

SISTEMI.

Quantità o qualità dell'energia: l'approccio del processo exergetico

RICERCA DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NELLA FASE DI PROGETTAZIONE

Il concetto termodinamico che ci permette di individuare nel dettaglio ciò che è consumato da tutti i sistemi in funzione - sia che si tratti di sistemi costruiti dall'uomo, come i motori termodinamici e le pompe di calore elettriche, che di sistemi biologici, come microbi, piante e animali, incluso il corpo umano - è l'exergia. In altri termini, l'exergia quantifica il potenziale di energia e materia da disperdere nel corso della loro diffusione nell'ambiente mentre l'entropia è il concetto che quantifica lo stato di dispersione, e fino a che punto l'energia e la materia in questione vengono disperse. Il metodo dell'analisi exergetica, basato sulla combinazione della prima e della seconda legge della termodinamica, si presenta come l'anello mancante che serviva per raggiungere la comprensione e la visualizzazione di tutti i flussi energetici in un edificio.

Prendiamo in considerazione un sistema costituito da un semplice involucro edilizio, come mostrato in *figura 1*. Supponiamo una condizione stazionaria in cui il lato destro del sistema sia più caldo di quello sinistro.

L'energia che viene ceduta dall'edificio all'ambiente è accompagnata non solo da un decremento di exergia ma anche da un aumento di entropia (*Shukuya e Hammache, 2002*). L'aumento dell'entropia è proporzionale al consumo dell'exergia e la costante di proporzionalità è la temperatura ambientale espressa nella scala Kelvin secondo la formula di Gouy-Stodola. Liberarsi dell'entropia generata dal sistema crea lo spazio per un nuovo apporto di exergia e che verrà nuovamente consumata. Il processo descritto viene chiamato **Processo Exergia-Entropia** e costituisce un ciclo le cui fasi fondamentali sono:

- 1 - apporto di exergia
- 2 - consumo di exergia
- 3 - generazione dell'entropia
- 4 - eliminazione dell'entropia.

Ogni sistema in funzionamento compie questi quattro passaggi in questa sequenza ed in maniera ciclica. I sistemi di riscaldamento e raffreddamento non costituiscono un'eccezione.

Il bilancio exergetico

Una delle maggiori applicazioni del concetto di exergia è l'uso del bilancio exergetico. Per il principio di conservazione dell'energia, il bilancio energetico può essere espresso nel seguente modo:

$$(Energia\ entrante) = (Energia\ accumulata) + (Energia\ uscente)$$

$$E_{in} = E_{sto} + E_{out} \quad [1]$$

Poiché vengono qui assunte condizioni di stazionarietà, non vi è accumulo di energia e quindi l'equazione assume una forma più semplice:

$$(Energia\ entrante) = (Energia\ uscente)$$

$$E_{in} = E_{out} \quad [2]$$

In secondo luogo esprimiamo l'equazione dell'entropia in maniera conforme alle due equazioni sopra espresse.

La somma dell'entropia entrante e di quella generata deve essere in parte

GLI AUTORI.

L'ingegnere **Carlo Bernardini** è docente di fisica tecnica ambientale presso il DIT sezione trasporti e fisica tecnica, Università di Cagliari.
bernardini@fisicategnica-unica.it

L'ingegnere **Costantino Carlo Mastino** fa parte del Gruppo fisica tecnica nella Facoltà di Architettura, dottorando di ricerca presso il DIS, Università di Cagliari.
costantino.mastino@fisicategnica-unica.it

L'ingegnere **Francesca Deiana** fa parte del Gruppo fisica tecnica nella Facoltà di Architettura, Università di Cagliari.
francesca.deiana@fisicategnica-unica.it

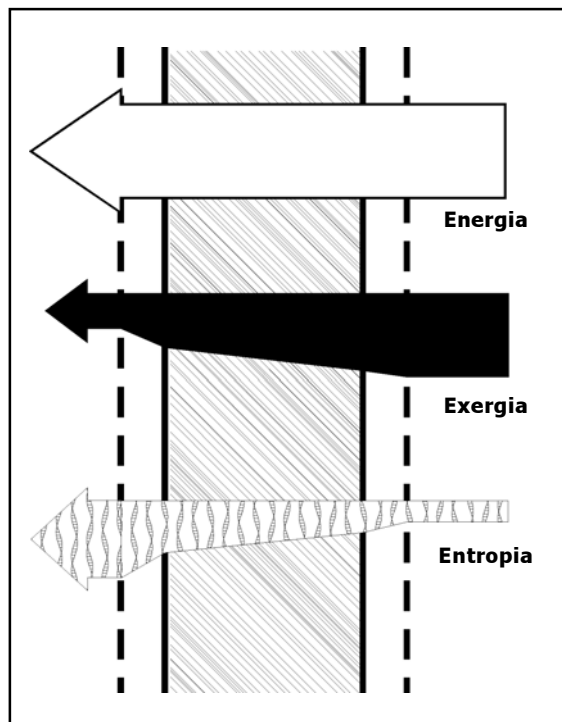


Figura 1. Flussi di energia, exergia, entropia attraverso un involucro edilizio in condizioni di regime stazionario.

accumulata e in parte uscire dal sistema. Perciò l'equazione del bilancio dell'entropia può essere così espresso:

$$(Entropia\ entrante) + (Entropia\ generata) = (Entropia\ accumulata) + (Entropia\ uscente)$$

$$S_{in} + S_{gen} = S_{sto} + S_{out} \quad [3]$$

Poiché abbiamo assunto condizioni stazionarie, non vi è accumulo di entropia così come non ve ne era di energia. Perciò l'equazione sopra scritta diventa:

$$(Entropia\ entrante) + (Entropia\ generata) = (Entropia\ uscente)$$

$$S_{in} + S_{gen} = S_{out} \quad [4]$$

Combinando insieme le equazioni di bilancio dell'energia e dell'entropia possiamo ricavare l'equazione di bilancio dell'exergia. L'entropia (o tasso di entropia) ha una dimensione di J/K (o W/K) e l'energia (o tasso di energia) ha una dimensione di J (o W). Quindi abbiamo bisogno di un accorgimento per combinare le due equazioni.

Il livello di energia dispersa della risorsa può essere espresso come prodotto tra l'entropia contenuta dalla risorsa e la sua temperatura ambientale nella scala Kelvin. Quindi l'equazione di bilancio dell'entropia può essere così riscritta:

$$(Entropia\ entrante)T_o + (Entropia\ generata)T_o = (Entropia\ uscente)T_o$$

$$S_{in} T_o + S_{gen} T_o = S_{out} T_o \quad [5]$$

dove T_o è la temperatura ambientale. Il prodotto dell'entropia per la temperatura ambientale è detto *anergia*, e indica l'energia dispersa. Detto ciò, l'equazione di sopra può essere espressa nella forma seguente di equazione di bilancio dell'anergia:

$$(Anergia\ entrante) + (Anergia\ generata) = (Anergia\ uscente)$$

$$A_{in} + A_{gen} = A_{out} \quad [6]$$

Appurato che l'anergia è una parte di energia già dispersa, allora l'altra parte non è ancora dispersa. Mettendola in un'altra maniera, l'energia consta di due parti: una parte dispersa e una parte che può disperdere. La seconda parte è *exergia*. Ora eseguiamo la differenza fra le due equazioni di bilancio dell'energia e di bilancio dell'anergia. Questa operazione ci fornisce

$$[(Energia\ entrante) - (Anergia\ entrante)] - (Anergia\ generata) = [(Energia\ uscente) - (Anergia\ uscente)]$$

$$(E_{in} - S_{in} T_o) - S_{gen} T_o = E_{out} - S_{out} T_o \quad [7]$$

$$(E_{in} - A_{in}) - A_{gen} = E_{out} - A_{out} \quad [8]$$

Introducendo la grandezza definita *exergia*, diciamo che la generazione di anergia è equivalente al consumo di exergia. L'equazione qui sopra può essere dunque ridotta alla forma:

$$(Exergia\ entrante) - (Exergia\ consumata) = (Exergia\ uscente)$$

$$Ex_{in} - Ex_{cons} = Ex_{out} \quad [9]$$

Questa è l'equazione di bilancio dell'exergia di un sistema in condizioni stazionarie. L'exergia consumata, che è equivalente all'anergia generata, è il prodotto dell'entropia generata per la temperatura ambientale:

$$(Exergia\ consumata) = (Temperatura\ ambientale) \times (Entropia\ generata)$$

$$Ex_{cons} = T_o S_{gen} \quad [10]$$

L'exergia consumata è quindi proporzionale all'entropia generata secondo la costante proporzionale della temperatura ambientale.

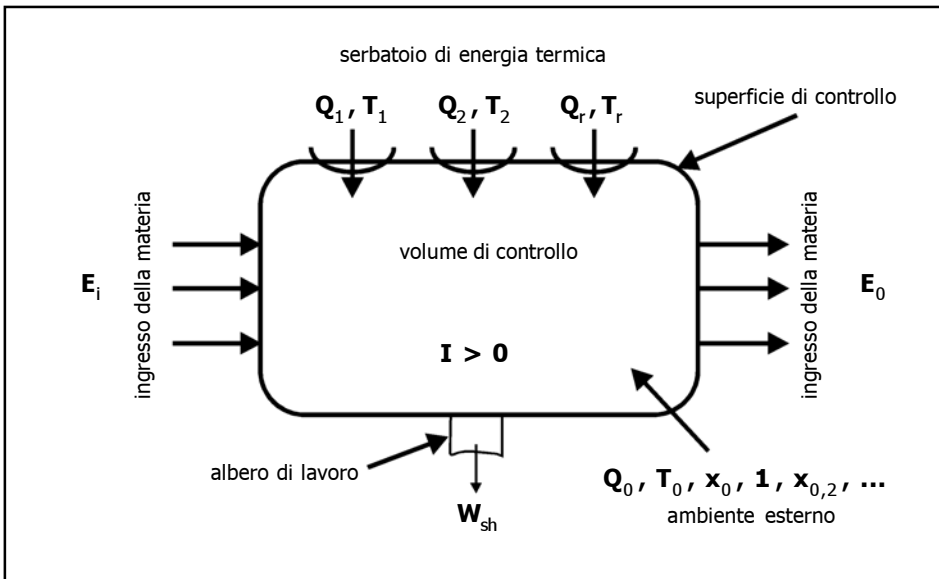


Figura 2. Bilancio exergetico di un sistema aperto

Formulazioni matematiche

Il bilancio exergetico di un sistema aperto in stato di equilibrio, presentato attraverso una regione di controllo delimitata da precisi contorni, è:

$$E_i + E^Q = E_o + W_{sh} + I \quad [11]$$

$$E^Q = \sum_r Q_r \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \quad E_i = \sum_i m_i e_i \quad E_o = \sum_o m_o e_o \quad [11.1]$$

$$E_{in} = E_{out} + I \quad [12]$$

$$E_i + E^Q = E_{in} + E_o + W_{sh} = E_{out} \quad [12.1]$$

Il flusso exergetico entrante nella regione di controllo E_{in} è sempre maggiore del flusso exergetico uscente E_{out} . La differenza tra i due flussi rappresenta la quantità di exergia persa durante il processo, ed è chiamata *tasso di irreversibilità* I . La relazione di Gouy-Stodola stabilisce che il tasso di irreversibilità di un processo è il prodotto della quantità dell'entropia generata S_{gen} , per tutti i sistemi partecipanti al processo, e la temperatura dell'ambiente T_0 .

$$I = T_0 S_{gen} = T_0 \left(\sum_o m_o s_o - \sum_i m_i s_i - \sum_r \frac{Q_r}{T_r} \right) \quad [13]$$

I termini e_i ed e_o rappresentano l'exergia specifica in ingresso e in uscita.

Ricordando che m rappresenta la massa del volume del flusso entrante o uscente, si ha che l'exergia specifica, o exergia massica, è data da:

$$e = \frac{E}{m} \quad [14]$$

$$e = e_k + e_p + e_{ph} + e_{ch} \quad [15]$$

$$e = \frac{1}{2} C_o^2 + gz_o + [(h - h_o) - T_0 (s - s_o)] + e_{ch} \quad [15.1]$$

Forme di exergia

Exergia relazionata al trasferimento di lavoro. Avendo definito l'exergia come il massimo lavoro potenziale, il lavoro risulta equiparabile all'exergia sotto ogni punto di vista:

$$E_W = W \quad [16]$$

Exergia relazionata al trasferimento di calore. Supponendo la distribuzione uniforme di temperatura in un serbatoio di energia termica, il tasso di trasferimento di exergia E^Q , relativo al tasso di trasferimento di calore Q , può essere calcolato con la seguente formula:

$$E^Q = Q_r t \quad [17.a]$$

$$E^Q = Q_r \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \quad [17.b]$$

dove:

T_0 è la temperatura ambiente che è impostata a 298,15 K

T_r è la temperatura di partenza di riscaldamento

$$\tau = 1 - \frac{T_0}{T_r} \quad \text{è la temperatura energetica adimensionale} \quad [18]$$

(detta anche fattore di qualità q).

Se ad esempio consideriamo un semplice sistema costituito da un serbatoio di calore a temperatura T_1 immerso in un ambiente a temperatura T_0

$$E = Q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

il termine $Q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$ è l'**exergia della quantità**

di calore Q_1 disponibile alla temperatura T_1 e rappresenta il lavoro massimo che si può ottenere in una macchina che realizza il ciclo reversibile di Carnot con $T_0 < T_1$.

Quando q è molto elevato, l'exergia E^Q è elevata, tuttavia le perdite del sistema sono di grandi

dimensioni. Questa condizione si verifica tanto più T_r è maggiore di T_0 . Invece, quando q è basso, il trasferimento exergia E^Q è basso, ma risultano piccole le perdite nel sistema. Questa condizione si verifica quando il calore Q_r viene fornito ad una temperatura T_r vicina a T_0 . La *figura 3* presenta il fattore di qualità (q) in funzione della temperatura (T_r) e mostra che q è molto più basso per le pompe di calore che per l'energia elettrica o di combustibili fossili (fonti energetiche *high valued*).

Exergia relazionata al flusso di materia in stato stazionario. Il tasso di trasferimento di exergia (flusso di exergia nell'unità di tempo) associato ad un flusso stazionario di materia può essere calcolato con la seguente formula:

$$E = E_k + E_p + E_{ph} + E_{ch} \quad [19]$$

dove:

$$E_k = \frac{1}{2} m C_0^2 \quad \text{TERMINE CINETICO}$$

rappresenta il tasso di exergia cinetica;

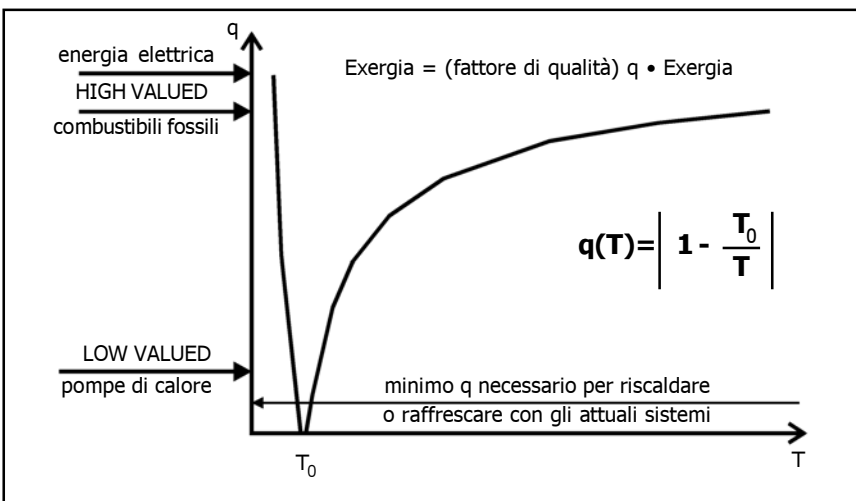


Figura 3. Exergia relativa al trasferimento di calore.

$$E_p = m g z_0 \text{ TERMINE POTENZIALE}$$

rappresenta il tasso di exergia potenziale (gravitazionale);

$$E_{ph} \text{ TERMINE FISICO}$$

rappresenta l'exergia termo-meccanica basata sulla temperatura e sulla pressione del flusso;

$$E_{ch} \text{ TERMINE CHIMICO}$$

rappresenta l'exergia chimica basata sui potenziali chimici dei componenti del flusso.

Exergia fisica. L'exergia fisica rappresenta il lavoro massimo ottenibile quando si porta il sistema, attraverso un processo reversibile, dallo stato in cui si trova (T, P) a quello neutro di riferimento a (T₀ e P₀), attraverso scambi di calore soltanto con tale stato. La formula specifica di exergia fisica è:

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad [20]$$

Per i gas perfetti con C_p costante si ha:

$$e_{ph} = c_p (T - T_0) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad [21]$$

Per solidi e liquidi quando ammettono un calore specifico costante:

$$e_{ph} = c \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] - v_m (P - P_0) \quad [22]$$

dove v_m è il volume specifico determinato alla temperatura T₀.

Definizioni di efficienza exergetica

È possibile definire varie espressioni di efficienza exergetica per processi che avvengono in condizioni stazionarie.

Efficienza exergetica convenzionale. La più semplice forma di efficienza exergetica è l'efficienza exergetica convenzionale definita come il rapporto tra il flusso totale di exergia uscente e il flusso totale di exergia entrante:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad [23]$$

che - considerando l'equazione del bilancio exergetico formulato nell'equazione 12 - può essere espressa come:

$$\eta = \frac{E_{in} - I}{E_{in}} = 1 - \frac{I}{E_{in}} \quad [24]$$

Vediamo un esempio pratico. Consideriamo uno scambiatore di calore adiabatico in cui avvenga un trasferimento di calore da un mezzo a temperatura T₁ ad un altro alla temperatura T₂, entrambi immersi in un ambiente a temperatura T₀. Si ha che: T₁ > T₂ > T₀.

Se indichiamo con Q la quantità di calore scambiato nell'unità di tempo, l'exergia entrante nel sistema è:

$$E_1 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

mentre l'exergia uscente vale:

$$E_2 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right)$$

Bibliografia

IEA ECBCS Annex 37, *Low exergy systems for Heating and Cooling of Buildings - Guidebook*. VTT, Helsinki, 2004.

Shukuya, M. and Hammache, A., *Introduction to the concept of Exergy - for a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature cooling systems*, 2002. VTT Research Notes, 2158, Technical Research Centre of Finland, Espoo.

Åsa Nystedt - VTT Building and Transport, *Low Temperature Systems in Existing Buildings in Finland*.

Carey J. Simonson and Mia Leskinen, ECBCS Annex 37. *Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings*. 5th Joint Meeting of ECBCS and SHC executive committees, Bordeaux, France, June 13, 2001.

Dietrich Schmidt, *Design of Low Exergy Buildings- Method and a Pre-Design Tool*. In: The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, vol. 3 (2004), pp. 1-47.

Dietrich Schmidt e Mia Ala-Juusela, *Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings*. 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19 - 22 September 2004.

ECBCS. *Energy Conservation in Buildings and Community Service Programme*. International Energy Agency, 2002.

Elisa C. Boelman and Hideo Asada, *Exergy and sustainable building*. Open House International, vol. 28, n. 1, 2003, pp. 60-67.

Lowex newsletter n. 6, *Low Exergy System in existing buildings - LowEx*.

Lucca Giorgio, *Exergia, l'essenza dell'energia in relazione alla sua conversione in lavoro*. Clup - Milano, 1984.

Markku Virtanen and Mia Leskinen, ECBCS Annex 37: *Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings; Case examples*. ECBCS ExCo Meeting in Krakow, Poland, 7th to 9th November, 2001

Mia Ala-Juusela, Dietrich Schmidt, *Low Exergy Guidebook - Introduction to Heating and Cooling Systems for Sustainable Buildings*. ECBCS News - Issue 39; giugno 2004

Michele Trancossi, *La rivoluzione exergetica*. Free Notebooks of Science; Published by Exergetic Society; Delaware USA - 2008

Gino Moncada Lo Giudice, *Fisica tecnica ambientale*. Vol. 1: Termodinamica applicata. CEA, 1998.

Roberto Lensi, *Exergia*. Università degli studi di Pisa, appunti anno accademico 2003-2004

Shukuya M., *Energy, Entropy, Exergy and space heating systems*, Musashi Institute of Technology, Tokio, 1994 [pdf: <http://tinyurl.com/yeatlck>]

Tuija Karppanen, Brochure cases LowEx: *Low Temperature Heating Systems*. Printed by Aksidenssi Oy, giugno 2002

Zemansky Mark W., Abbott Michael M., Van Ness Hendrick C., *Fondamenti di termodinamica per ingegneri*, vol. 1. Zanichelli, 1978

Andrea Galliani, Ernesto Pedrocchi, *Analisi exergetica*. Polipres edizioni, 2007

Dunque il rendimento è:

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1 - \frac{T_0}{T_2}}{1 - \frac{T_0}{T_1}}$$

Il fatto che la trasformazione in questo caso sia irreversibile, implica infatti una perdita di exergia ΔE , quindi una perdita di energia utilizzabile. La perdita di exergia sarà:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \left[Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \right] - \left[Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) \right] = T_0 Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = \\ &= T_0 \left(\frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right) = T_0 (S_2 - S_1) = T_0 (\Delta S) \end{aligned}$$

Ponendo: $\Delta T = T_1 - T_2$

$$\Delta E = Q \frac{T_0 (\Delta T)}{T_1 (T_1 - \Delta T)} \quad [25]$$

Da questo esempio si può trarre una conclusione importante: la perdita di exergia dovuta alla trasmissione è tanto maggiore quanto più alta è la differenza tra la T_1 e la T_2 , e si accentua quanto più piccola è T_1 e maggiore è il ΔT .

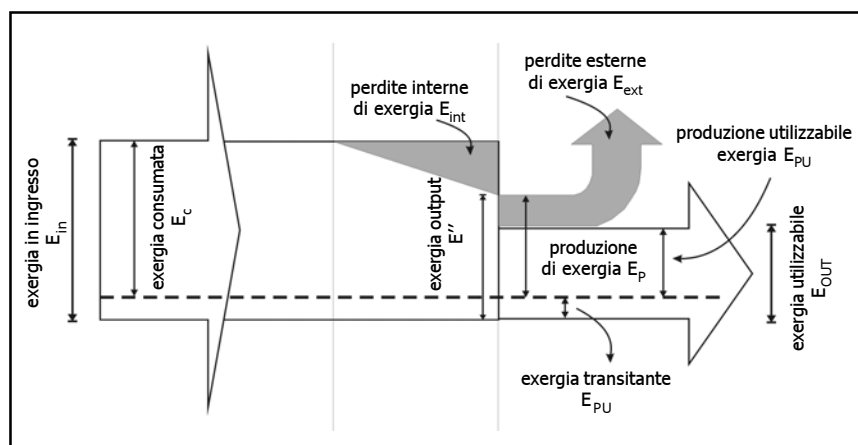
L'efficienza exergetica convenzionale può essere utilizzata per tutti gli impianti di processo e di unità (singoli dispositivi). Sfortunatamente, essa dà una buona impressione della perfezione termodinamica di un sistema solo quando tutti i componenti del flusso exergetico in entrata sono trasformati in altri componenti. L'efficienza exergetica tradizionale in una centrale energetica è espressa come:

$$\eta = \frac{W_{elec}}{E_{fuel}}$$

Quando tutti i componenti dei flussi di exergia in entrata non vengono trasformati in altri componenti, i componenti non trasformati danno la falsa misura delle prestazioni degli impianti di processo o di unità.

Coefficiente di exergia utilizzabile. Il coefficiente di exergia utilizzabile (2) è una forma di efficienza, che può essere intesa come un miglioramento dell'efficienza exergetica tradizionale, poiché sottrae i componenti non trasformati dai flussi in entrata e in uscita.

Figura 4. Presentazione grafica dell'equilibrio exergetico globale.



L'input di exergia, cioè l'exergia totale in ingresso E_{in} , in un sistema reale è sempre più alto del suo output di exergia E'' , in quanto una determinata quantità di exergia, l_{int} , è sempre persa, o distrutta, all'interno del sistema a causa dell'irreversibilità termodinamica del sistema stesso. Come si vede in figura 4, una parte dell'exergia in uscita dal sistema E'' può dissipare nell'ambiente, per esempio sotto forma di perdite di calore, spreco delle acque luride o effluenti del fumaio. Questa exergia sprecata, non più utilizzabile dai processi successivi, costituisce le perdite esterne, l_{ext} .

È dunque più appropriato, dal punto di

vista delle operazioni a valle, considerare l'exergia in uscita che rimane utilizzabile, $E_{out'}$ piuttosto che la E'' , cioè l'exergia totale in uscita. Solo parte dell'exergia utilizzabile E_{out} è prodotta dal sistema; chiamiamo questa frazione exergia prodotta E_p . Il resto dell'exergia che lascia il sistema con il flusso di exergia utilizzabile è quella parte dell'exergia in ingresso che ha semplicemente attraversato il sistema senza subire alcuna trasformazione: la chiamiamo exergia transitante, o exergia di passaggio E_{tr} . Sulla base di queste osservazioni è stato definito un nuovo coefficiente di efficienza termodinamica, il coefficiente di exergia utilizzabile η_u (Sorin e altri, 1998). L'efficienza exergetica che tiene conto dell'exergia di passaggio è definita come segue:

$$\eta_u = \frac{E_{out} - E_{tr}}{E_{in} - E_{tr}} = \frac{E_{in} - I_{int} - I_{ext} - E_{tr}}{E_{in} - E_{tr}} = \frac{E_{pu}}{E_c} \quad [26]$$

Qui E_{tr} è il tasso di energia di passaggio, E_{pu} è il tasso di exergia prodotta utilizzabile e E_c il tasso di exergia consumata.

Exergia "calda" ed exergia "fredda"

La quantità di exergia contenuta in una sostanza varia con la sua temperatura ed anche con la temperatura dell'ambiente circostante. Il grafico in figura 5 mostra un esempio di exergia termica contenuta nell'aria di una stanza di 81 m³ (6m*5m*2,7m), nel caso in cui la temperatura ambientale sia di 288 K (=15°C).

La formula matematica che genera il grafico è la seguente:

$$X_r = c_{air} m_{air} \left[(T_r - T_0) - T_0 \ln \frac{T_r}{T_0} \right] \quad [27]$$

in cui:

X_r : exergia termica contenuta dal volume dell'aria di una stanza [K]

c_{air} : calore specifico dell'aria [K]/(kg*K)

m_{air} : massa d'aria della stanza [kg]

T_r : temperatura dell'aria all'interno della stanza espressa in K

T_0 : temperatura esterna espressa in K.

Si ipotizza che il valore di c_{air} sia di 1005 K/(kg*K), mentre si trova che il valore di m_{ra} è di 97.2 kg (=1.2 kg/m³ * 6 m * 5 m * 2.7 m).

L'exergia contenuta nell'aria di un ambiente, nel caso in cui questa si trova ad una temperatura maggiore di quella circostante, consente all'energia termica di disperdersi nell'ambiente. D'altra parte, l'exergia contenuta nell'aria di un ambiente, nel caso in cui questa si trova ad una temperatura inferiore a quella dell'ambiente circostante - e dunque nel caso in cui all'interno ci sia un deficit di energia termica rispetto all'ambiente esterno - consente all'energia termica di fluire all'interno. Nel primo caso parleremo di exergia "calda" e nel secondo di exergia "fredda". Entrambe sono delle variabili di stato.

La direzione del flusso di energia cambia a seconda del profilo della temperatura, in base al fatto che la temperatura interna sia maggiore o minore di quella esterna; invece la direzione del flusso di exergia è sempre la stessa, dall'interno verso l'esterno. Ciò che cambia è il fatto che il flusso exergetico può essere costituito da exergia calda o fredda a seconda che la temperatura interna sia maggiore o minore di quella esterna.

Exergia radiante. La figura 6 mostra un esempio di exergia radiante emessa da una superficie nera di 1 m² nel caso in cui la temperatura dell'ambiente risulti

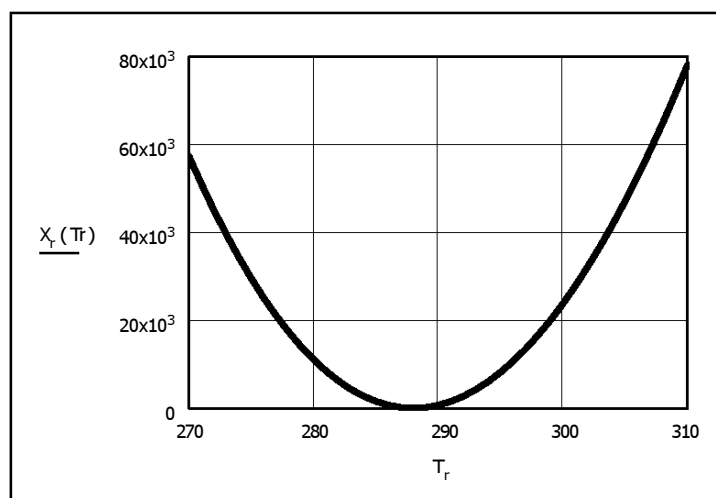


Figura 5. Exergia termica contenuta in un volume d'aria di 81 m³ in funzione della sua temperatura, nel caso in cui la temperatura ambientale T_0 sia pari a 288 K (=15°C).

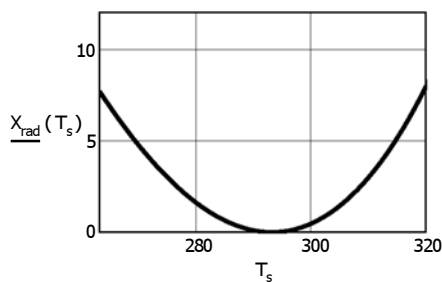


Figura 6. Esempio di exergia radiante emessa da una superficie nera di 1 m² quando la temperatura dell'ambiente è di 293 K (20°C).

essere di 293 K (=20°C). La formula matematica che genera il grafico è questa:

$$X_{rad} = e_m \sigma \left[(T_s^4 - T_0^4) - \frac{4}{3} T_0 (T_s^3 - T_0^3) \right] \quad [28]$$

in cui:

X_{rad} : exergia radiante termica emessa dalla superficie della parete per l'area [W/m²]

e_m : emettanza della superficie

σ : costante di Stephan-Boltzmann (5.67*10-8) [W/m² K⁴]

T_s : temperatura di superficie in Kelvin

T_0 : temperatura esterna di Kelvin, ovvero la temperatura della stanza

Il valore di T_0 viene considerato pari a 293 K (=20°) mentre il valore di e_m è uguale a 1, cioè consideriamo la superficie nera.

Supponendo che ci sia un pannello radiante di 2 m² con una temperatura superficiale di 40°C, questo pannello emetterebbe 9 W di exergia radiante "calda". Se la temperatura superficiale scendesse da 40°C a 30°C, l'exergia radiante "calda" precipiterebbe drasticamente da 9 W a 2 W.

In caso di una sorgente fredda costituita da una temperatura superficiale di 6°C, il pannello emetterebbe un'exergia radiante fredda di 4 W. Se la temperatura superficiale salisse da 6°C a 14°C, l'exergia fredda scenderebbe drasticamente da 4 W a 0,2 W.

Processo exergia-entropia del Sistema ambientale globale. L'atmosfera vicina alla terra riceve tutta l'entropia che viene generata e scartata da tutti i sistemi che riguardano l'illuminazione, il riscaldamento e il raffrescamento dell'ambiente edificato. Dato che l'entropia contenuta in una sostanza è funzione della temperatura e della pressione, la temperatura atmosferica vicino alla terra dovrà aumentare se l'atmosfera stessa continua a ricevere entropia scartata dai diversi sistemi. Tuttavia ciò che avviene realmente in natura è diverso; la temperatura atmosferica media è pressoché costante di anno in anno. Ciò è dovuto al fatto che l'atmosfera ha un processo di exergia-entropia che funziona nutrendosi e consumando exergia solare, pertanto producendo entropia che in seguito smaltisce nell'Universo. Possiamo definire tutto ciò un *Sistema ambientale globale*.

La Terra riceve un'exergia solare di 220.7 W/m² e un'exergia radiante "fredda" di 102.2 W/m² dall'universo. Queste exergie vengono tutte consumate prima o poi nell'alta atmosfera o nella bassa atmosfera. La quantità totale di entropia generata è data dalla differenza di flusso dell'entropia in ingresso e in uscita attraverso la superficie di confine della parte superiore dell'atmosfera. Una parte dei 102.2 W/m² di exergia radiante "fredda" che provengono dall'universo permette al sistema ambientale globale di avere un flusso di entropia in uscita di 1.239 W/(m²K). La quantità di exergia radiante "fredda", 102.2 W/m², è di vitale importanza in aggiunta all'exergia solare, perché è l'exergia che spazza via tutta l'entropia generata all'interno dell'alta e della bassa atmosfera.

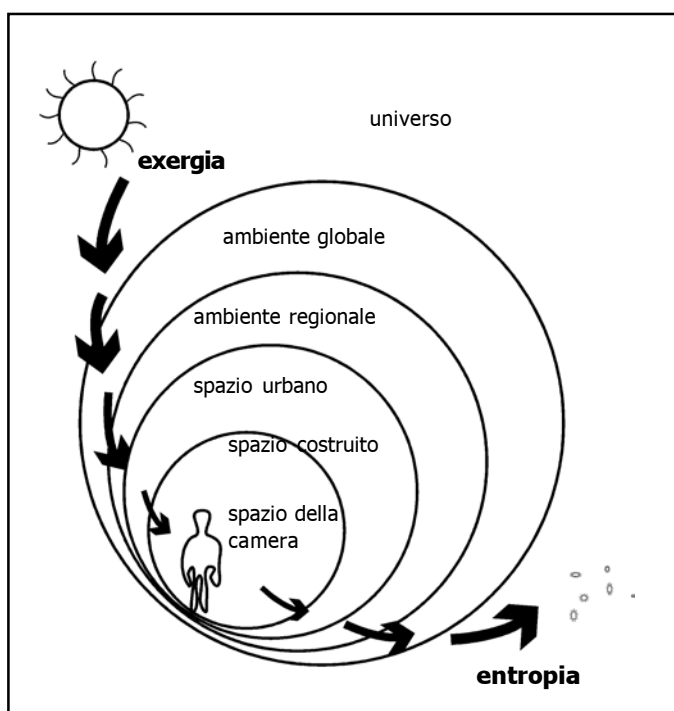
Processi exergia-entropia dei sistemi passivi

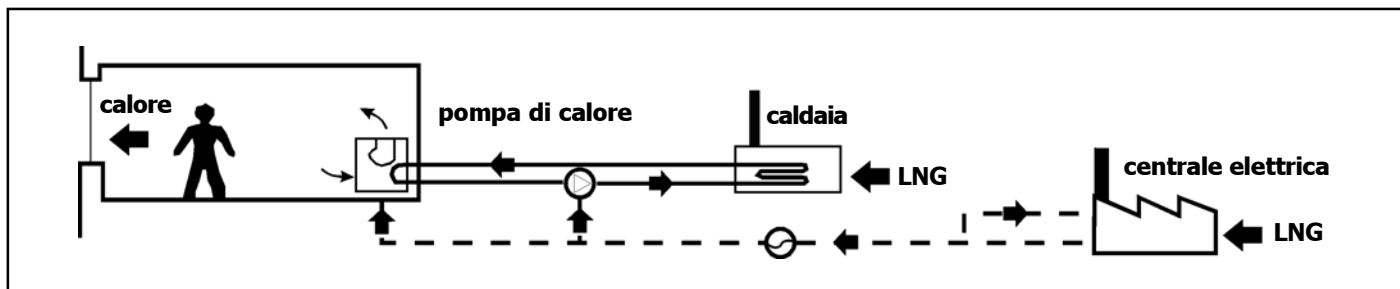
Sono qui elencate le caratteristiche generali di sei sistemi passivi dal punto di vista del processo exergia-entropia. Come suggerito prima, una progettazione passiva razionale dovrebbe essere il pre-requisito per realizzare sistemi a bassa exergia per il riscaldamento e il raffrescamento.

- Illuminazione diurna
- Riscaldamento passivo
- Schermature
- Raffrescamento con ventilazione
- Acqua vaporizzata
- Compostaggio (riduzione in concime dei rifiuti)

Calcolo di exergia per il riscaldamento. Vengono messi a confronto tre esempi numerici del consumo di exergia durante l'inte-

Figura 7. Processo exergia - entropia del sistema ambientale globale rappresentato mediante una struttura a nido (Sukuya, 2003)





ro processo di riscaldamento di un ambiente interno partendo dalla centrale elettrica passando per la caldaia fino all'involucro edilizio assunto in moto stazionario, come mostrato in *figura 9*.

Il primo caso ipotizza che l'isolamento termico del sistema di involucro edilizio sia scarso. Il secondo caso invece ipotizza che l'isolamento termico dell'involucro edilizio sia migliorato mediante una combinazione di doppi vetri e una muratura esterna con un isolamento migliore. Il terzo caso ipotizza in più che l'efficienza della caldaia sia migliorata fino al limite massimo possibile.

Il consumo di exergia all'interno dell'impianto della caldaia è il maggiore fra i consumi di tutti i sotto sistemi. Il consumo di tanta exergia è inevitabile quando si ricava exergia termica tramite un processo di combustione dell'exergia chimica contenuta nell'LNG (gas naturale liquefatto). A causa di ciò, si potrebbe pensare che il miglioramento dell'efficienza della caldaia sia essenziale. La linea tratteggiata indicata sotto il caso 1 mostra il risultato del miglioramento dell'efficienza della caldaia, nel caso 1, da 0,8 a 0,95. La diminuzione del consumo di exergia è marginale. I calcoli mostrano che un'elevatissima efficienza della caldaia da sola non porta necessariamente a un significativo contributo nella riduzione del consumo di exergia nell'intero processo di riscaldamento spaziale.

Come si può vedere dalla differenza dell'andamento del consumo totale di exergia fra il caso 1 e il caso 2, è più produttivo ridurre il carico di exergia per il riscaldamento realizzando vetri e muri esterni aventi un buon isolamento termico che non sviluppando una caldaia con una efficienza termica estremamente elevata, per diminuire il tasso di consumo totale di exergia.

Figura 8. Un sistema di riscaldamento spaziale assunto come esempio per il calcolo del consumo exergetico di un ambiente (Shukuya 1994).

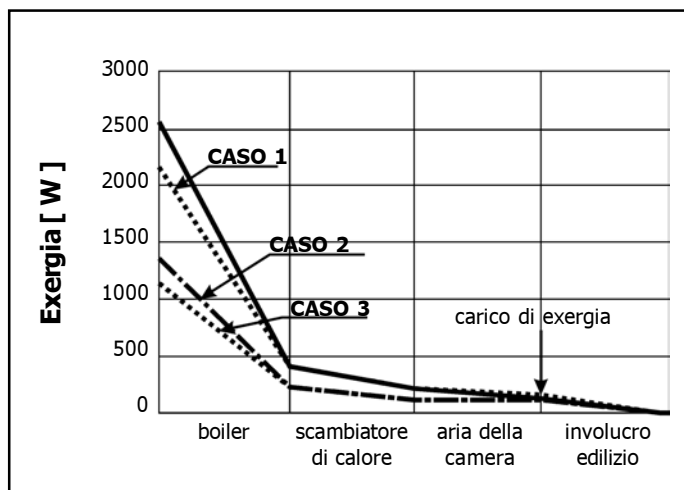


Figura 9. Comparazione dei consumi energetici in quattro casi di sistemi di riscaldamento spaziale.

| caso | coefficiente di perdita di calore dell'involucro edilizio | | efficienza termica della caldaia |
|------|---|---------------------------|----------------------------------|
| | 108.7 W/K | (3.0 W/m ² K) | |
| 1 | 108.7 W/K | (3.0 W/m ² K) | 80% |
| 2 | 57.1 W/K | (1.59 W/m ² K) | 80% |
| 3 | 57.1 W/K | (1.59 W/m ² K) | 95% |

Calcolo di exergia per il raffrescamento. Vengono messi a confronto cinque esempi numerici di consumi exergetici che si hanno durante l'intero processo di raffrescamento spaziale che parte dalla centrale elettrica passando per la pompa di calore fino all'involucro edilizio assunto in moto stazionario. Il procedimento è simile a quello descritto nel paragrafo precedente per il calcolo dell'exergia per il riscaldamento. Consideriamo una stanza uguale a quella usata per il calcolo del riscaldamento, tranne per il fatto che adesso vi è un'acquisizione di calore solare dovuto ai dispositivi per l'ombreggiatura e un'acquisizione di calore interno dovuto all'illuminazione elettrica e alla presenza dei residenti.

La temperatura dell'aria esterna e la temperatura interna sono ipotizzate pari a 33°C e 26°C. La quantità di energia solare radiante incidente sulle finestre si è assunta pari a 500 W/m², la densità di occupazione è di 5,4 persone (0,15 persone a m², e ipotesi di 75 W/persona), e la densità di illuminazione elettrica è pari a 480

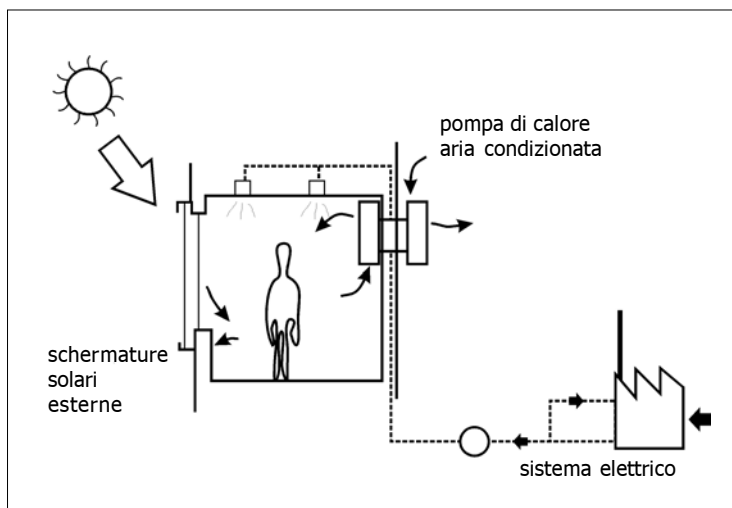


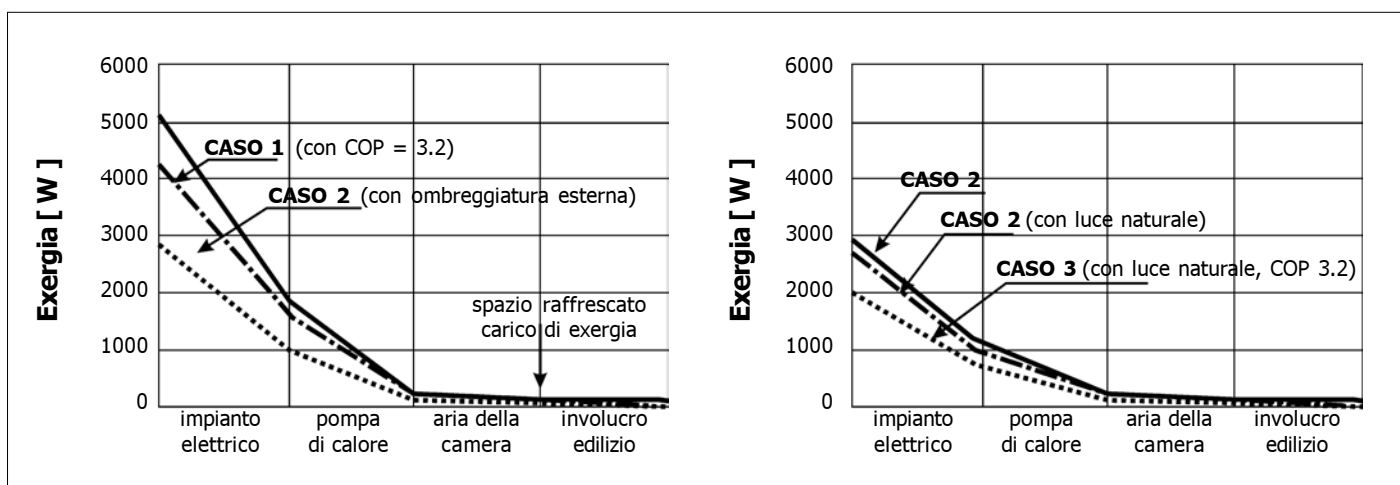
Figura 10. Stanza assunta per il calcolo dell'exergia per il raffrescamento.

W (13.3 W/m^2) considerando che tutti gli apparecchi elettrici siano accesi. La tabella in basso riassume i cinque casi e tutte le varie ipotesi assunte.

Il caso 1 è quello in cui l'isolamento termico dell'involucro edilizio è moderato e il controllo solare è realizzato mediante dispositivi interni per l'ombreggiatura; il caso 1' è quello in cui solo il coefficiente di performance (COP) ha subito un incremento; nel caso 2 l'isolamento termico è stato incrementato e un dispositivo esterno per l'ombreggiatura sostituisce quello interno; nel caso 2' l'illuminazione diurna riduce il tasso di generazione di calore dovuto all'illuminazione elettrica; nel caso 3' la temperatura dell'aria allo sbocco esterno e il COP sono stati aumentati.

Il consumo exergetico all'interno della pompa di calore è dovuto alla compressione e all'espansione del liquido termovettore, il trasferimento di calore tra il liquido termovettore e l'aria della stanza avviene grazie all'evaporatore, mentre il trasferimento di calore fra il liquido termovettore e l'aria dell'ambiente avviene grazie al condensatore. Le exergie calde e fredde possono essere calcolate tramite le equazioni fornite in precedenza.

| caso | coefficiente di perdita di calore dell'involucro edilizio (numeri cambi d'aria) | coefficiente di acquisizione di calore solare | COP della pompa di calore | temperatura dell'aria allo sbocco esterno dell'unità interna della pompa di calore | tasso di generazione di calore dovuto all'illuminazione elettrica |
|------|---|---|---------------------------|--|---|
| 1 | 108.7 W/K (0.8 h-1) | 0.7 | 2.7 | 16°C | 480 W |
| 1' | 108.7 W/K (0.8 h-1) | 0.7 | 3.2 | 16°C | 480 W |
| 2 | 57.1 W/K (0.4 h-1) | 0.35 | 2.7 | 16°C | 480 W |
| 2' | 57.1 W/K (0.4 h-1) | 0.35 | 2.7 | 16°C | 160 W |
| 3' | 57.1 W/K (0.4 h-1) | 0.35 | 3.7 | 20°C | 160 W |



Comparazione degli andamenti dei consumi di exergia: casi 1, 1' e 2 (figura 11, a sinistra); casi 2, 2' e 3 (figura 12, a destra).

L'andamento dei consumi exergetici cambia drasticamente con l'installazione di un dispositivo esterno per l'ombreggiatura al posto di quello interno. Il solo sviluppo dell'efficienza delle pompe di calore darebbe risultati marginali.

L'illuminazione diurna fornisce un moderato cambiamento nell'andamento dei consumi exergetici, a patto che venga attentamente progettata in modo che l'illuminazione elettrica non necessaria venga spenta, a seconda della quantità di luce diurna disponibile trasmessa attraverso la finestra con dispositivo esterno per l'ombreggiatura.

Carlo Bernardini, Costantino Carlo Mastino, Francesca Deiana