

Se il fine è ottimizzare i processi energetici
Think Exergy Not Energy ovvero **Pensa all'Exergia Non all'Energia**

Nel linguaggio, nella tecnica e nella legislazione si fa comunemente riferimento ai "consumi" di energia. In realtà, la quantità totale di energia si conserva in tutte le trasformazioni: quella che si perde non è la "quantità" ma la "qualità" dell'energia. La qualità di ogni forma di energia è data dalla sua capacità di produrre lavoro meccanico, e tale capacità viene definita "energia utilizzabile" o più sinteticamente "exergia".

I rendimenti tradizionali, basati sui bilanci di energia, danno informazioni sulle "perdite" (intese come dispersioni di energia nell'ambiente), ma non forniscono informazioni sufficienti a scegliere tra le diverse tipologie di impianto e, tantomeno, sui componenti dell'impianto suscettibili di miglioramento.

I rendimenti basati sui bilanci di exergia, tengono conto delle perdite di qualità delle energie in gioco e identificano sia le perdite globali sia le perdite che si hanno in ciascun componente di impianto. Pertanto, è l'analisi exergetica quella che si deve utilizzare per ottenere indicazioni sulla strada da seguire nell'ottimizzazione di un impianto e dei suoi componenti.

Nel volume, per agevolare la comprensione, i concetti di exergia e di rendimento exergetico sono introdotti dal punto di vista ingegneristico, partendo dall'analisi delle applicazioni industriali e senza troppo addentrarsi nelle derivazioni termodinamiche.

Il volume completa con le analisi exergetiche il precedente: "Fondamenti Termodinamici dell'Energetica" nel quale, per brevità, ci si era limitati alle analisi energetiche, dedicando un solo capitolo al concetto di exergia. Il volume, inoltre, tratta in maniera approfondita gli aspetti teorici dell'energetica e costituisce un'ottima introduzione allo studio degli argomenti applicativi approfonditi in "Energetica Generale".

Gianni Comini è stato professore ordinario di Fisica Tecnica nelle Università di Trieste e Udine dal 1975 al 2010 e, dal 2010, è Direttore del Dipartimento di Energia e Ambiente del Centro Internazionale per le Scienze Meccaniche (CISM) di Udine.

Giulio Croce è professore associato di Fisica Tecnica Industriale presso l'Università di Udine, è stato coordinatore del Corso di Laurea Magistrale in Ambiente ed Energia, tiene dal 1998 i corsi di Energetica ed Analisi Exergetica.

Stefano Savino è professore associato di Fisica Tecnica Industriale presso l'Università di Udine dove tiene i corsi di Termodinamica Applicata, Fisica Tecnica ed Energie Rinnovabili.

€ 15,00
IVA COMPRESA

ISBN 978-88-89884-37-9

SGE
PADOVA

G. Comini - G. Croce - S. Savino

FONDAMENTI DI ANALISI EXERGETICA

Gianni Comini - Giulio Croce - Stefano Savino

FONDAMENTI DI ANALISI EXERGETICA

SGE EDITORIALI
PADOVA

Gianni Comini - Giulio Croce - Stefano Savino

FONDAMENTI DI ANALISI EXERGETICA

Volumi pubblicati

G. Comini, G. Croce, S. Savino, ENERGETICA GENERALE

G. Comini, S. Savino, FONDAMENTI TERMODINAMICI DELL'ENERGETICA

G. Comini, G. Cortella, FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

G. Comini, FONDAMENTI DI TERMODINAMICA APPLICATA

A cura di G. Comini, G. Croce, E. Nobile, FONDAMENTI DI
TERMOFLUIDODINAMICA
COMPUTAZIONALE

Copyright © 2020

Servizi Grafici Editoriali

Via Lagrange, 3 - 35143 Padova

Tel. 049 8302697

sge@sgeditoriali.it

www.sgeditoriali.it

1ª Edizione Gennaio 2020

I diritti di traduzione, di riproduzione e di adattamento
totale o parziale, con qualsiasi mezzo
(compreso i microfilms e le copie fotostatiche)
sono riservati per tutti i Paesi.

Prefazione

Nel linguaggio, nella tecnica e nella legislazione si fa comunemente riferimento a “consumi” di energia. In realtà, il primo principio della termodinamica stabilisce che la quantità totale di energia si conserva in tutte le trasformazioni, mentre il secondo principio stabilisce che, nelle stesse trasformazioni, si perde non la “quantità” ma la “qualità” dell’energia. Di conseguenza, per interpretare correttamente i processi energetici è essenziale misurare la qualità dell’energia.

La qualità di ogni forma di energia è data dalla sua capacità di produrre lavoro meccanico, e tale capacità viene definita “energia utilizzabile” o più sinteticamente “exergia”. Come esorta l’Unione Europea: “Think Exergy Not Energy”, ovvero: “Pensa all’ Exergia Non all’Energia” al fine di ridurre le irreversibilità che peggiorano la qualità dell’energia pur conservandone la quantità.

I processi irreversibili fanno parte della vita di tutti i giorni e tutti li riconoscono: nessuno si aspetta che il calore torni dall’ambiente alla tazzina di caffè, nessuno pensa che l’acqua tiepida uscita dal miscelatore del lavandino possa separarsi spontaneamente nelle due correnti calda e fredda, e nessuno ritiene che si possa mandare avanti una nave trasformando in lavoro l’energia interna dell’acqua su cui la nave galleggia.

In termini più tecnici e condivisi, comunque, possiamo affermare che tutti i processi di trasformazione devono essere analizzati sulla base di due bilanci: uno basato sul primo principio e, quindi, sulle quantità di energia, e l’altro basato su una nuova grandezza, l’exergia legata alla qualità delle energie in gioco. Infatti, i rendimenti di primo principio danno informazioni sulle sole “perdite” di energia (intese come dispersioni nell’ambiente) e non forniscono informazioni sufficienti a scegliere tra diverse tipologie di impianti. Una volta scelta la tipologia poi, i bilanci di primo principio non forniscono indicazioni sui componenti di impianto suscettibili di miglioramento.

Viceversa i rendimenti di secondo principio, basati sui bilanci di exergia, tengono conto delle perdite di qualità delle energie in gioco e identificano sia le perdite globali sia le perdite che si hanno in ciascun componente di impianto. Di conse-

guenza, l'analisi exergetica fornisce indicazioni preziose sulle strade da seguire per l'ottimizzazione dei singoli impianti e di tutti i loro componenti.

In questo quadro, nella maggior parte dei testi di Termodinamica il concetto di exergia viene introdotto seguendo l'approccio tradizionale, ovvero mostrando come i bilanci di energia (primo principio) e di entropia (secondo principio) possano essere combinati per arrivare ai bilanci di una nuova grandezza: l'exergia (o energia utilizzabile). Successivamente, viene spiegato come l'exergia consenta il confronto tra le diverse forme di energia sulla base della loro convertibilità in lavoro meccanico e come, di conseguenza, porti a definire rendimenti exergetici capaci di evidenziare le perdite di convertibilità in lavoro meccanico delle energie in gioco.

L'esperienza didattica, tuttavia, ha mostrato come l'approccio tradizionale, pur ineccepibile da un punto di vista termodinamico, non sia quello più adatto ad un corso introduttivo all'analisi exergetica. In armonia con questo obiettivo didattico, nel seguito ci si è proposti di reintrodurre, da un punto di vista ingegneristico, i concetti di exergia e di rendimento exergetico dimostrando, nel contempo, come tali concetti scaturiscano dall'analisi delle applicazioni industriali, e non richiedano di addentrarsi a priori in derivazioni termodinamiche troppo dettagliate. In particolare:

- Il primo capitolo mette in evidenza i limiti ingegneristici delle analisi di primo principio e la necessità di definire una nuova grandezza: l'exergia, od energia utilizzabile, che tenga conto della qualità delle energie in gioco. Sulla base dei bilanci di exergia si definiscono poi i rendimenti di secondo principio per i sistemi chiusi e aperti, e si presentano diversi esempi di applicazione per dimostrare l'utilità pratica delle analisi exergetiche.*
- Il secondo capitolo si occupa dell'energia utilizzabile dei combustibili e definisce razionalmente il "potere exergetico" di un combustibile. A differenza del "potere calorifico", misurabile sperimentalmente, il "potere exergetico" presuppone la conoscenza delle composizioni chimiche di reagenti e prodotti e, di conseguenza, può essere stimato solo quando la composizione chimica del combustibile è nota. D'altra parte, se la composizione è nota anche il potere calorifico può essere stimato per via teorica sulla base dei calori di formazione (tabulati) delle sostanze che partecipano alla combustione. La determinazione sperimentale dei poteri calorifici rimane, comunque, la procedura di elezione in tutte le situazioni con risvolti economici e giuridici come, ad esempio, la fatturazione del gas naturale sulla base del suo potere calorifico superiore contrattuale.*

-
- *Il terzo capitolo mostra come, una volta noti i poteri calorifici e i poteri exergetici dei combustibili, sia possibile definire razionalmente i rendimenti di primo e di secondo principio dei più comuni processi di combustione. In tale contesto, si osserva che i rendimenti globali di primo e secondo principio degli impianti termici motori coincidono, anche se all'interno di tali impianti hanno luogo processi di combustione. Negli impianti, infatti, la somma delle perdite termiche coincide con la somma delle perdite dovute alle irreversibilità: quelle che cambiano sono le distribuzioni delle perdite stesse. Queste considerazioni sono esemplificate dalle analisi di due impianti tradizionali a ciclo diretto semplice: uno a gas basato sul ciclo Joule, ed uno a vapore basato sul ciclo Rankine. In questo modo si evince che negli impianti a gas si hanno perdite significative di exergia nello scarico diretto dei fumi nell'atmosfera all'uscita della turbina, mentre negli impianti a vapore la perdita di exergia nel condensatore è trascurabile, ma è importante la distruzione di exergia nella combustione. Da qui l'idea di passare ad un impianto a ciclo combinato gas-vapore nel quale la fase di combustione è riservata al ciclo a gas, mentre lo scarico di calore in ambiente ha luogo nel ciclo a vapore.*

Il volume completa con le analisi exergetiche il precedente: “Fondamenti Termodinamici dell'Energetica” nel quale, per brevità, ci si era limitati alle analisi energetiche dedicando un solo capitolo all'introduzione tradizionale del concetto di exergia. Il volume, inoltre, tratta in maniera approfondita gli aspetti teorici dell'energetica e costituisce quindi un'ottima introduzione allo studio degli argomenti applicativi ai quali è dedicato “Energetica Generale”. Pertanto il volume va considerato un sussidio didattico ideale in tutti i casi in cui l'insegnamento della Termodinamica possa essere completato da quello dell'Energetica.

Udine, gennaio 2020

Gianni Comini, Giulio Croce e Stefano Savino

Indice

1	Exergia e qualità dell'energia	1
1.1	INTRODUZIONE	1
1.2	RENDIMENTI DI PRIMO PRINCIPIO	2
1.2.1	Limiti delle analisi di primo principio	3
1.3	DEFINIZIONE DI EXERGIA	13
1.4	EXERGIE DI TIPO TERMOMECCANICO	14
1.4.1	Exergia del calore	15
1.4.2	Exergia di una massa	19
1.4.3	Exergia di una corrente fluida	25
1.5	BILANCI DI EXERGIA	31
1.5.1	Bilancio di exergia per un sistema chiuso	32
1.5.2	Bilancio di exergia per un sistema aperto	34
1.5.3	Distruzione di exergia negli scambi termici irreversibili	39
1.6	RENDIMENTI DI SECONDO PRINCIPIO	41
1.6.1	Agitatore meccanico	42
1.6.2	Mescolamento adiabatico	45
1.6.3	Scambiatori a superficie	49
1.6.4	Cicli diretti bitermici	51
1.6.5	Cicli inversi bitermici	53
1.6.6	Organi di laminazione	56
1.6.7	Espansori e compressori	57
1.7	CONCLUSIONI	61
2	Exergia dei combustibili	63
2.1	INTRODUZIONE	63
2.2	RICHIAMI DI TERMODINAMICA CHIMICA	64
2.2.1	Entalpia di formazione	67
2.2.2	Legge di Hess	69
2.2.3	Calcolo dei poteri calorifici	72
2.2.4	Calcolo dei calori di reazione	74

2.2.5	Entropia assoluta	76
2.3	POTERE EXERGETICO DEI COMBUSTIBILI	78
2.4	ENTALPIA LIBERA DI GIBBS	84
2.4.1	Entalpia libera di formazione	87
2.4.2	Spontaneità delle reazioni chimiche	89
2.4.3	Variazione di $\Delta\bar{g}$ con la temperatura	90
2.5	CONCLUSIONI	91
3	Applicazioni impiantistiche	93
3.1	INTRODUZIONE	93
3.2	RENDIMENTI DEI PROCESSI DI COMBUSTIONE	94
3.2.1	Rendimenti di caldaie e generatori di vapore	96
3.2.2	Rendimenti delle camere di combustione	102
3.2.3	Rendimenti degli impianti termici motori	105
3.3	IMPIANTO CON TURBINA A GAS	107
3.3.1	Analisi dei componenti dell'impianto turbogas	108
3.3.2	Rappresentazione grafica delle perdite nel ciclo Joule	115
3.4	IMPIANTO CON TURBINA A VAPORE	118
3.4.1	Analisi dei componenti dell'impianto a vapore	118
3.4.2	Rappresentazione grafica delle perdite nel ciclo Rankine	126
3.5	IMPIANTO A CICLO COMBINATO GAS-VAPORE	128
3.5.1	Analisi a blocchi dei cicli combinati	129
3.5.2	Diagrammi (T, q)	131
3.5.3	Generatori di vapore a recupero	134
3.5.4	Analisi energetica ed exergetica di un impianto a ciclo combi- nato	136
3.6	CONCLUSIONI	146
	Bibliografia	149
	Indice analitico	151