

Fisica Tecnica applicata all'architettura

4

Francesco Bianchi Roberto Carratù

Manualetto di
Fisica Tecnica
applicata all'architettura:
LA TRASMISSIONE DEL CALORE

Copertina e realizzazione grafica: Laura Valentini
Disegno in copertina: Roberto Carratù



Copyright © MMV
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 88-7999-745-4

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: novembre 2005

1. Energia e sviluppo	3
1.1 Termodinamica ed Entropia	3
2. Fondamenti di termica	9
2.1 Nozioni di temperatura e calore	9
2.2 Unità di misura internazionali	12
2.3 Scale termiche e fattori di conversione	14
2.4 Esercizi	15
3. Propagazione del calore	16
3.1 Conduzione	16
3.2 Convezione	18
3.3 Irraggiamento	19
3.4 Conduttività esterna	22
3.5 Regime stazionario	22
3.5.1 Flusso di calore attraverso una parete omogenea	23
3.5.2 Chiusure eterogenee	25
3.5.3 Esempi di calcolo:	29
4. Altri concetti di temperatura e calore	32
4.1 Calore latente di trasformazione	32
4.2 Capacità termica	32
4.3 Corpi con differenti temperature	33
5. Energia radiante	35
5.1 Leggi di emissione	36
5.2 Brevi considerazioni riguardo il coefficiente di assorbimento e di emissione	40
5.3 Esempio di pareti opache esposte al sole	43
5.4 Temperatura aria-sole	43
5.5 Calcolo della quantità di calore attraverso il vetro	45
5.6 Ombreggiamento interno	47
5.7 Effetto serra	49
6. Regime variabile	50
6.1 Parete omogenea	50
6.2 Parete composta con differenti strati	53
6.3 Calcolo del flusso termico in regime variabile	55
6.4 Differenza di Temperatura Equivalente	56
7. Benessere termico umano	59
8. Diagramma psicrometrico dell'aria umida	66
9. Psicrometria	72
10. Impianti di condizionamento	83
10.1 Impianti a tutt'aria	83
10.2 Impianti misti ad aria ed acqua	84
10.3 Impianti ad induzione	84
10.4 Impianti ad aria primaria e fan-coil	84
10.5 Impianti a pannelli radianti	85
10.6 Progetto di condizionamento: caso estivo senza ricircolo, impianto a tutt'aria	85
11. Verifica termoigrometrica delle strutture	87
APPENDICE	92
UNITÀ DI MISURA NEL SISTEMA INTERNAZIONALE (S. I.)	106
Bibliografia essenziale	107

1. Energia e sviluppo

“Ogni qualvolta c'è una grande quantità di energia in una regione e pochissima in una regione vicina, l'energia tende a muoversi da una regione all'altra finché non si sia stabilito un equilibrio. Tutto questo processo può essere preso come una tendenza alla democrazia.”

Bertrand Russell

1.1 Termodinamica ed Entropia

La Termodinamica è definita la scienza dell'energia, concetto sicuramente non facile da definire.

Il termine stesso “termodinamica” deriva dal greco “calore e potenza”, parole che già in sé richiamano lo sforzo compiuto dai nostri avi per legare i concetti di lavoro ed energia. Come scienza, la termodinamica è nata con la costruzione delle prime macchine a vapore, costruite in Inghilterra tra la fine del '600 e gli inizi del '700. E' proprio per comprendere l'inefficienza e la lentezza di questi primi marchingegni che numerosi scienziati intrapresero lo studio di questa nuova scienza.

In particolare fu Sadi Carnot (1796-1832), un ufficiale dell'esercito francese, il primo a comprendere che per far funzionare una macchina a vapore si richiede non solo calore ma un “flusso di calore” dovuto ad una differenza di temperatura, e questo accade nella caldaia calda, e nel condensatore freddo. Il solo calore non basta a creare l'energia meccanica, ma è necessario anche il freddo.

Fu questa semplice ma fondamentale intuizione, chiamata “principio di Carnot, ad aprire le porte ad un valente scienziato prussiano, Rudolph Clausius (1822-1888), che intorno alla metà del secolo Ottocento formulò i due fondamentali principi della termodinamica, che possono essere riassunti in un'unica frase: **“l'energia dell'universo è costante e la sua qualità è in continua diminuzione”**.

Ciò equivale a dire che è impossibile creare o distruggere energia, la quantità totale a nostra disposizione è stata fissata all'inizio dei tempi, per intenderci all'epoca del “Big Bang” e quindi la si può solo trasformare da una forma all'altra (*I° principio della termodinamica*) ma in questa trasformazione l'energia perde di qualità e quindi non più riutilizzabile per produrre lo stesso lavoro (*II° principio della termodinamica*).

Se si dovesse tener solo conto del primo principio, avremmo a che fare solo con trasformazioni di energia da una forma all'altra, avremmo scoperto le leggi che sono alla base del moto perpetuo, o dato una risposta ai dubbi di Carnot relativamente alla macchina ideale: perché teoricamente con due differenze di temperatura i rendimenti sono sempre inferiori a quelli sperimentati?

Carnot stesso aveva scoperto che una delle cause principali, per quanto perfette potessero essere queste macchine, era l'attrito che si produceva nei meccanismi, che trasformava i cavalli vapore in calore, disperdendo energia.

Sulla base di questi pensieri, Clausius intuì che l'energia trasformandosi attraverso stadi via via di qualità inferiore.

E' come scendere da una scala ed essere impediti nel risalirla.

Queste intuizioni, semplici e radicate al senso comune, hanno richiesto invece sforzi notevoli da parte di numerosi scienziati.

Infatti, l'esperienza comune insegna che una qualsiasi bevanda a temperatura superiore a quella dell'ambiente, lasciata su un tavolo, finirà per raffreddarsi, mentre una bevanda fredda non diventerà mai più calda della temperatura dell'ambiente in cui si trova.

L'energia termica iniziale, si degrada in una forma di energia meno utilizzabile, per così dire, meno "nobile".

Il concetto di perdita di qualità può essere facilmente visualizzato, ad esempio, da un grave lasciato cadere da una certa altezza. Lo stadio più nobile di energia corrisponde all'energia potenziale posseduto dal punto ad altezza maggiore.

Una volta caduto a terra, il grave ha convertito la sua energia in un'altra forma, degradandola però in qualità.

Questo processo è, però, a senso unico: è necessaria un'altra energia, un altro lavoro, per riportare il masso nella posizione iniziale, più nobile.

Si vedrà, ad esempio, che queste semplici esperienze quotidiane hanno però delle ripercussioni ben più importanti sulla nostra vita.

Nell'universo si riteneva esistessero due tipi di processi: i processi *reversibili* ed i processi *irreversibili*.

I cosiddetti processi reversibili sono quelli le cui conseguenze possono essere annullate, mentre quelli irreversibili, quelli le cui conseguenze non si possono ribaltare.

Il grande scienziato Isaac Newton, ingannandosi, aveva osservato che i processi dell'universo apparivano reversibili, ad ogni processo naturale ne corrispondeva un altro che si opponeva in senso contrario, i corpi si muovevano in salita e discesa, un pendolo oscillava avanti ed indietro, l'universo insomma sembrava pervaso da un'azione senza fine, ad ogni azione corrispondeva una reazione.

Con gli studi sul calore condotti da Clausius, l'umanità della seconda metà dell'Ottocento in poi scopre invece che i processi sono solo a senso unico, quindi irreversibili.

Un corpo più caldo trasmette il calore sempre ad uno più freddo e mai avviene il contrario, l'attrito trasforma il moto in calore e mai l'inverso, non esiste una macchina che costringe il calore a passare dal freddo al caldo senza utilizzare energia.

L'esistenza di questi processi ci costringe a ripensare all'essenza, alla filosofia ed anche alla conduzione della nostra esistenza.

L'universo sta inesorabilmente invecchiando ed in questa parabola discendente non è consentito a nessuno di tornare indietro, è un po' quel che accade con il tempo che, indifferente, trascorre tutto.

L'energia, come visto, non si crea e non si distrugge, matematicamente indicando con la lettera E l'energia dell'universo e con Δ la variazione finale, il primo principio della termodinamica indica che:

$$\Delta E = 0$$

L'energia complessiva dell'universo è costante.

Clausius, dopo aver elaborato quest'importante principio, elaborò un concetto di vasta portata, sperimentato da tutti ma mai codificato: "*l'entropia*", termine da lui scelto in contrapposizione ad energia.

In natura esistono delle variazioni energetiche a carattere naturale, spontanee, come la cessione delle temperature, che egli considera come variazioni “*entropiche positive*” e variazioni innaturali, non spontanee, dette variazioni “*entropiche negative*”, quelle ad esempio di alcune macchine in cui la trasformazione del calore avviene in senso inverso. Egli osservò, semplicemente eseguendo una somma algebrica tra le variazioni positive e negative, la direzione in cui va l’universo.

In un primo momento assunse per certa l’esistenza delle macchine ideali, concludendo che l’entropia dell’universo è in perfetto equilibrio. Successivamente le sperimentazioni ed i calcoli portarono alla luce una realtà totalmente diversa: le variazioni naturali, quindi l’entropia positiva, sono sempre maggiori di quelle innaturali, ad entropia negativa.

Indicando con la lettera S universo, l’entropia totale dell’universo e Δ la variazione finale, il secondo principio della termodinamica indica che:

$$\Delta S > 0$$

Il nostro universo è governato da un principio di non conservazione dell’energia.

Inconsciamente Clausius, risolvendo uno dei misteri più grandi della scienza, il comportamento irreversibile del calore, ha fornito una nuova immagine dell’universo in corsa verso il suo naturale destino entropico.

Nel momento in cui tutta l’energia meccanica si trasformerà in calore ed ogni fonte di calore si raffredderà, l’universo stesso si fermerà, come una qualsiasi delle sue macchine con mancanza di energia, come qualsiasi automobile senza carburante, come qualsiasi azione in mancanza di una forza.

Molti scienziati dopo Clausius hanno tentato di opporsi a questa legge universale.

In particolare, due grandi menti del secolo passato, Maxwell e Boltzmann proposero emozionanti sfide che però finirono solo con il confermare la teoria di Clausius.

Maxwell in particolare ipotizzò che un gas, tutto alla stessa temperatura, contenuto in un recipiente, che non scambia calore con l’esterno (adiabatico), diviso in due compartimenti comunicanti tramite una porticina, in base alla legge dell’entropia, non compie alcun lavoro,

Egli immaginò invece la presenza di un “diavoletto” in grado di individuare le molecole più veloci della media e di spostarle, aprendo la porticina, nel comparto destro e quelle più lente in quello sinistro.

La temperatura è definita come un indice medio della velocità delle molecole. In questo modo egli invertì il processo entropico, creando così una macchina termica.

Il problema, però, è che questa “creatura” esiste solo nella fantasia dello scienziato. Anche ipotizzando l’esistenza di questo diavoletto, altri scienziati hanno dimostrato l’impossibilità di poter aggirare la legge dell’entropia.

Boltzmann ha elaborato invece il famoso teorema “h” in cui non si rifiuta la validità del secondo principio, ma si rifiuta la possibilità di ammettere che questo rappresenti una certezza assoluta; al termine *certo* egli sostituisce il termine *probabile*, dando così al principio dell’entropia un carattere *statistico*.

Il calore che passa da un corpo freddo ad uno caldo, è improbabile ma non impossibile.

La termodinamica basata su principi statistici, però, non ha mai preso piede.

I due principi della termodinamica non sono stati mai dimostrati scientificamente, ma sono stati assunti come veri poiché non si è mai dimostrato il loro contrario.

Quali sono quindi le conseguenze di questi semplici ragionamenti?

Sulla Terra esistono due sole sorgenti di energia utilizzabili: le risorse terrestri e la radiazione solare.

La radiazione solare, anche se si degrada ogni secondo che passa, può essere considerata una forma di energia illimitata nella sua quantità totale, ma limitata come potenza al valore dell'irraggiamento sulla Terra.

La **costante solare** ci fornisce questo valore: per unità di superficie, considerata ortogonale alla direzione dei raggi solari, per la fascia esterna dell'atmosfera risulta pari a 1353 W/m^2 .

A livello del suolo, a causa di fenomeni quali l'assorbimento e la diffusione, in condizione di una giornata serena e a mezzogiorno, questo valore è intorno ai 1000 W/m^2 .

In Italia, che presenta un regime solare medio alto, si ha ad esempio che l'insolazione solare media giornaliera è di $3,6 \text{ KW/m}^2$ al Nord, $4,7 \text{ KW/m}^2$ al Centro e $5,4 \text{ KW/m}^2$ al Sud.

Assumendo un coefficiente cautelativo attuale di conversione di un sistema fotovoltaico pari al 10% avremo, ad esempio, un valore per una località del Centro Italia di 170 KWh/m^2 .

Chiaramente si deve considerare la discontinuità del sistema solare dovuto all'alternanza del giorno con la notte, al ciclo delle stagioni e delle variazioni meteorologiche, ecc.

A titolo di semplice confronto, una famiglia italiana media consuma circa 3.000 KWh/anno , avrebbe quindi necessità di installare circa 17 mq di pannelli solari.

Per quanto riguarda invece la disponibilità delle risorse terrestri, si deve notare che sono limitate dalla quantità totale a disposizione, questa quantità tende inesorabilmente ad esaurirsi, la materia si converte in energia ma l'energia non crea la materia.

Il Sole stesso che ci dispensa energia non potrebbe essere usato per produrre materia dalla pura energia.

Con parole di Clausius, si potrebbe dire l'entropia dei beni materiali è in aumento e poiché la Terra è un sistema chiuso nell'universo, si avvia verso un massimo, che equivale a dire verso la fine.

Hermann Ludwig Ferdinand von **Helmholtz** (1821 - 1894), già nel secolo scorso, a questo proposito, postulava la morte termica dell'universo.

La morte dell'universo implica anche la sua nascita, la teoria che ancora oggi viene accettata è quella del Big Bang concepita dallo scienziato Canon Georges Lemaitre (1894-1966): l'universo ebbe inizio da un esplosione di energia che si trovava in una forma estremamente densa e concentrata.

A seguito di quest'antica esplosione l'universo ha iniziato ad espandersi e di conseguenza a perdere di energia, abbandonando sempre più il suo ordine iniziale e da

allora non si è mai fermato. A ben vedere la teoria del Big Bang coincide con la formulazione del primo e secondo principio della termodinamica.

Questa teoria viene continuamente validata dagli astronomi che, ad esempio, contando il numero delle sorgenti radio, mostrano che nel passato il loro numero era maggiore di quello odierno.

Allo stato delle conoscenze attuali si deve ammettere che l'universo è realmente destinato a scendere la china, fino al raggiungimento dell'entropia massima, l'energia si converte sempre da uno stato utilizzabile ad uno dissipato, cioè da uno stato ordinato ad uno disordinato.

Alla luce delle considerazioni fin qui esposte, come si può attualizzare al il concetto di entropia?

La storia è stata sempre scandita da tappe fondamentali che hanno sempre coinciso con l'esaurimento delle risorse energetiche esistenti.

L'entropia diventa così elevata che obbliga la specie umana ad un salto qualitativo e allo sfruttamento di nuove risorse energetiche e tecnologiche, nuove istituzioni sociali, economiche e politiche.

Ognuno di questi salti qualitativi è, e sarà, sempre più impegnativo e faticoso poiché le riserve di energia che sono state esaurite, hanno un livello qualitativo più basso.

La storia umana, vista alla luce della lotta all'entropia, testimonia che i cambiamenti tecnologici sono andati sempre verso una maggiore complessità e maggiori consumi energetici, di conseguenza l'ambiente così modificato non permette l'accesso a fonti di energia facilmente disponibili.

E' indubbio quindi che in questi ultimi anni diversi segnali e molteplici situazioni hanno costretto l'uomo dell'era post-industriale a ripensare al proprio cammino futuro alla luce di incontrovertibili situazioni reali: di fatto le fonti energetiche che hanno sostenuto ed alimentato per anni la società industriale, quali in primo luogo il petrolio ed i suoi derivati, si stanno esaurendo.

Senza ora lanciare proclami su imminenti catastrofi a cui il genere umano a breve andrà incontro, alla luce della teoria entropica ci si deve in breve tempo preparare a modificare il nostro atteggiamento nei confronti della materia e dell'energia attualmente a nostra disposizione.

Gli indicatori che siamo giunti ad nuovo cambio epocale sono sotto gli occhi di tutti, anche se a volte si preferisce non tenerne conto: esaurimento delle fonti energetiche primarie, effetto serra, crescita esponenziale della popolazione, urbanizzazione selvaggia, inquinamento ambientale, ecc.

Un primo passo potrebbe essere fatto, ad esempio, introducendo un nuovo modo di valutare l'efficienza di un sistema energetico, che ad oggi non tiene conto dell'aspetto qualitativo della fonte energetica che si sta consumando.

Perché, infatti, utilizzare il petrolio, una forma di energia ad “elevata informazione”, che può dare una fiamma ad oltre 1000°C, per riscaldare una casa a 20°C?

Una commissione di studio americana composta da ingegneri e fisici ha già proposto di utilizzare un indice, già noto nella termodinamica “*il rendimento del secondo ordine*” in cui il calore o il lavoro non viene confrontato col massimo calore o lavoro che viene prodotto, ma viene confrontato col massimo calore o lavoro che può essere fornito dal migliore di tutti i sistemi in grado di svolgere lo stesso compito, alimentato dalla stessa quantità di energia.

Ad esempio una caldaia che fornisce acqua calda ad una casa, ha un rendimento del primo ordine pari al 60%, mentre valutata con quello del secondo ordine risulta del 5,2%. I sistemi di energia solare hanno rendimenti del secondo ordine tra più elevati. Per il solare termico, ad esempio, i rendimenti del secondo ordine sfiorano il 70-80%.

Altro nodo fondamentale è rappresentato dal concetto di “*energia netta*” considerata come il totale dell’energia prodotta da una certa tecnologia, al netto però dell’energia utilizzata per produrla.

Alla luce di questo parametro si vede che anche l’energia solare richiede enormi quantità di energia e materiali per la produzione dei pannelli solari.

Quale futuro ci attende?

In primo luogo si deve essere consapevoli che ineluttabilmente siamo alle soglie di un nuovo salto qualitativo e probabilmente di una nuova era.

Ci sono diverse teorie a riguardo, alcuni, ritenendo che l’energia concentrata ricavata da fonti non rinnovabili ha completato il suo corso, suggeriscono altre forme di energia, come visto, quella solare a bassa concentrazione.

La natura di questo tipo di energia però ci obbligherà a cambiare il nostro sistema di vita, come ad esempio a livello urbano; la natura dei flussi e le tecnologie di scala sono adatte più a piccole unità abitative che a complessi concentrati.

L’energia solare, infatti, mal si presta alla complessa organizzazione tecnologica della società industriale contemporanea.

Il passaggio ineluttabile da un sistema a “forte” crescita entropica ad uno a “lenta” crescita, modificherà senza dubbio non solo il nostro modo di vivere, la nostra società, la nostra cultura, l’economia, ma anche la politica, fino ad arrivare a temi a noi più familiari come l’urbanistica, la progettazione, gli impianti tecnologici, insomma l’architettura in toto.

L’energia solare, però, non si deve considerare separatamente al problema della limitatezza delle risorse dei materiali sulla Terra, anche l’approccio ai problemi energetici dovrà necessariamente modificare.

Altri, invece, indicano la via d’uscita a questo drammatico scenario prospettando un nuovo regime energetico fondato sull’idrogeno, che, se adeguatamente sfruttato, potrebbe diventare il “*carburante eterno*”, inesauribile e del tutto esente da emissioni inquinanti.