- Exergia utile B_u = exergia elettrica uscente (quella continua);
- Exergia distrutta B_d = quella convertita in termica, anzichè elettrica nella conversione fotovoltaica;
- Exergia persa B_p = piccole perdite nei cavi, ma trascurabili, e la riflessione ai raggi solari, del pannello;



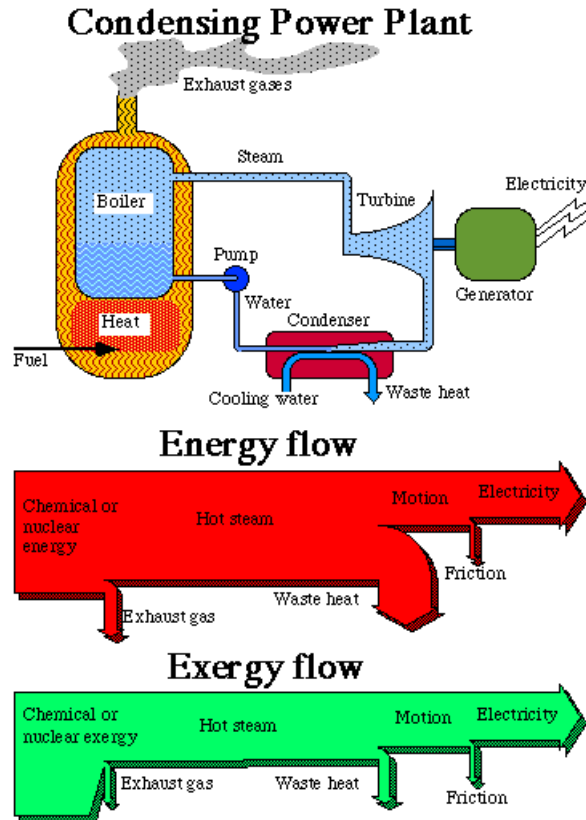
Impianto nucleare BWR



- Exergia entrante B_e = exergia combustibile nucleare;
- Exergia immagazzinata B_i = nessuna;
- Exergia utile B_u = potenza ai morsetti (elettrica);
- Exergia distrutta B_d = quella del ciclo termico (a volte il 55% dell'entrante);
- Exergia persa B_p = quella del raffreddamento vapore (% bassissima in quanto va persa ad una temperatura bassa quindi di scarsa qualità);

Da notare sul diagramma la diversa entità dei flussi energetici ed exergetici, in questo caso di un termoelettrico Tradizionale. L'analisi exergetica ci dice come non

sia il condensatore la maggior causa di spreco ma la caldaia. Ecco perchè si lavora sulle combustioni ancora tanto.



CONCLUSIONI (PER ORA)

L'Analisi Exergetica, è uno strumento molto importante in Energetica ed Economia. Ho elencato, per motivi tempistici logistici, solo alcune applicazioni e solo alcune definizioni. Lo scopo principale era quello di illustrare alcuni concetti importanti molto poco conosciuti, o peggio, conosciuti male. Questo approccio, non solo discrimina l'Energia, ma anche l'uso della stessa, e la pianificazione della produzione. Sono dell'idea che questo debba essere il corretto modo di vedere l'uso e la produzione energetica applicabile sia su scala locale che su quella nazionale. Ringrazio.

Estratto da ["http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Ingiuseppe:l-exergia-non-tutta-l-energia--uguale"](http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Ingiuseppe:l-exergia-non-tutta-l-energia--uguale)