

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

1. Conversione dell'Energia e Macchine a Fluido

Roberto Lensi

DIPARTIMENTO DI ENERGETICA

GENERALITÀ

Per trattare in maniera appropriata argomenti aventi carattere tecnico-scientifico devono essere effettuate scelte opportune in materia di:

- *unità di misura;*
- *nomenclatura;*
- *simbologia.*

Unità di misura

Il Sistema Internazionale delle unità di misura (SI) è stato approvato nel 1960, quindi confermato e precisato nel 1967, dalla Conferenza Generale dei Pesi e Misure (CGPM).

Esso è stato reso obbligatorio, per legge, in Italia nel 1982.

Tuttavia, specialmente in alcuni settori della tecnica, non è semplice riuscire ad abbandonare unità di misura profondamente radicate nella tradizione, alle quali sono legate le individuali conoscenze dei valori numerici delle grandezze fisiche d'uso comune e delle taglie di apparecchi e installazioni.

È quindi necessario che tecnici, professionisti e ricercatori siano in grado di districarsi il più possibile agevolmente tra molteplici unità di misura, legali o meno, talvolta adoperate in relazione ad una stessa grandezza fisica.

Nomenclatura

Maggiore attenzione rispetto al passato è oggi riservata anche alla nomenclatura delle grandezze fisiche.

In particolare, la denominazione di molte grandezze è meglio precisata sostituendo al troppo generico termine "*specifico*" quello più esplicativo di "massico", "ponderale", "volumico", "areico", "lineico", a seconda che si tratti di grandezza riferita alla massa, al peso, al volume, alla superficie, alla lunghezza.

Così la "massa specifica" diventa "massa volumica", il "peso specifico" diventa "peso volumico", il "volume specifico" diventa "volume massico" o "volume ponderale", a seconda che sia riferito alla massa o al peso, il "calore specifico" diventa "calore massico" o "calore volumico" (o meglio "capacità termica massica" o "capacità termica volumica"), a seconda che sia fatto riferimento alla massa o al volume.

Inoltre, il termine "*densità*" dovrebbe essere usato unicamente per indicare il rapporto (adimensionale) tra la massa volumica di un corpo e quella di un corpo di riferimento, e non il rapporto tra la massa di un corpo ed il suo volume che è invece denominato "massa volumica", come ricordato sopra.

Simbologia

I simboli da impiegare sono quelli più usuali nelle trattazioni tecnico-scientifiche, in ottemperanza alle norme raccomandate, italiane o internazionali.

Per quanto riguarda i numeri adimensionali di Prandtl, di Grashoff, di Nusselt, di Mach, di Reynolds, di Stokes, ecc., è consigliato l'impiego del simbolo N con un pedice di una o più lettere identificanti il nome dell'autore della cifra adimensionale (N_{Pr} N_{Gr} N_{Nu} N_M N_{Re} N_{Sto} ecc.).

Per quanto riguarda il "normal metrocubo", inoltre, l'indicazione m_n^3 è quella che dovrebbe essere adoperata.

La molteplicità di discipline coinvolte negli argomenti da trattare ed il conseguente gran numero di grandezze fisiche interessate, rende praticamente impossibile dedicare un simbolo diverso ad ogni grandezza fisica che è necessario prendere in considerazione.

SIMBOLOGIA

CONVENZIONI

Sono utilizzate le seguenti convenzioni:

- salvo diversa esplicita indicazione, le lettere minuscole rappresentano le stesse grandezze indicate dalle corrispondenti lettere maiuscole, ma con riferimento all'unità di massa; se la lettera è sormontata dal simbolo \sim (tilde), il riferimento non è massico, bensì molare;
- le lettere, sia minuscole che maiuscole, sormontate da un punto, indicano le portate (cioè i flussi) della grandezza fisica indicata dalla lettera stessa (quantità per unità di tempo).

I SISTEMI ENERGETICI

I *sistemi energetici* dei quali dovremo trattare sono *apparecchi* o *installazioni* per la conversione dell'energia, ma non sono tutti gli apparecchi o installazioni per la conversione dell'energia.

Sono infatti esclusi, ad esempio:

- i sistemi per la conversione di energia meccanica in energia elettrica e viceversa (macchine elettriche);
- gli apparecchi per la conversione di energia elettrica in energia elettrica (trasformatori elettrici);
- i sistemi per la conversione di energia meccanica in energia meccanica (riduttori di velocità, apparecchi di sollevamento);
- le macchine utensili (torni, trapani, fresatrici);
- quasi tutti gli elettrodomestici, con l'eccezione dei frigoriferi e delle pompe di calore, delle pompe idrauliche e dei ventilatori e compressori (ammesso che questi possano essere chiamati elettrodomestici per il fatto che sono frequentemente alimentati mediante energia elettrica).

Alcuni esempi di *sistemi energetici* di nostra competenza sono quelli:

- per la conversione dell'energia chimica dei combustibili in energia meccanica (motori come quelli impiegati nella trazione automobilistica, turbogas come quelli impiegati nella propulsione aeronautica, centrali termoelettriche per la produzione di energia elettrica con esclusione degli alternatori e dei trasformatori installati in tali centrali);
- per la conversione dell'energia idraulica in energia meccanica (centrali idroelettriche per la produzione di energia elettrica con esclusione degli alternatori e dei trasformatori installati in tali centrali);
- per la conversione dell'energia meccanica in energia posseduta da un fluido (pompe, compressori, ventilatori);
- che utilizzano energia meccanica per realizzare un trasferimento di energia termica in senso contrario a quello naturale (frigoriferi e pompe di calore).

MACCHINE E IMPIANTI

I *sistemi energetici* oggetto del nostro studio possono essere sistemi compatti e di ingombro relativamente limitato ai quali viene dato il nome di *macchine*, come nel caso di motori per la trazione automobilistica, pompe, compressori e ventilatori. In altri casi i *sistemi energetici* consistono in installazioni complesse che occupano superfici anche molto estese ed in tal caso è dato loro il nome di *impianti*. Questi possono essere realizzati impiegando macchine (turbine, pompe o compressori) insieme con altre apparecchiature (scambiatori di calore, camere di combustione, valvole e distributori) come nel caso delle centrali termoelettriche ed idroelettriche.

In taluni casi la distinzione suddetta non è né immediata né univoca. Ad esempio i *turbogas* pur essendo costituiti da un compressore, una camera di combustione ed una turbina a gas, sono considerati *macchine* (non *impianti*), ed infatti sono chiamati *turbomotori a gas*, in virtù della compattezza e dell'ingombro relativamente limitato. I frigoriferi, che sono costituiti da un compressore, due scambiatori di calore ed una valvola di laminazione, sono chiamati *macchine frigorifere* o *impianti frigoriferi* essenzialmente sulla base della taglia e del conseguente ingombro. D'altra parte anche i *motori* per la trazione automobilistica, pur nella loro estrema compattezza, se esaminati nel dettaglio presentano molteplici macchine e apparecchiature ausiliarie tra cui pompe, ventilatori, scambiatori di calore, valvole, ecc.

LE MACCHINE

Nel linguaggio comune, la parola “*macchina*” è utilizzata in genere per indicare ogni “*congegno capace di produrre un effetto utile*”.

Più precisamente, con questo termine s'intende fare qui riferimento alle MACCHINE A FLUIDO:

- *macchine*, intese come dispositivi per la conversione dell'energia da una forma all'altra ed in cui o la prima o l'ultima forma è costituita da energia meccanica (lavoro);
- *a fluido*, in quanto è sempre presente un sistema fluido, essenziale, anche in condizioni di massima idealizzazione, al funzionamento di tali macchine.

CLASSIFICAZIONE DI TUTTE LE MACCHINE A FLUIDO

Tutte le macchine a fluido sono classificabili in base a:

- 1) la natura del fluido;
- 2) la sequenza di trasformazioni dell'energia;
- 3) la cinematica degli organi meccanici che scambiano energia col fluido.

Classificazione n.1

Macchine TERMICHE, quando in esse opera un *fluido comprimibile*:

- *gas* (generalmente aria o prodotti della combustione), nelle macchine a gas;
- *vapore* (generalmente vapor d'acqua), nelle macchine a vapore.

Macchine IDRAULICHE, quando in esse opera un *fluido teoricamente incomprimibile*:

- *liquido* (generalmente acqua, talvolta olio minerale).

Classificazione n.2

Macchine MOTRICI, quando esse realizzano trasformazioni dell'energia, da una forma ad un'altra, secondo una sequenza nella quale il lavoro costituisce la forma di energia finale. Il fluido che attraversa tali macchine trasmette parte della sua energia agli organi mobili della macchina, e rende quindi disponibile, di norma ad un albero rotante, un lavoro meccanico utile.

Macchine OPERATRICI, quando esse realizzano trasformazioni dell'energia, da una forma ad un'altra, secondo una sequenza nella quale il lavoro costituisce la forma di energia iniziale. La macchina, mossa da un adatto motore (motore elettrico, motore termico, ecc.), trasmette parte del lavoro meccanico al fluido che la attraversa, il quale quando lascia la macchina ha raggiunto un livello energetico (energia cinetica o potenziale) maggiore di quello che possedeva all'ingresso.

Classificazione di tutte le MACCHINE A FLUIDO

MACCHINE (A FLUIDO)			
1) TERMICHE (principi della termodinamica)		1) IDRAULICHE	
2) MOTRICI • <i>motrici termiche</i>	2) OPERATRICI • <i>compressori</i>	2) MOTRICI • <i>motrici idrauliche</i>	2) OPERATRICI • <i>pompe</i>

Tutte le macchine a fluido, *motrici* e *operatrici*, *termiche* e *idrauliche*, sono inoltre classificabili, in base alla cinematica degli organi meccanici che scambiano energia col fluido, come riportato qui di seguito.

Classificazione n. 3

Macchine ALTERNATIVE, quando gli elementi mobili che scambiano energia col fluido sono dotati di un moto alternato tra due posizioni estreme.

Macchine ROTANTI, quando gli elementi mobili che scambiano energia col fluido sono dotati di un moto rotatorio intorno ad un asse, che in genere è l'asse della macchina.

CLASSIFICAZIONE DI PARTICOLARI CATEGORIE DI MACCHINE A FLUIDO

Per quanto riguarda le macchine ROTANTI, queste possono essere ulteriormente classificate in relazione al tipo d'interazione tra il fluido e gli organi meccanici della macchina che scambiano energia col fluido, e quindi in relazione alle caratteristiche del moto del sistema fluido secondo la classificazione seguente.

Classificazione n. 4

Macchine VOLUMETRICHE, quando l'energia cinetica che il fluido acquista durante il funzionamento della macchina non costituisce un passaggio teoricamente essenziale ai fini della trasformazione dell'energia. Esse operano su volumi successivi di fluido, il quale è introdotto in un certo spazio messo a disposizione dalla macchina, scambia lavoro con gli organi mobili di tale macchina ed è quindi espulso; subito dopo altro fluido viene introdotto ed il processo si ripete ciclicamente.

Macchine DINAMICHE (più frequentemente dette **turbomacchine**), quando l'energia cinetica che il fluido acquista durante il funzionamento della macchina è essenziale, anche teoricamente, ai fini della trasformazione dell'energia. Esse operano senza discontinuità: il fluido fluisce continuamente attraverso la macchina (macchina a flusso continuo) e nello stesso tempo scambia, con continuità, lavoro con gli appositi organi mobili della macchina (che non può quindi essere alternativa).

Le macchine ALTERNATIVE sono necessariamente di tipo VOLUMETRICO, in quanto la cinematica degli organi mobili non consente un fluire continuo del fluido attraverso la macchina.

Classificazione delle MACCHINE TERMICHE MOTRICI (dette anche MOTRICI TERMICHE)

MOTRICI TERMICHE				
5) A COMBUSTIONE ESTERNA 6) (A VAPORE oppure A GAS)		5) A COMBUSTIONE INTERNA (A GAS)		
VOLUMETRICHE	DINAMICHE • <i>Turbine</i> (a gas o vapore)	VOLUMETRICHE		DINAMICHE • <i>Turbogas</i>
		7) ACCENSIONE COMANDATA	7) ACCENSIONE SPONTANEA	

Le **turbomacchine** (MACCHINE DINAMICHE), sia motrici che operatrici, sono ulteriormente classificate, secondo l'andamento del flusso di fluido attraverso la macchina, in (classificazione n. 8):

ASSIALI, quando il fluido percorre un canale (anulare) fondamentalmente parallelo all'asse di rotazione dell'albero della macchina;

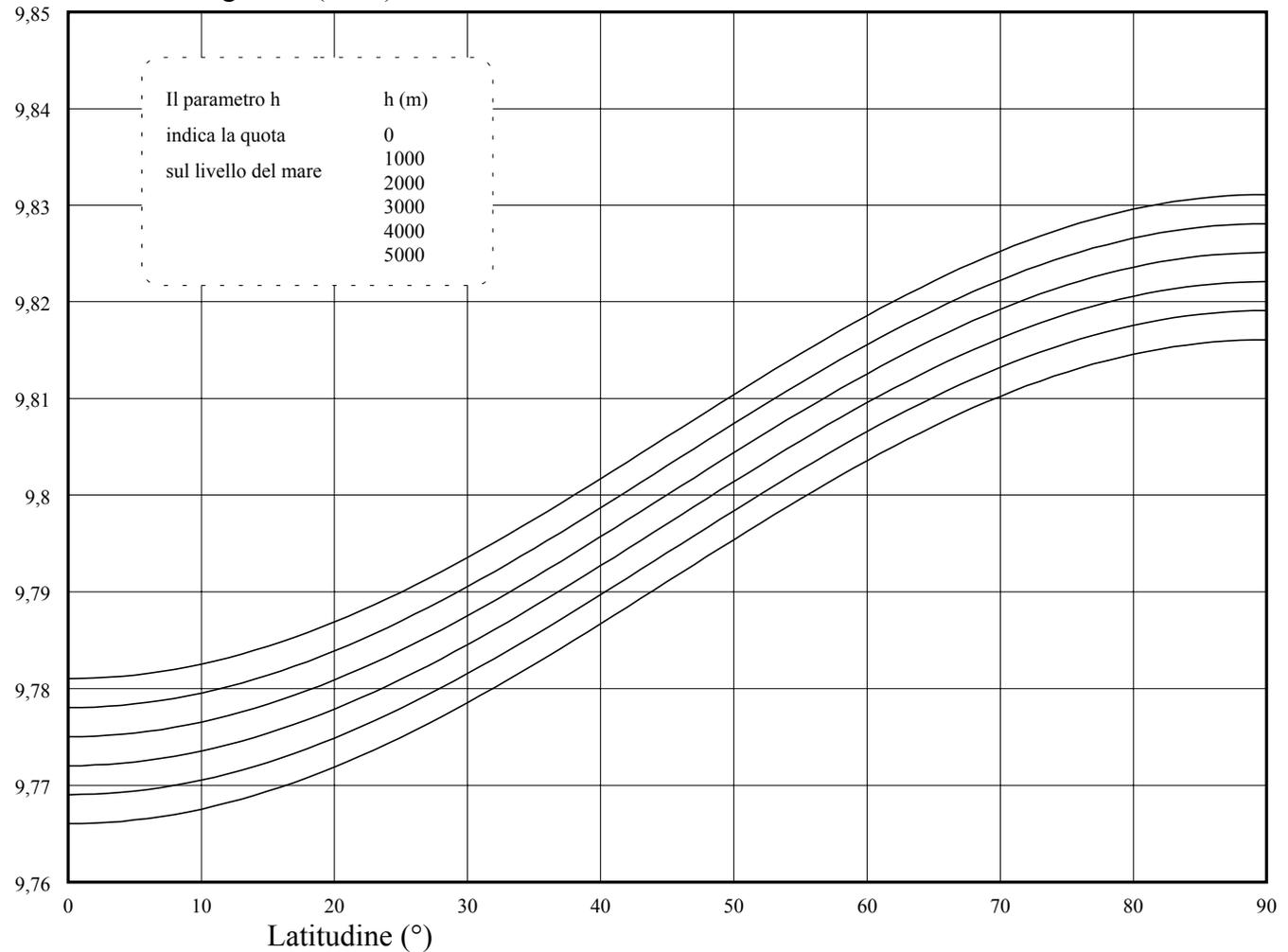
RADIALI, quando il fluido si muove essenzialmente su un piano normale all'asse di rotazione dell'albero della macchina;

MISTE (o CONICHE), quando il fluido percorre un canale intermedio tra quelli dei due casi precedenti, e quindi essenzialmente conico.

LA CONVERSIONE DELLE UNITÀ DI MISURA

Nota: sono indicati in grassetto i fattori di conversione esatti;
 (f) indica il riferimento alla forza;
 (m) indica il riferimento alla massa.

ACCELERAZIONE DI GRAVITÀ

Accelerazione di gravità (m s^{-2})

L'accelerazione di gravità terrestre varia al variare della latitudine e della quota sul livello del mare. Una formula in grado di esprimere approssimativamente tale dipendenza è la seguente

$$g = 9,806056 - 0,025028 \cos 2\varphi - 0,000003 h$$

in cui è:

g accelerazione di gravità espressa in metri al secondo quadrato;

h quota sul livello del mare espressa in metri;

φ latitudine espressa in gradi sessagesimali;

ed il cui andamento è mostrato nella figura riportata sopra.

Allo scopo di rendere assoluti (o coerenti) anche i sistemi di unità di misura che scelgono come fondamentale la grandezza "forza" anziché la grandezza "massa", e per effettuare la conversione tra le varie unità di misura, si fa riferimento a:

$$g_n = \mathbf{9,80665} \text{ m s}^{-2} \text{ (32,1740 ft s}^{-2}\text{) accelerazione di gravità normale (standard o convenzionale)}$$

da cui:

$$1/g_n = 0,101\,971\,62 \text{ m}^{-1}\text{s}^2$$

FATTORI DI CONVERSIONE

Fino a tutto l'anno 1947, le unità di misura adottate erano quelle dette internazionali (qui indicate col pedice *int*). Successivamente si ebbe il passaggio alle unità "assolute" (qui indicate senza alcun pedice) del sistema di unità di misura allora chiamato Giorgi (si può rilevare come ancora oggi il SI mantenga, per l'unità di corrente elettrica, l'ampere, la stessa definizione introdotta nel 1948).

I relativi fattori di conversione sono:

$$1 \Omega_{\text{int}} = 1,000\,495 \pm 0,000\,015 \Omega$$

$$1 V_{\text{int}} = 1,000\,330 \pm 0,000\,029 V$$

$$1 A_{\text{int}} = 0,999\,835 \pm 0,000\,025 A$$

$$1 W_{\text{int}} = 1,000\,165 \pm 0,000\,052 W$$

$$1 C_{\text{int}} = 0,999\,835 \pm 0,000\,025 C$$

$$1 J_{\text{int}} = 1,000\,165 \pm 0,000\,052 J$$

Il Comitato Internazionale Pesi e Misure (CIPM) stabilì inoltre nel 1948 di fissare la caloria delle International Steam Tables (qui indicata col pedice *IT*) esattamente pari a $1/860 W_{\text{int}} h$. Da cui:

$$1 kW_{\text{int}} h = 860 \text{ kcal}_{\text{IT}}$$

$$1 \text{ kcal}_{\text{IT}} = 4186 J_{\text{int}}$$

La relazione esistente tra la caloria termochimica (qui indicata senza alcun pedice) e la caloria IT è la seguente: $1 \text{ kcal}_{\text{IT}} = 1,000\,654 \text{ kcal}$

Definizione di grande caloria (kilocaloria) termochimica: "quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di 1 kg di acqua da 14,5 °C a 15,5 °C"

$$1 \text{ kcal} = 4184 J \quad (1 \text{ kcal}_{\text{IT}} = 4186,8 J)$$

Fattori di conversione per la lunghezza

1↓ = →	m	in	ft	yd
m	=	39,3701	3,28084	1,09361
in	0,0254	=	0,08333	0,02777
ft	0,3048	12	=	0,33333
yd	0,9144	36	3	=

Fattori di conversione per la massa

1↓ = →	kg	lb(m)
kg	=	2,2046224
lb(m)	0,4535924	=

Fattori di conversione per la forza

1↓ = →	N	kg(f)	lb(f)
N	=	0,10197162	0,2248089
kg(f)	9,80665	=	2,2046224
lb(f)	4,448222	0,4535924	=

Fattori di conversione per la pressione

1↓ = →	Pa	bar	atm	kg(f)/cm ²	psi	psf
Pa	=	10 ⁻⁵	9,86923 10 ⁻⁶	1,019716 10 ⁻⁵	14,503775 10 ⁻⁵	0,0208854
bar	10 ⁵	=	0,986923	1,0197162	14,503775	2088,54
atm	101325	1,01325	=	1,03323	14,695949	2116,21
kg(f)/cm ²	9,80665 10 ⁴	0,980665	0,96784	=	14,2233	2048,16
psi	6894,757	0,06894757	0,0680459	0,070307	=	144
psf	47,88026	47,88026 10 ⁻⁵	47,2541 10 ⁻⁵	48,8243 10 ⁻⁵	694,4444 10 ⁻⁵	=

Atmosfera normale: $1 \text{ atm} = 760 \text{ mm}_{\text{Hg}}$ (a 0 °C)

Fattori di conversione per l'energia

1↓ = →	J	J(int)	kcal	kcal(IT)	kg(f) m	Btu
J	=	0,999835	0,000239	0,0002388	0,1019716	9,47817 10 ⁻⁴
J(int)	1,000165	=	2,39045 10 ⁻⁴	0,0002389	0,1019884	0,000948
kcal	4184	4183,3	=	0,9993464	426,649	3,965667
kcal(IT)	4186,8	4186	1,000654	=	426,93	3,96825
kg(f) m	9,80665	9,805032	2,3438 10 ⁻³	2,3423 10 ⁻³	=	9,2949 10 ⁻³
Btu	1055,056	1054,882	0,2521644	0,252	107,5858	=

Fattori di conversione per la potenza

1↓ = →	kW	kW(int)	kcal/h	kcal(IT)/h	kg(f) m/s	CV
kW	=	0,999835	860,437	859,845	101,9716	1,3596193
kW(int)	1,000165	=	860,585	860	101,9884	1,359841
kcal/h	0,0011622	0,001162	=	0,9993464	0,1185136	0,0015801
kcal(IT)/h	0,001163	0,0011627	1,000654	=	0,1185916	0,0015812
kg(f) m/s	9,80665 10 ⁻³	9,805032 10 ⁻³	8,43785	8,4323	=	0,0133333
CV	0,7355	0,73538	632,85	632,416	75	=

1↓ = →	kW	CV	ft lb(f)/s	HP	HP(elettr.)
kW	=	1,3596193	737,562	1,341022	1,3404825
CV	0,7355	=	542,47613	0,9863215	0,985925
ft lb(f)/s	1,35582 10 ⁻³	0,0018433	=	0,00181818	0,00181745
HP	0,7457	1,0138681	550	=	0,9995977
HP(elettr.)	0,746	1,0142759	550,22126	1,0004024	=

Fattori di conversione per l'entalpia massica

1↓ = →	kJ/kg	kcal/kg	kcal(IT)/kg	Btu/lb(m)
kJ/kg	=	0,239	0,2388459	0,4299226
kcal/kg	4,184	=	0,9993314	1,798797
kcal(IT)/kg	4,1868	1,000669	=	1,8
Btu/lb(m)	2,326	0,5559273	0,55556	=

Fattori di conversione per l'entropia massica

1↓ = →	kJ/kg K	kcal/kg K	kcal(IT)/kg K	Btu/lb(m) °F
kJ/kg K	=	0,239	0,2388459	0,2388459
kcal/kg K	4,184	=	0,9993314	0,9993314
kcal(IT)/kg K	4,1868	1,0006692	=	1
Btu/lb(m) °F	4,1868	1,0006692	1	=

Fattori di conversione per il volume massico

1↓ = →	m ³ /kg	ft ³ /lb(m)
m ³ /kg	=	16,018463
ft ³ /lb(m)	0,06242796	=

Fattori di conversione per la differenza di temperatura

1↓ = →	K	°C	°R	°F
K	=	1	9/5	9/5
°C	1	=	9/5	9/5
°R	5/9	5/9	=	1
°F	5/9	5/9	1	=

Le relazioni tra le temperature espresse nelle diverse unità di misura sono le seguenti:

$$\theta_{\circ C} = \frac{5}{9}(\theta_{\circ F} - 32) \quad T_K = \theta_{\circ C} + 273,15 \quad T_{\circ R} = \theta_{\circ F} + 459,67$$

$$T_K = \frac{5}{9} T_{\circ R} \quad \theta_{\circ C} = \frac{5}{9} T_{\circ R} - 273,15 \quad \theta_{\circ F} = \frac{9}{5} T_K - 459,67$$

$\theta_{\circ C}$ temperatura espressa in gradi Celsius;

$\theta_{\circ F}$ temperatura espressa in gradi Fahrenheit;

T_K temperatura espressa in kelvin;

$T_{\circ R}$ temperatura espressa in gradi Rankine.

Fattori di conversione per la concentrazione in volume (volume/volume)

1↓ = →	ppm	cm ³ /m ³	L/m ³	m ³ /m ³
ppm	=	1	10 ⁻³	10 ⁻⁶

Fattori di conversione per la concentrazione in massa (massa/massa)

1↓ = →	ppm	mg/kg	g/kg	kg/kg
ppm	=	1	10 ⁻³	10 ⁻⁶

COSTANTI DIMENSIONALI

$N_A = 6,02283 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ numero di Avogadro (6,02293 ± 0,00016)
 $h = 6,6242 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ costante di Plank (6,62517 ± 0,00023)
 $c = 2,99776 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ velocità della luce nel vuoto (2,997925 ± 0,000003)
 $\tilde{v}_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ volume molare del gas perfetto a 0 °C e 101325 Pa (22,4139 ± 0,006)

Costante universale dei gas

$\tilde{R} = 0,08206 \text{ L atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $\tilde{R} = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (8,31445 ± 0,00034)
 $\tilde{R} = 8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (8,31445 ± 0,00034)

Costante di Faraday

$F = 96485,3 \text{ J / V g-equiv.} = 96485,3 \text{ C / g-equiv.}$
 $F = 96501,2 \text{ J}_{\text{int}} / \text{V}_{\text{int}} \text{ g-equiv.} = 96501,2 \text{ C}_{\text{int}} / \text{g-equiv.}$
 $F = 23060,5 \text{ kcal / V kg-equiv.}$
 $F = 23068,1 \text{ kcal / V}_{\text{int}} \text{ kg-equiv.}$

Carica dell'elettrone

$e^- = 1,60199 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Fattori di conversione

1 eV = 1,60199 · 10⁻¹⁹ J elettron-volt assoluto
 1 eV_{int} = 1,60252 · 10⁻¹⁹ J elettron-volt internazionale

1 eV / molecola = 96485,3 kJ / kmol = 23060,5 kcal / kmol
 1 eV_{int} / molecola = 96501,2 kJ_{int} / kmol = 23068,1 kcal / kmol

IL SISTEMA INTERNAZIONALE DI UNITÀ

D.P.R. 12 agosto 1982, n. 802.

**Attuazione della direttiva (CEE) n. 80/181
relativa alle unità di misura.**

Pubblicato nel Suppl. Ord. alla Gazz. Uff. 3 novembre 1982, n. 302.

Quanto segue è stato estratto dall'ALLEGATO al DPR suddettoCAPITOLO I
UNITA' DI MISURA LEGALI
DISCIPLINATE DALL'ART. 1, COMMA PRIMO

1. UNITÀ SI, LORO MULTIPLI E SOTTOMULTIPLI DECIMALI.

1.1. Unità SI di base.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>	
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>
Lunghezza	metro	m
Massa	kilogrammo	kg
Tempo	secondo	s
Intensità di corrente elettrica	ampere	A
Temperatura termodinamica	kelvin	K
Quantità di sostanza	mole	mol
Intensità luminosa	candela	cd

1.1.1. Nome e simbolo speciali dell'unità SI di temperatura nel caso della temperatura Celsius.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>	
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>
Temperatura Celsius	grado Celsius	°C

La temperatura Celsius t è definita dalla differenza $t = T - T_0$ tra due temperature termodinamiche T e T_0 con $T_0 = 273,15$ kelvin. Un intervallo o una differenza di temperatura possono essere espressi in kelvin o in gradi Celsius. L'unità "grado Celsius" è uguale all'unità "kelvin".

1.2. Altre unità SI.

1.2.1. Unità supplementari SI.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>	
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>
Angolo piano	radiante	rad
Angolo solido	steradiane	sr

1.2.2. Unità derivate SI.

1.2.3. Unità derivate SI che hanno nomi e simboli speciali.

(Sono riportate soltanto alcune delle 18 grandezze elencate nella tabella dell'Allegato).

Grandezza	Unità		Espressione	
	Nome	Simbolo	in altre unità SI	in unità SI di base o supplementari
Frequenza	hertz	Hz	-	s ⁻¹
Forza	newton	N	-	m kg s ⁻²
Pressione e tensione	pascal	Pa	N m ⁻²	m ⁻¹ kg s ⁻²
Energia, lavoro, quantità di calore	joule	J	N m	m ² kg s ⁻²
Potenza (1), flusso energetico	watt	W	J s ⁻¹	m ² kg s ⁻³
Quantità di elettricità, carica elettrica	coulomb	C	-	s A
Tensione elettrica, potenziale elettrico, forza elettromotrice	volt	V	W A ⁻¹	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
Resistenza elettrica	ohm	Ω	V A ⁻¹	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
Conduttanza	siemens	S	A V ⁻¹	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
Capacità elettrica	farad	F	C V ⁻¹	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
Flusso d'induzione magnetica	weber	Wb	V s	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
Induzione magnetica	tesla	T	Wb m ⁻²	kg s ⁻² A ⁻¹
Induttanza	henry	H	Wb A ⁻¹	m ² kg s ⁻² A ⁻²
Flusso luminoso	lumen	lm	-	cd sr
Illuminamento	lux	lx	lm m ⁻²	m ⁻² cd sr

(1) Nomi speciali dell'unità di potenza: il nome "voltampere", simbolo "VA", per esprimere la potenza apparente della corrente alternata e il nome "var", simbolo "var", per esprimere la potenza elettrica reattiva. Il nome "var" non è incluso in risoluzioni della CGPM.

1.3. Prefissi e loro simboli che servono a designare taluni multipli e sottomultipli decimali.

Fattore	Prefisso	Simbolo	Fattore	Prefisso	Simbolo
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹	deci	d
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻²	centi	c
10 ¹²	tera	T	10 ⁻³	milli	m
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁹	nano	n
10 ³	kilo	k	10 ⁻¹²	pico	p
10 ²	etto	h	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹	deca	da	10 ⁻¹⁸	atto	a

I nomi ed i simboli dei multipli e sottomultipli decimali dell'unità di massa vengono formati mediante l'aggiunta dei prefissi alla parola "grammo" e dei loro simboli al simbolo "g".

Per designare alcuni multipli e sottomultipli decimali di un'unità derivata la cui espressione si presenta sotto forma di una frazione, un prefisso può essere legato indifferentemente alle unità che figurano al numeratore, al denominatore o in entrambi.

Sono vietati i prefissi composti, cioè formati mediante giustapposizione di più prefissi di cui sopra.

1.4. Nomi e simboli speciali autorizzati di multipli e sottomultipli decimali di unità SI.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>		
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Relazione</i>
Volume	litro	l o L (1)	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
Massa	tonnellata	t	$1 \text{ t} = 1 \text{ Mg} = 10^3 \text{ kg}$
Pressione e tensione	bar	bar (2)	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

(1) Per l'unità litro possono essere utilizzati i due simboli "l" e "L". (16° CGPM 1979, ris. 6).

(2) Unità che, nell'opuscolo dell'Ufficio internazionale dei pesi e misure, è compresa tra le unità ammesse temporaneamente.

2. UNITÀ DEFINITE IN BASE ALLE UNITÀ SI, MA CHE NON SONO MULTIPLI O SOTTOMULTIPLI DECIMALI DI QUESTE.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>		
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Relazione</i>
Angolo piano	angolo giro (*) (1) (a)	-	$1 \text{ angolo giro} = 2 \pi \text{ rad}$
	grado centesimale (*) oppure gon (*)	gon (*)	$1 \text{ gon} = \pi / 200 \text{ rad}$
	grado sessagesimale	°	$1^\circ = \pi / 180 \text{ rad}$
	minuto d'angolo	'	$1' = \pi / 10.800 \text{ rad}$
	secondo d'angolo	"	$1'' = \pi / 648.000 \text{ rad}$
Tempo	minuto	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	ora	h	$1 \text{ h} = 3.600 \text{ s}$
	giorno	d	$1 \text{ d} = 86.400 \text{ s}$

(1) Il segno (*) dopo un nome o un simbolo di unità ricorda che questi non figurano negli elenchi compilati dalla CGPM, dalla CIPM e dal BIPM. Questa osservazione si applica al presente allegato nel suo complesso.

(a) Non esiste un simbolo internazionale.

3. UNITÀ DEFINITE INDIPENDENTEMENTE DALLE SETTE UNITÀ SI DI BASE.

L'unità di massa atomica è pari a 1/12 della massa di un atomo del nuclide ^{12}C .

L'elettronvolt è l'energia cinetica acquisita da un elettrone che passa nel vuoto da un punto ad un altro che abbia un potenziale superiore di 1 volt.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>		
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Massa	unità di massa atomica	u	$1 \text{ u} \approx 1,660 \ 565 \ 5 \ 10^{-27} \text{ kg}$
Energia	elettronvolt	eV	$1 \text{ eV} \approx 1,602 \ 189 \ 2 \ 10^{-19} \text{ J}$

4. UNITÀ E NOMI DI UNITÀ AMMESSI UNICAMENTE IN SETTORI DI APPLICAZIONE SPECIALIZZATI.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>		
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Vergenza dei sistemi ottici	diottria (*)	-	1 diottria = 1 m ⁻²
Massa delle pietre preziose	carato metrico	-	1 carato metrico = 2 10 ⁻⁴ kg
Area delle superfici agrarie e dei fondi	ara	a	1 a = 10 ² m ²
Massa lineica delle fibre tessili e dei filati	tex (*)	tex (*)	1 tex = 10 ⁻⁶ kg m ⁻¹
Pressione sanguigna e pressione degli altri liquidi organici	millimetro di mercurio	mm Hg (*)	1 mm Hg = 133,322 Pa
Sezione efficace	<i>barn</i>	b	1 b = 10 ⁻²⁸ m ²

Avvertenza: I prefissi ed i loro simboli di cui al punto 1.3 si applicano alle unità ed ai simboli di cui sopra, ad eccezione del millimetro di mercurio e del suo simbolo. Il multiplo 10²a è tuttavia denominato "ettaro".

5. UNITÀ COMPOSTE.

Combinando le unità di cui al capitolo I si costituiscono unità composte.

CAPITOLO II

UNITA' DI MISURA LEGALI DISCIPLINATE DALL'ART. 1, COMMA SECONDO

GRANDEZZE, NOMI DI UNITÀ, SIMBOLI E VALORI.

<i>Grandezza</i>	<i>Unità</i>		
	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Angolo piano	-	° (*) (1)	1° = $\pi / 200$ rad
Attività di radionuclidi	curie	Ci	1 Ci = 3,7 10 ¹⁰ Bq
Dose assorbita	rad	rad (2)	1 rad = 10 ⁻² Gy
Equivalente di dose	rem (*)	rem (*)	1 rem = 10 ⁻² Sv
Esposizione (ai raggi x o γ)	röntgen	R	1 R = 2,58 10 ⁻⁴ C kg ⁻¹
Viscosità dinamica	poise	P	1 P = 10 ⁻¹ Pa s
Viscosità cinematica	stokes	St	1 St = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹

(1) Simbolo del "grado centesimale". Il secondo comma dell'art. 1 si applica al simbolo ° e non al grado centesimale.

(2) Quando il nome rad può generare confusione con il simbolo del radiante, si può utilizzare rd come simbolo del rad.

Art. 1.

Le unità di misura legali da utilizzare per esprimere grandezze sono quelle riportate nel capitolo I dell'allegato al presente decreto.

Sono ritenute legali fino al 31 dicembre 1985 le unità di misura destinate ad esprimere grandezze riportate nel capitolo II dell'allegato al presente decreto.

Per indicare le unità di misura di cui ai commi precedenti si devono usare esclusivamente le denominazioni, le definizioni e i simboli previsti nell'allegato.

ANALISI DIMENSIONALE

Le grandezze fisiche in gioco nelle scienze applicate sono spesso tali che la loro misura può essere espressa da numeri diversi secondo le unità di misura impiegate: tali grandezze sono dette dimensionali. Per avere la completa caratterizzazione di una grandezza dimensionale occorre quindi conoscerne la misura, le dimensioni, nonché le unità di misura in cui tali dimensioni sono espresse.

A fronte della suddetta complicazione, le grandezze fisiche dimensionali possono giovare degli strumenti messi a disposizione dall'analisi dimensionale.

L'analisi dimensionale si basa sul **principio di omogeneità dimensionale**, il quale afferma che: **"i due membri di una stessa equazione fisica devono essere dimensionalmente omogenei"**.

Alla luce di tale principio, nasce una condizione necessaria, anche se non sufficiente, affinché una qualsiasi relazione fisica sia corretta.

IL METODO DI RAYLEIGH

Sull'imposizione che sia rispettata la suddetta condizione si basa il *metodo di Rayleigh*, utile per tradurre in forma analitica un dato fenomeno fisico sul quale si stiano effettuando degli studi e dei rilievi sperimentali.

IL TEOREMA π DI BUCKINGHAM

Lo studio, la sperimentazione e la rappresentazione delle dipendenze funzionali di più variabili trae beneficio dal raggruppamento delle variabili stesse.

Un tale comportamento presenta il vantaggio di ridurre il numero delle variabili indipendenti, ma questo non è l'unico vantaggio. Ad esempio, nella tecnica è impiegata la grandezza "viscosità cinematica" ν , rapporto tra la viscosità dinamica μ e la massa volumica ρ di un fluido; questo è un raggruppamento di variabili che non soltanto riduce il numero delle variabili da due ad una, ma che inoltre realizza il passaggio da grandezze dinamiche (che coinvolgono le dimensioni L, M e T) ad una grandezza cinematica (che coinvolge le dimensioni L e T). Anche il consumo "specifico" di combustibile di un impianto termico motore, rapporto tra la massa di combustibile consumata e l'energia erogata, deriva da un raggruppamento di variabili, così come tutte le altre grandezze che tradizionalmente sono definite "specifiche", nonché i rendimenti ed i vari coefficienti di prestazione.

Nel determinare i suddetti raggruppamenti si preferisce operare in modo tale da conferire ad essi una forma adimensionale.

Quello che segue è l'enunciato del noto *teorema π di Buckingham*.

Se una grandezza dimensionale A può essere espressa in funzione di n altre grandezze dimensionali x_i di cui m (che costituiscono il cosiddetto "set ricorrente") sono dimensionalmente indipendenti, allora tale relazione può essere ridotta ad una relazione tra la grandezza A resa adimensionale e le $n-m$ rimanenti grandezze rese anch'esse adimensionali. Sia A che le $n-m$ grandezze suddette sono rese adimensionali mediante opportune combinazioni con il set ricorrente.

In generale, se d è il numero di dimensioni diverse, e quindi anche di unità di misura fondamentali, necessarie per esprimere le n grandezze x_i il numero $n-m$ di gruppi adimensionali π_i è pari a $n-d$.

Corollario di tale teorema è che ogni gruppo adimensionale può essere composto al massimo da $d+1$ grandezze (nel caso della meccanica da 4 grandezze). E' evidente inoltre che per avere una possibile soluzione significativa al problema dell'adimensionalizzazione, deve essere $n > d$.

Data per dimostrata la possibilità di esprimere le relazioni fisiche mediante gruppi adimensionali, risulta evidente l'utilità di una tale procedura nello studio di fenomeni meccanici in cui siano coinvolte più di tre grandezze fisiche e nello studio di fenomeni termomeccanici o elettromeccanici in cui siano coinvolte più di quattro grandezze fisiche; nei casi suddetti, i gruppi adimensionali influenti sono in numero pari al numero di grandezze coinvolte diminuito di tre o di quattro, rispettivamente.

Nell'applicazione del procedimento d'analisi illustrato, particolarmente utile per lo studio dei fenomeni dipendenti da molte variabili, la scelta delle grandezze che costituiscono il set ricorrente è del tutto arbitraria (purché esse siano dimensionalmente indipendenti) e da ciò deriva spesso l'esistenza di un gran numero di possibili gruppi adimensionali, per cui la determinazione della soluzione più conveniente richiede esperienza e vari tentativi. Esiste oggi un gran numero di gruppi adimensionali unificati, che consentono un linguaggio comune agli studiosi di ogni settore della tecnica.

Un esempio

A titolo di esempio si consideri la ricerca della funzione che esprime la perdita di pressione distribuita di un fluido che scorre in un condotto a sezione circolare.

Le grandezze fisiche che hanno influenza sul fenomeno studiato sono

ΔP	perdita di pressione
d	diametro interno della tubazione
l	lunghezza della tubazione
u	velocità media del fluido nella tubazione
ε	rugosità relativa della superficie interna della tubazione, dato dal rapporto tra l'altezza media delle asperità superficiali e ed il diametro interno della tubazione d
μ	viscosità dinamica del fluido
ρ	massa volumica del fluido

La funzione di cui stiamo trattando è quindi del tipo

$$f(\Delta P, d, l, u, \varepsilon, \mu, \rho) = 0$$

nella quale figurano sette grandezze fisiche di tipo meccanico, dimensionalmente esprimibili mediante tre unità fondamentali le cui dimensioni sono, ad esempio, L , M e T .

Esplicitando dalla relazione precedente le perdite di pressione per unità di lunghezza si ha

$$\Delta P/l = f(d, u, \rho, \mu, \varepsilon)$$

Poiché tra le $n = 5$ grandezze x_i se ne possono individuare $m = 3$ dimensionalmente indipendenti (numero massimo possibile), il teorema π di Buckingham afferma che il fenomeno può essere interpretato mediante $5-3 = 2$ gruppi adimensionali π_i da una relazione del tipo $\pi = f(\pi_1, \pi_2)$

Per definire i gruppi adimensionali, occorre fissare un set ricorrente costituito da tre grandezze. Tale scelta è arbitraria, purché le tre grandezze siano dimensionalmente indipendenti, ed è da essa che dipende l'individuazione di gruppi adimensionali più o meno significativi; ciò può richiedere molti tentativi per giungere alla soluzione più opportuna. Come criterio generale è da notare che, poiché il set ricorrente è costituito da grandezze che possono figurare in più di un gruppo adimensionale π , può risultare più opportuno non inserire nel set ricorrente quelle grandezze le cui influenze reciproche sono di maggiore interesse; essendo preferibile che ciascuna di queste ultime figuri in un solo gruppo adimensionale. Nel caso in esame, essendo di principale interesse l'influenza di μ ed ε su $\Delta P/l$ è conveniente scegliere formare il set ricorrente con le grandezze, dimensionalmente indipendenti, d , u , ρ .

Assumendo come unità fondamentali quelle di lunghezza, massa e tempo, ossia scegliendo le dimensioni L , M , e T (proprie, tra gli altri, del Sistema Internazionale di unità) si ha

$$[\Delta P/l] = L^{-2} M^1 T^{-2}$$

$$[d] = L^1 M^0 T^0$$

$$[u] = L^1 M^0 T^{-1}$$

$$[\rho] = L^{-3} M^1 T^0$$

$$[\mu] = L^{-1} M^1 T^{-1}$$

$$[\varepsilon] = L^0 M^0 T^0$$

ed i gruppi adimensionali sono

A) quello che deriva dal rendere adimensionale $\Delta P/l$

$$\pi = \frac{\Delta P/l}{d^{-1} u^2 \rho^1} = \frac{\Delta P d}{l \rho u^2}$$

B) quello che deriva dal rendere adimensionale μ

$$\pi_1 = \frac{\mu}{d u \rho} = \frac{\nu}{d u}$$

che è il reciproco del numero di Reynolds e quindi

$$\pi_1 = N_{Re}^{-1}$$

C) quello che deriva dal rendere adimensionale ε

$$\pi_2 = \frac{\varepsilon}{d^0 u^0 \rho^0} = \varepsilon$$

il terzo gruppo adimensionale coincide con la rugosità relativa, l'unica grandezza adimensionale delle sette

di partenza. In generale si può dire che se tra le grandezze che influiscono sul fenomeno ve ne sono alcune adimensionali, queste costituiscono direttamente altrettanti gruppi adimensionali tra quelli cercati.

Per il teorema π di Buckingham, la funzione in esame può essere espressa nella forma

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2)$$

più semplice di quella di partenza, anche ai fini delle rappresentazioni grafiche, in quanto il numero di variabili è sensibilmente ridotto e queste sono inoltre adimensionali.

Sostituendo nella precedente relazione le espressioni dei tre gruppi adimensionali si ha

$$\frac{\Delta P d}{l \rho u^2} = f(N_{Re}^{-1}, \varepsilon) = f(N_{Re}, \varepsilon) \quad \text{indicando } f \text{ una generica funzione non meglio precisata.}$$

Volendo esplicitando la caduta di pressione, resa adimensionale, si può scrivere

$$\frac{\Delta P}{\rho u^2} = \frac{l}{d} \cdot f(N_{Re}, \varepsilon)$$

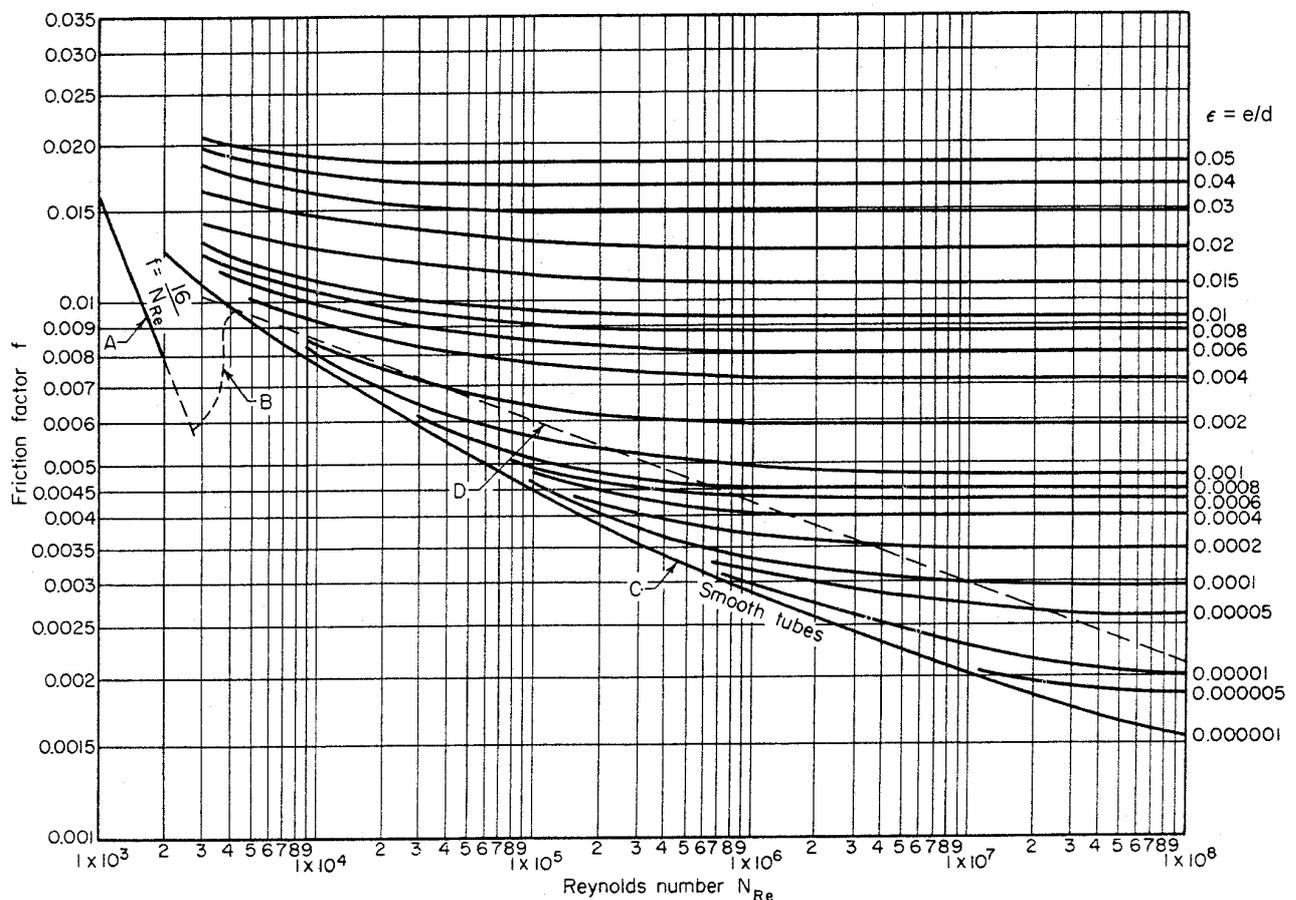
E infine la caduta di pressione è

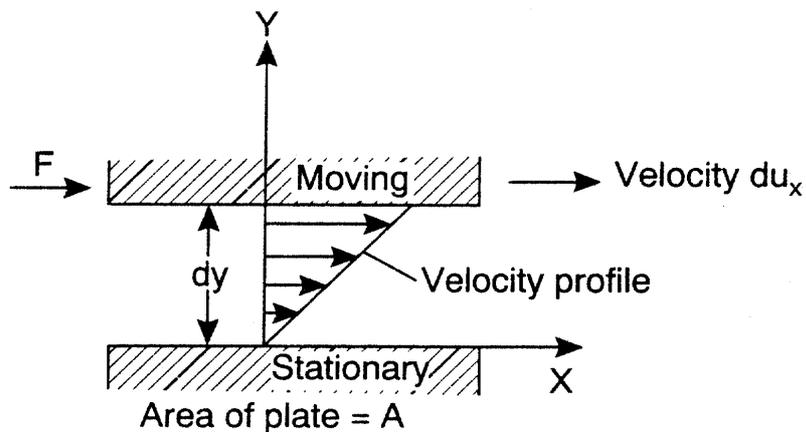
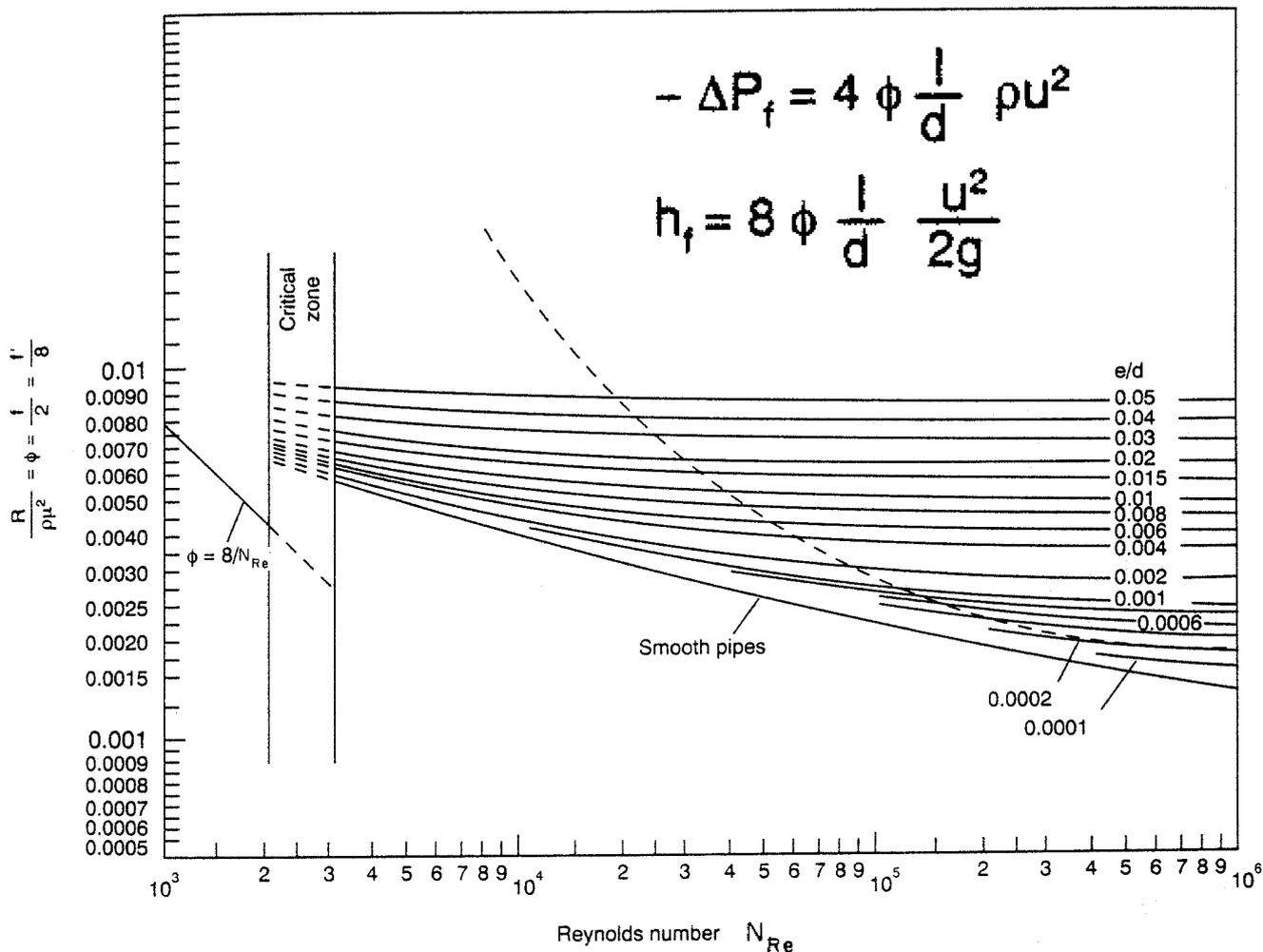
$$\Delta P = \frac{l}{d} \rho u^2 \cdot f(N_{Re}, \varepsilon)$$

dove la funzione del numero di Reynolds e della rugosità relativa (che viene qui indicata con k) ha la rappresentazione grafica detta, per la sua forma, arpa di Nikuradse, o anche diagramma di Stanton (e Pannell) con $k = 4 \phi$, oppure di Moody, con $k = f'/2$, oppure di Fanning (e Darcy), con $k = 2f$.

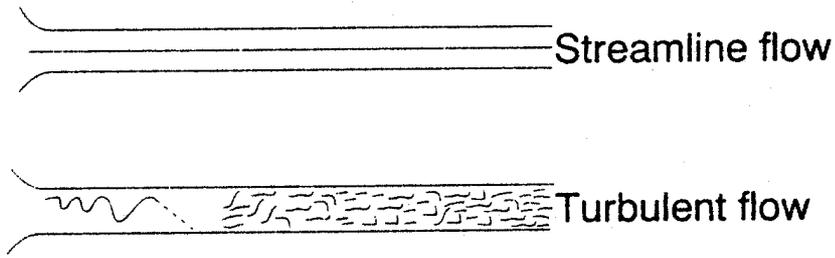
La caduta di pressione è quindi espressa, in modulo e segno, dalla relazione

$$-\Delta P = k \frac{l}{d} \rho u^2$$

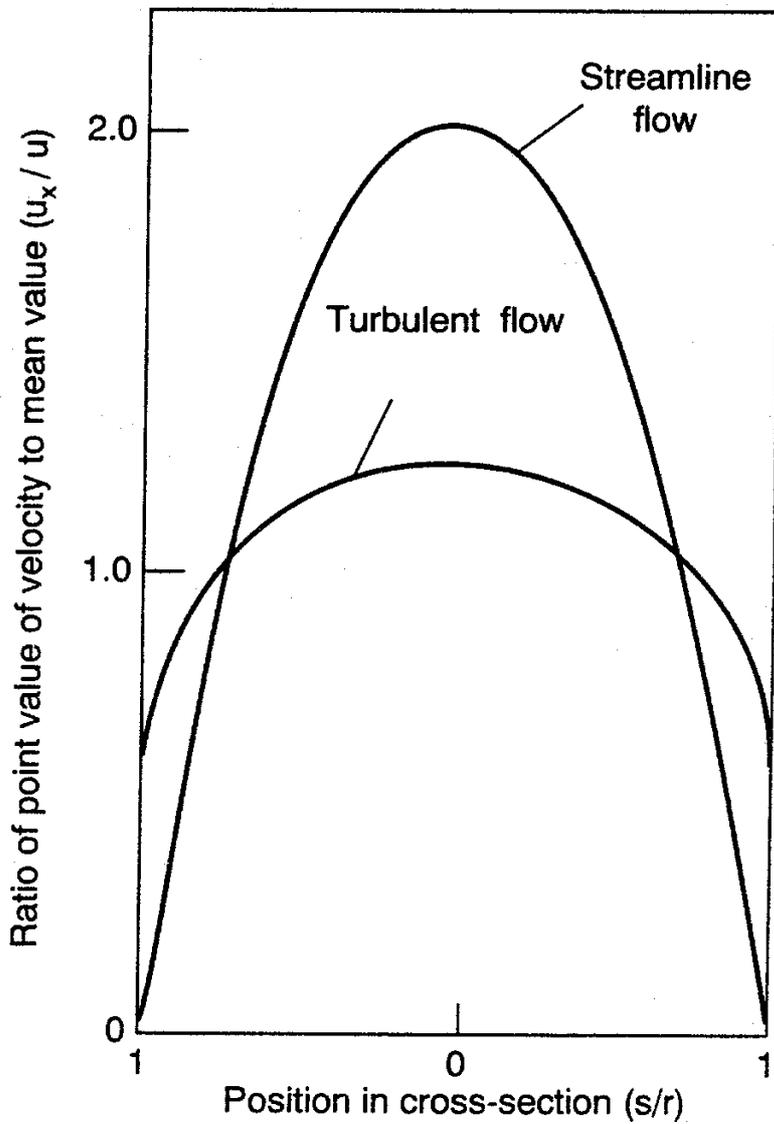




Shear stress and velocity gradient in a fluid



Break-up of laminar thread in Reynolds' experiment



Shape of velocity profiles for streamline and turbulent flow

ENERGIA

Energia è una parola che esisteva già nella lingua greca antica ($\epsilon\nu \epsilon\rho\gamma\omicron\nu$) e che in inglese (energy) compare nel 17° secolo.

CLASSIFICAZIONE DELL'ENERGIA

L'energia è classificata, in base alla sua natura, in **energia meccanica**, che si manifesta in vari aspetti tra i quali

- l'energia cinetica
- l'energia potenziale (gravitazionale)
- l'energia elastica

energia termica (calore)

energia elettrica

energia chimica

energia nucleare

ecc.

Energia e lavoro

Il *lavoro* compiuto da una forza, quando il punto d'applicazione di questa effettua uno spostamento, è dato dalla forza moltiplicata per la componente dello spostamento nella direzione della forza stessa.

L'*energia*, che in parte o in tutto può trasformarsi in lavoro, ha le dimensioni di quest'ultimo, ossia quelle di una forza per uno spostamento (come si ottiene immediatamente facendo riferimento all'energia potenziale), ed anche quelle di una massa per il quadrato della velocità (come si ha, in modo diretto, facendo riferimento all'energia cinetica).

Ne deriva che l'energia (o il lavoro) per unità di forza (e quindi di peso) ha le dimensioni di uno spostamento, ossia di una lunghezza; e che l'energia (o il lavoro) per unità di massa ha le dimensioni di una velocità al quadrato.

L'energia meccanica

Scientificamente il concetto di energia emerse in fisica nel settore della meccanica. Già nel 17° secolo l'osservazione del pendolo mostrò che quello che allora si prese a chiamare energia meccanica si manifestava in almeno due aspetti

- l'energia cinetica o di velocità (indicata da fisici e ingegneri anche con l'appellativo, più immaginifico che rigoroso, di "forza viva") legata alla velocità di una massa rispetto ad un sistema di riferimento
- l'energia potenziale o di posizione, legata alla posizione di una massa rispetto ad un piano orizzontale di riferimento, entro il campo gravitazionale terrestre (per questo detta anche energia gravitazionale)

Quest'ultima, come dice il suo nome, non è energia in atto, non dà manifestazioni, tuttavia esiste.

Dal punto di vista dei rischi per l'incolumità umana, la prima deve essere scansata e la seconda deve essere temuta. Si può esser certi che sotto questo aspetto il concetto di energia potenziale, pur essendo relativamente moderno, è stato fatto proprio dall'uomo sin dai primordi, almeno a livello istintivo.

CENNI STORICI

DAGLI ALBORI

L'energia di cui l'uomo poteva disporre dal suo apparire sulla terra era quella derivante dalla sua modesta **potenza muscolare**, dell'ordine di 0,05 kW (50 W), che poteva essere utilizzata soltanto per periodi di tempo limitati nell'arco della giornata.

Fino a meno di tre secoli or sono (18° secolo), l'**energia termica** di cui l'uomo disponeva già fin dagli albori della storia, grazie alla combustione di sostanze vegetali, poteva soltanto permettere condizioni di vita meno dure, attraverso il riscaldamento degli ambienti e dei cibi ovvero attraverso la costruzione di più efficaci strumenti per il lavoro, per la caccia e per la guerra (tecniche metallurgiche).

Soltanto l'energia muscolare degli **animali** poteva essere presa in considerazione per ottenere energia meccanica in quantità maggiore di quella erogabile dall'uomo, ma ad una sua vasta utilizzazione si opponeva la difficoltà di un razionale coordinamento dell'azione di grandi numeri di animali. Al contrario, molto più semplice era l'organizzazione del lavoro di grandi numeri di uomini, e quindi, nonostante la bassa

potenza erogabile da ogni individuo, il coordinamento dell'azione di decine di migliaia di uomini permise fin dai tempi antichi l'utilizzazione di energia meccanica in quantità sufficiente a realizzazioni di notevole importanza storica e sociale.

Oltre a tutte quelle opere connesse allo sviluppo dell'**agricoltura** (canalizzazioni, depositi idrici, ecc.) e allo sviluppo delle **comunicazioni** (strade, porti, ecc.), esempi eloquenti del risultato di un'organizzazione razionale dell'attività di un grandissimo numero di individui rimangono opere di fondamentale interesse storico, quali l'esecuzione di costruzioni gigantesche come le **Piramidi d'Egitto e del Messico**, la **Grande Muraglia Cinese**, gli innumerevoli **castelli e fortificazioni** disseminati da secoli in tutti i continenti.

E non si pensi superata del tutto ai giorni nostri l'utilizzazione di grandi quantità di energia muscolare umana, non sono infatti trascorsi che pochi decenni dalla realizzazione di imponenti **dighe** che, pure costruite per convertire l'energia idraulica in energia meccanica mediante macchine motrici di avanzata concezione tecnica, sono state portate a termine soltanto grazie all'impiego di decine di migliaia di uomini che hanno sostituito con la loro forza le macchine. E questo in Paesi come la **Cina** e l'**India**, che, pur capaci di realizzazioni tecniche anche molto avanzate, non dispongono ancora, a causa delle vicissitudini storiche da essi attraversate, di una quantità di energia sufficiente a far fronte a tutte le esigenze.

L'ETÀ DI MEZZO

Solamente dal **X secolo d. C.**, con una utilizzazione più sistematica dell'energia muscolare degli animali, il lavoro umano cominciò ad essere più limitato; a ciò collaborava anche lo sviluppo, sia pure modesto, dell'utilizzazione dell'energia idraulica (con embrionali **ruote a pale**) e dell'energia eolica (con i primi **mulini a vento**).

Tuttavia si può affermare che l'entità dell'energia così disponibile a lato dell'energia muscolare umana era sempre una piccola quota parte di tutta l'energia utilizzata. Di conseguenza la disponibilità **pro-capite** di energia rimaneva di fatto dello stesso ordine di grandezza di quella muscolare del singolo individuo.

In definitiva, **dal punto di vista energetico** ben poco era mutato nei Paesi a più avanzata civiltà: dalla società faraonica egizia del 2500 a. C., ai regni europei più evoluti del 1600 d. C. (XVII secolo), per oltre 40 secoli la disponibilità **pro-capite** di energia era rimasta fondamentalmente la stessa.

Fino al XVII secolo, in effetti, i **combustibili naturali**, dalla legna al carbone e anche, sia pure in forma limitatissima e localizzata, al petrolio, erano usati essenzialmente per il **riscaldamento** e, in maniera sempre più accentuata grazie alle sempre maggiori esigenze, per le **officine metallurgiche**. Ma ciò non incideva sensibilmente sulla disponibilità di energia meccanica, anche se l'invenzione di attrezzature meccaniche man mano più evolute facilitava l'utilizzazione dell'energia muscolare, sia umana che animale.

LA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

Il secolo XVIII costituisce indubbiamente il periodo storico che ha avviato le società umane più organizzate sulla strada di un progresso in rapida ascesa. Quale fattore determinante del cambiamento profondo che ha investito i diversi Paesi si può indicare la raggiunta capacità di utilizzare le **fonti naturali di energia termica** al fine di produrre **energia meccanica**.

La prima macchina **motrice termica, a vapore, alternativa**, preconizzata da PAPIN (1690), realizzata industrialmente da NEWCOMEN (1705-11) e sviluppata in tutte le sue parti essenziali da WATT a partire dal 1769, rivoluzionò effettivamente la situazione energetica dei Paesi progrediti, realizzando una **maggiore uguaglianza tra gli uomini ed una sempre maggiore differenziazione tra le Società**. Ciò essenzialmente per tre motivi

- perché per la prima volta nella storia dell'uomo erano disponibili potenze di un ordine di grandezza nettamente superiore a quello delle potenze fino allora utilizzabili,
- inoltre per la possibilità di utilizzazione di queste potenze per periodi del tutto indipendenti dalle capacità fisiche di uomini e di animali,
- infine per l'indipendenza, entro limiti fino allora impensabili, del nuovo metodo di produzione di energia da fattori naturali, a differenza di quanto avveniva per gli impianti idraulici già da tempo sviluppati, sia pure in forma elementare.

IL DECOLLO ENERGETICO

Il secolo XIX può ritenersi il secolo del **"decollo energetico"** dell'umanità. Eventi connessi ad una sempre maggiore produzione di grandi quantità di energia meccanica si susseguono in questo secolo con ritmo incalzante.

Macchina motrice a vapore

Per la **macchina motrice a vapore**, mentre nel 1880-90 la macchina **alternativa** di WATT raggiungeva caratteristiche funzionali di alta efficienza, nel 1883 DE LAVAL in Svezia e nel 1884 PARSONS in Inghilterra realizzavano le prime **turbine a vapore**, che costituiscono la forma ancora oggi più avanzata di macchina motrice a vapore.

Motore alternativo a combustione interna

Nel frattempo era realizzata una nuova macchina motrice, che doveva avere nello sviluppo industriale un peso altrettanto grande: il **motore alternativo a combustione interna**. Gli studi ed i tentativi di BROWN (1823), di WRIGHT (1833), di BARNETT (1838), di BARSANTI e MATTEUCCI (1854), trovarono in BEAU DE ROCHAS (1862) un acuto studioso del ciclo termodinamico relativo ad una macchina di tale concezione. La realizzazione vera e propria del primo motore funzionante secondo questo ciclo è dovuta a OTTO (1863), che nel 1876, con la collaborazione di LANGEN, poté mettere a punto il primo motore a quattro tempi industrialmente efficiente. Pochi decenni dopo DAIMLER sviluppava, prendendo le mosse dal motore OTTO, il moderno motore ad accensione comandata (1883) e DIESEL studiava (1893) e realizzava il moderno motore ad accensione per compressione (1897).

Macchina idraulica motrice

Il **forte sviluppo industriale** conseguente all'avvento di tutti questi tipi di macchine motrici, portò alla realizzazione di nuove macchine adatte ad uno sfruttamento razionale dell'energia idraulica, che fino allora era utilizzata in maniera ancora primitiva e del tutto empirica, anche se da tempo uno studioso quale EULERO (1707-1783) aveva chiarito in maniera straordinariamente acuta i principi secondo i quali era opportuno far funzionare una **macchina idraulica rotativa**. Così, mentre nel 1824 BOURDIN realizzò la prima **turbina idraulica**, nel 1851 GIRARD costruì la prima turbina idraulica ad alto rendimento (superiore all'80%). SWAIN (1869) e FRANCIS realizzarono la turbina che poi portò il nome di quest'ultimo e che fu introdotta in Europa nel 1890. Nel 1880 in California erano realizzate interessanti installazioni della **turbina PELTON**, che fu presto impiegata in Europa.

IL NOVECENTO

Si può quindi affermare che alla fine del XIX secolo avevano visto la luce quasi tutte le macchine motrici termiche e idrauliche che oggi forniscono l'energia meccanica di cui una comunità moderna ha necessità. Ed in effetti soltanto due nuove macchine motrici, adatte ad elevate produzioni di energia, hanno visto la luce nel XX secolo

- la **turbina idraulica** KAPLAN (1916), avanzato sviluppo delle turbine centripeto-assiali FRANCIS
- la **turbina a gas** (1935-45), in applicazione di concetti esposti da tempo da più di uno studioso (BARBER, 1791; STOLZE, 1872; ecc.).

Ai primi anni del XX secolo il quadro delle macchine motrici era pressoché completo rispetto a quello odierno, ma ben diverso era lo **stadio di sviluppo** che le singole macchine allora presentavano rispetto a quello attuale. Se le concezioni teoriche di base erano allora quasi completamente sviluppate, non altrettanto poteva dirsi per le conoscenze tecniche, da quelle strutturali a quelle metallurgiche, che hanno avuto in questi anni un progresso eccezionale.

Questa prima fase di sviluppo, che consentì la realizzazione di **gruppi motori di notevole potenza**, negli anni '30 incontrò un ostacolo consistente nelle limitate conoscenze teoriche dei fenomeni fisici e chimici dai quali sono interessati i **fluidi** che in questi impianti permettono la trasformazione di energia termica o potenziale in energia meccanica disponibile ad un albero motore.

La seconda metà del secolo

Gli anni '50 e ancor più gli anni '60 presentano uno **sviluppo dei sistemi energetici motori** assolutamente imprevedibile qualche anno addietro. Nei primi anni della decade 1950-60, **gruppi motori a vapore** da 150 MW di potenza costituivano realizzazioni notevoli in Europa, mentre negli Stati Uniti d'America si realizzavano già gruppi con potenze attorno ai 250 MW, nel 1970 gli stessi tipi di macchine hanno raggiunto potenze dell'ordine di 600 MW nell'Europa occidentale, e di oltre 1000 MW in USA e URSS. Le potenze si sono quindi quadruplicate in meno di 20 anni. Gli impianti a vapore, che sono oggi gli impianti motori in grado di raggiungere la massima potenza unitaria, hanno avuto uno sviluppo notevolissimo ed in misura analoga hanno progredito anche tutte le **altre macchine motrici**.

LA SITUAZIONE ENERGETICA

SITUAZIONE ENERGETICA MONDIALE

1 tep = 10^7 kcal	1 tec = $7 \cdot 10^6$ kcal	1 Btu = 0,252 kcal
1 Mtep = 10^{13} kcal	1 Mtec = $7 \cdot 10^{12}$ kcal	1 Quad = 10^{15} Btu = $0,252 \cdot 10^{15}$ kcal = 25,2 Mtep
1 Gtep = 10^{16} kcal	1 Gtec = $7 \cdot 10^{15}$ kcal	1 Q = 10^{18} Btu = $0,252 \cdot 10^{18}$ kcal = 25,2 Gtep

In circa 2000 anni (fino al 1950) sono stati consumati 18 Q di energia (con un valore medio annuo pari quindi a circa 0,009 Q). Negli ultimi 50 anni si è avuto il seguente andamento dei consumi annui di energia:

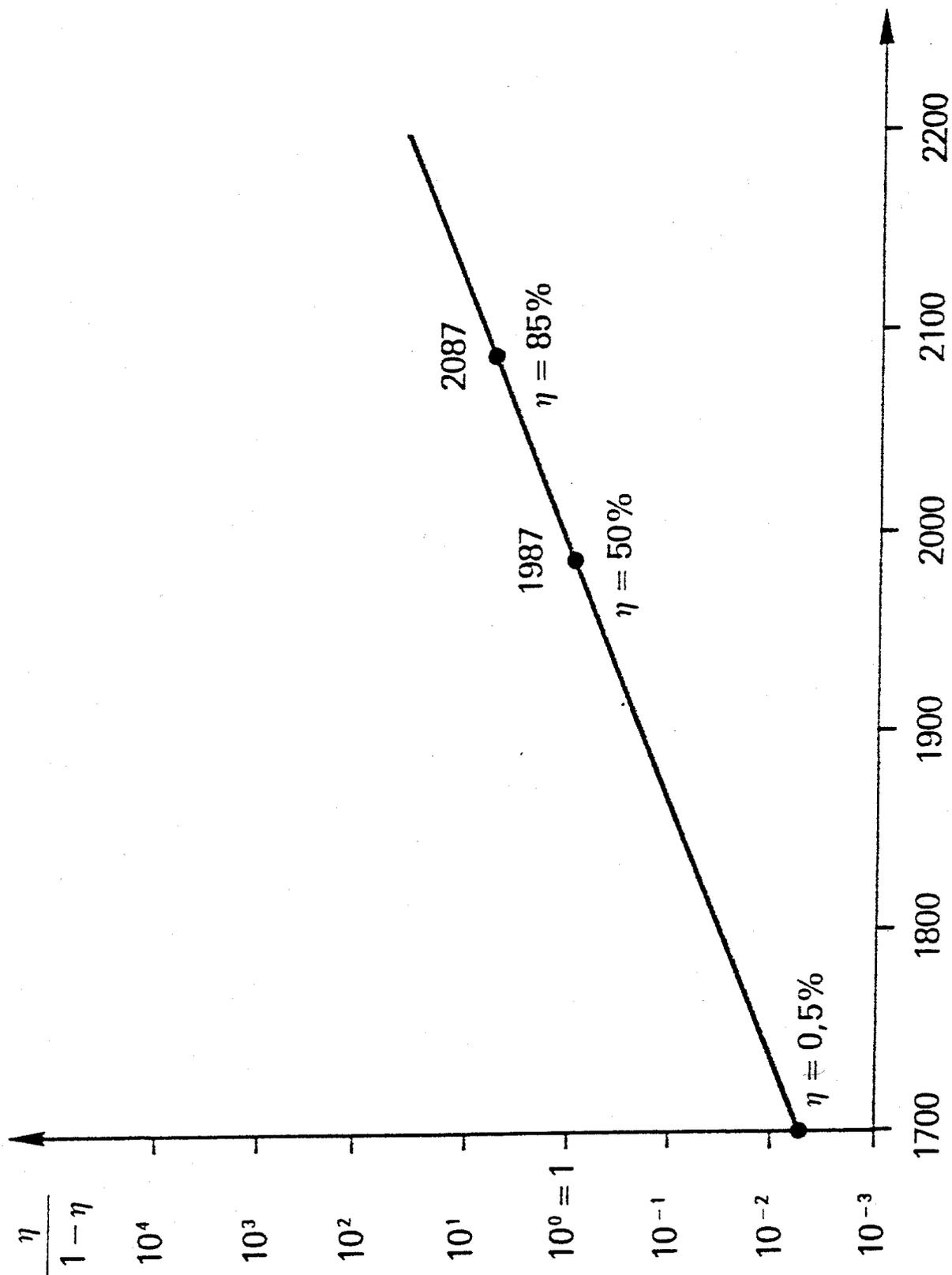
Anno	Energia consumata [Q]
1950	0,0768
1968	0,1897
1985	0,2943
2000	0,3851 (previsione)

Si osservi che al ritmo dei consumi che si sono registrati nell'anno 1985, l'intero ammontare di energia che è stato consumato in 2000 anni sarebbe stato sufficiente a garantire il fabbisogno per circa 61 anni; mentre al ritmo dei consumi previsti per l'anno 2000, esso avrebbe garantito il fabbisogno per circa 47 anni.

	[Q] 1950	[%]	[Q] 1968	[%]	[Q] 1985	[%]	[Q] 2000	[%]
CARBONE	0,0428	55,7	0,0642	33,8	0,0904	30,7	0,1223	31,8
PETROLIO	0,0222	28,9	0,0814	42,9	0,1115	37,9	0,1298	33,7
GAS NATURALE	0,0068	8,9	0,0318	16,8	0,0592	20,1	0,083	21,5
IDRO + NUCLEO	0,005	6,5	0,0123	6,5	0,0332	11,3	0,05	13,0
T O T A L E	0,0768	100,0	0,1897	100,0	0,2943	100,0	0,3851	100,0

SITUAZIONE ENERGETICA ITALIANA

	[Mtep] 1980	[%]	[Mtep] 1985	[%]	[Mtep] 1990	[%]	[Mtep] 2000	[%]
CARBONE	12,6	8,5	15,9	10,9	15,5	9,6	27/31	16,6/17,0
PETROLIO	99,8	67,2	85,4	58,7	92,7	57,7	79/80	48,8/44,0
GAS NATURALE	22,9	15,4	27,2	18,7	39,3	24,5	37/42	22,9/23,1
IDRO + NUCLEO	11,6	7,8	11,8	8,1	8,4	5,2	19/23	11,7/12,6
IMPORTAZIONE	1,5	1,0	5,3	3,6	4,8	3,0	0/6	0,0/3,3
T O T A L E	148,4	100,0	145,6	100,0	160,7	100,0	162/182	100/100



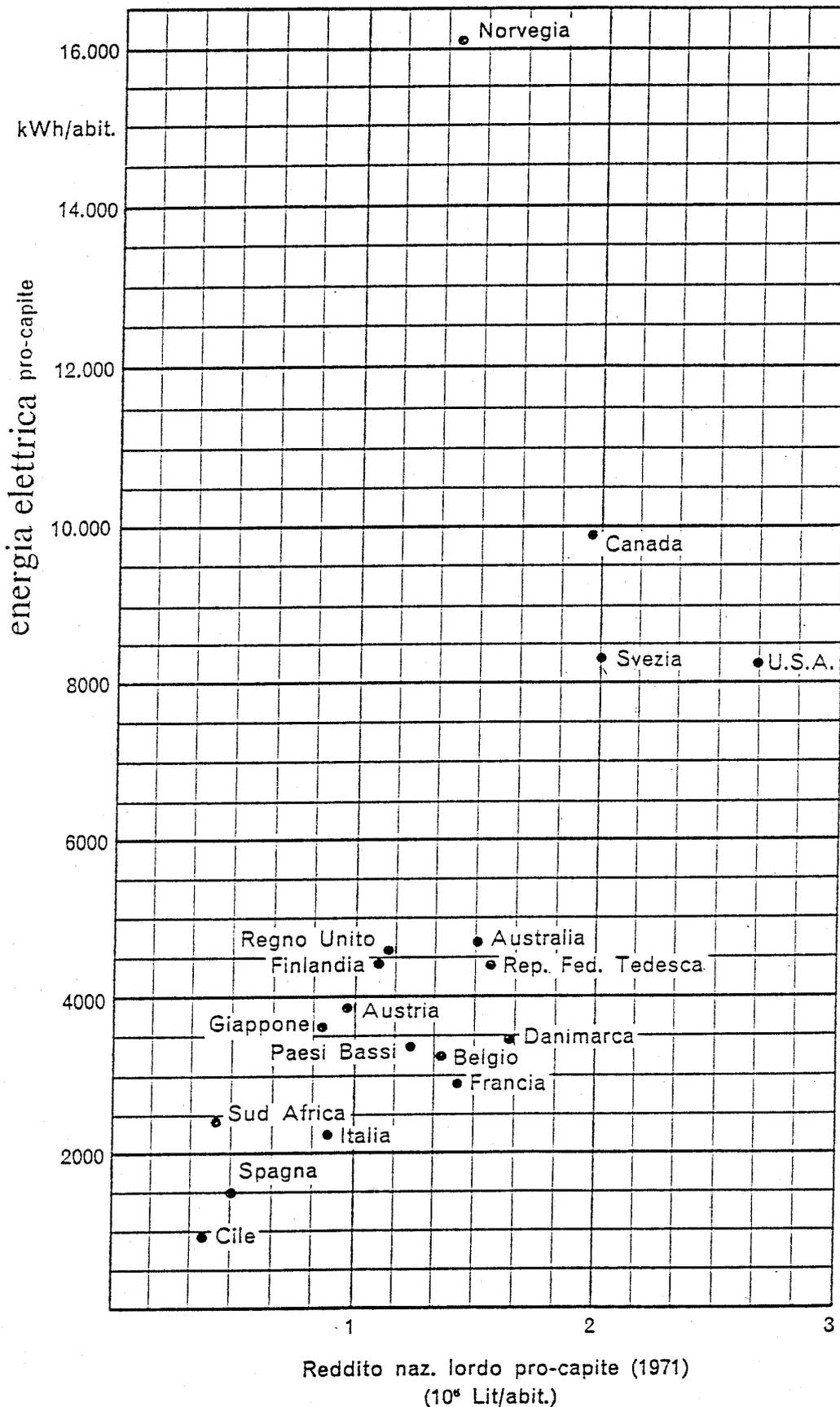
Andamento dell'efficienza termodinamica nel tempo.

Andamento della ripartizione percentuale delle fonti di energia per la produzione di energia meccanica negli USA dal 1850 al 1950.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950
Legno	6	5	2	1	—	—
Carbone	8	25	55	77	67	35
Energia idraulica	7	9	4	3	6	7
Energia eolica	14	6	2	—	—	—
Energia muscolare	65	55	37	12	3	1
Petrolio	—	—	—	5	18	37
Gas naturale	—	—	—	2	6	20

Produzione di energia elettrica in alcuni paesi nell'anno 1973 (elaborazione da Annuario ISTAT, 1975).

	Produzione totale TWh	Popolazione 10 ⁶ abitanti	Produzione pro-capite kWh/abitanti
USA	1947,1	211,44	9.208,8
URSS	914,7	249,75	3.662,5
Giappone	470,8	108,35	4.345,2
Repubblica Federale Tedesca	299,0	61,97	4.824,9
Regno Unito	282,2	55,98	5.041,1
Canada	262,3	22,13	11.852,7
Francia	174,1	52,36	3.325,1
Italia	145,5	55,19	2.636,6
Polonia	84,3	33,60	2.508,9
Svezia	78,1	8,14	9.594,6
Repubblica Democratica Tedesca	76,9	16,98	4.528,9
Spagna	75,8	34,86	2.174,4
Norvegia	72,7	3,97	18.312,3
Sud Africa	64,9	23,72	2.736,1
Australia	64,8	13,13	4.935,3
Unione Indiana	63,1	574,22	109,9
Brasile	61,4	107,71	570,1
Cecoslovacchia	53,5	14,58	3.369,4
Paesi Bassi	52,6	13,50	3.896,3
Romania	46,8	20,83	2.246,8
Belgio	41,1	9,76	4.211,1
Messico	37,1	54,30	683,2
Jugoslavia	35,1	21,10	1.663,2
Austria	31,3	7,52	4.162,2
Finlandia	24,8	4,66	5.321,9
Bulgaria	21,9	8,62	2.540,6
Argentina	21,7	24,29	893,4
Danimarca	17,6	5,03	3.499,0
Ungheria	17,6	10,45	1.684,2



Correlazione tra reddito nazionale lordo procapite ed energia disponibile per abitante (1971).
(Elaborazione dati ISTAT, 1973).

Reattori nucleari in attività e in costruzione alla fine del 1991.

PAESE	In attività		In costruzione		En. elettr. prodotta con reatt. nucl. nel 1991	
	n.	P[MW]	n.	P[MW]	TWh*	% sul totale
Argentina	2	935	1	692	7,2	19,1
Belgio	7	5.484			40,4	59,3
Brasile	1	626	1	1.245	1,3	0,6
Bulgaria	6	3.538			13,2	34,0
Canada	20	13.993	2	1.762	80,1	16,4
Cina	1	228	2	1.812		
Cuba			2	816		
Cecoslovacchia	8	3.264	6	3.336	22,2	25,6
Finlandia	4	2.310			18,4	33,3
Francia	56	56.873	5	7.005	314,9	72,7
Germania	21	22.390			140,0	27,6
Ungheria	4	1.645			12,9	48,4
India	7	1.374	7	1.540	4,7	1,8
Iran			2	2.392		
Italia						
Giappone	42	32.044	10	9.192	209,5	23,8
Corea	9	7.220	3	2.550	53,5	47,5
Messico	1	654	1	654	4,1	3,6
Olanda	2	508			3,5	4,9
Pakistan	1	125			0,4	0,8
Romania			5	3.125		
Sud Africa	2	1.842			9,1	5,9
Spagna	9	7.067			52,2	35,9
Svezia	12	9.817			73,5	51,6
Svizzera	5	2.952			21,7	40,0
Gran Bretagna	37	11.710	1	1.188	62,0	20,6
USA	111	99.757	3	3.480	612,6	21,7
CSI (ex URSS)	45	34.673	25	21.255	212,1	12,6
Jugoslavia	1	632			4,7	6,3
Totale**	420	326.611	76	62.044	2009,1	

* 1 TWh = 10^9 kWh.

** Il totale comprende anche le sei centrali di Taiwan.

IN ITALIA

FONTI ENERGETICHE:

- idraulica
- geotermica
- termica tradizionale

DAL 1880 (ANNO CHE HA SEGNATO L'INIZIO DELLA PRODUZIONE DI **ENERGIA ELETTRICA**)

E PER OLTRE 60 ANNI

LA PRINCIPALE (E QUASI UNICA) FONTE ENERGETICA UTILIZZATA È STATA QUELLA **IDRAULICA** GRAZIE ANCHE ALLA SITUAZIONE OROGRAFICA DELL'ITALIA.

DAL 1950

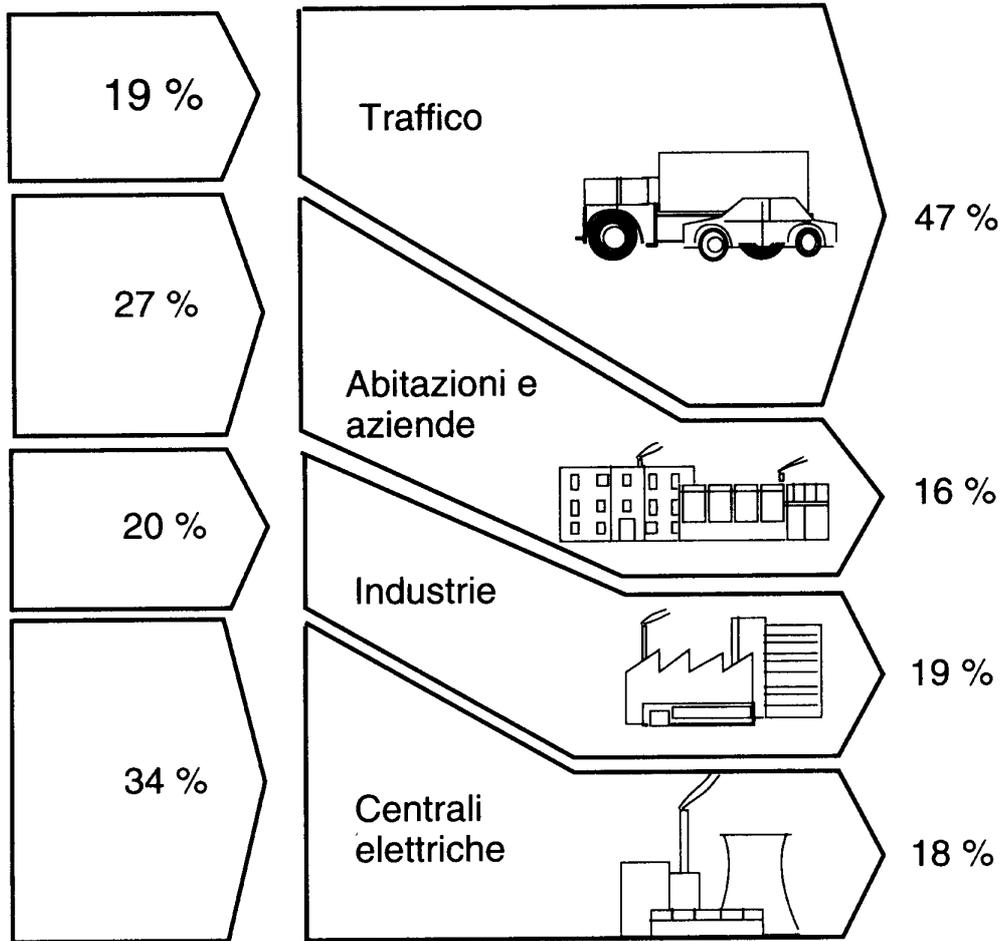
È ANDATO AUMENTANDO L'IMPIEGO DELL'ENERGIA **TERMICA** CON UN RITMO CHE HA QUASI ESATTAMENTE SEGUITO L'ANDAMENTO DELLA RICHIESTA DI ENERGIA ELETTRICA (RADDOPPIO OGNI 8/9 ANNI)

<i>ANNO</i>	<i>ENERGIA IDROELETTRICA PRODOTTA (TWh)</i>	<i>ENERGIA IDROELETTRICA PRODOTTA (%)</i>
1950	20	85
1960	40	75
1970	45	35

<i>ANNO</i>	<i>POTENZE TERMOELETTRICHE INSTALLATE (MW)</i>
1950	1.000
1960	4.500
1970	15.000

consumo di energia
primaria: 360 Mtce

emissione totale di
sostanze nocive 16,5 Mt



Il consumo di energia primaria e le emissioni di sostanze nocive.

	idro	termo	nucleare
Italia	25	75	0
Francia	15	15	70
Germania	10	60	30
Inghilterra	5	70	25
Svizzera	57	2	41
USA	10	75	15
Giappone	10	55	35

FORME IN CUI L'ENERGIA È UTILIZZATA

Le forme in cui l'energia è utilizzata dall'uomo sono essenzialmente le seguenti

- energia termica
- energia meccanica
- energia chimica
- energia elettrica

LE FORME DI ENERGIA DISPONIBILI

Ai fini della sua pratica utilizzazione, l'energia si può presentare in natura nelle seguenti forme

- gravitazionale
- cinetica
- termica
- chimica
- elettrica
- elettromagnetica
- nucleare

LE FONTI ENERGETICHE NATURALI, FONDAMENTALI E PRIMARIE

Pur potendo far discendere ogni fonte di energia, in ultima analisi, dalla *formazione del sistema solare*, è tuttavia conveniente fare riferimento, al fine di rendere possibile una razionale descrizione dell'attuale sfruttamento a livello industriale delle risorse energetiche, alla seguente classificazione delle **fonti naturali fondamentali**

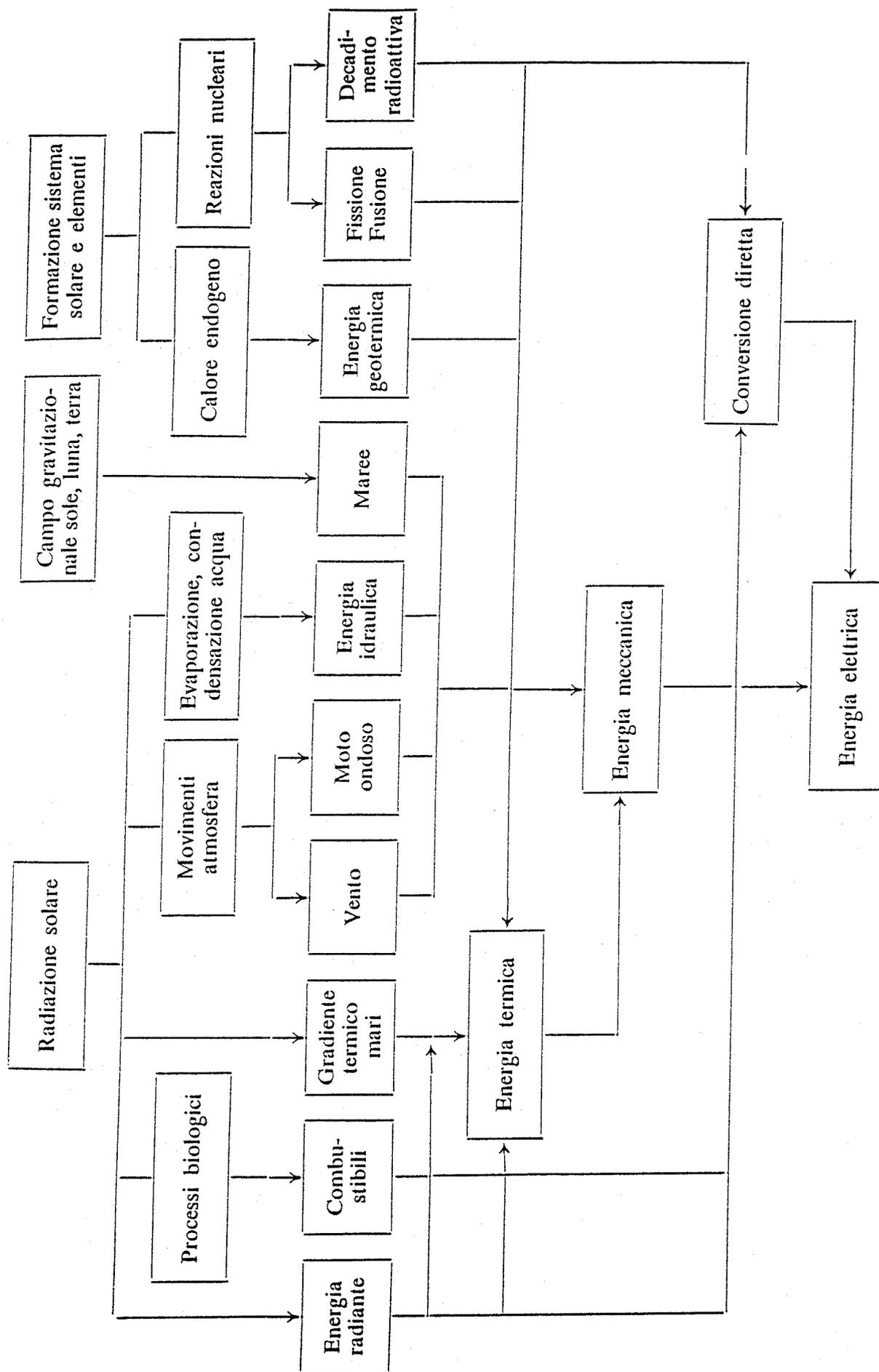
- radiazione solare
- campo gravitazionale sole, luna, terra
- formazione del sistema planetario e degli elementi chimici

Dalle fonti fondamentali suddette si passa alle **fonti naturali primarie** utilizzabili, le quali mettono a disposizione dell'uomo energia sfruttabile per le applicazioni pratiche. Esse sono classificabili in

- energia radiante (solare)
- energia chimica dei combustibili
- gradiente termico marino
- energia eolica
- moto ondoso
- energia idraulica potenziale
- maree
- energia geotermica
- energia nucleare di fissione (e fusione)
- decadimento radioattivo

Conversioni di energie.

		A E N E R G I A						
DA ENERGIA	Gravitazionale	Cinetica	Termica	Chimica	Elettrica	Elettromagnetica	Nucleare	
Gravitazionale	—	attrazione di masse	<i>sconosciuta</i>	<i>sconosciuta</i>	<i>sconosciuta</i>	<i>sconosciuta</i>	<i>sconosciuta</i>	
Cinetica	lancio di masse	—	attrito	dissociazione radiolitica	apparati MHD	accelerazione particelle	<i>sconosciuta</i>	
Termica	<i>sconosciuta</i>	efflussi gassosi	—	reazioni endoterme	effetti termoelettrici	radiazioni termiche	<i>sconosciuta</i>	
Chimica	<i>sconosciuta</i>	tessuti animali	combustione	—	batterie e celle a combustione	chemiluminescenza	<i>sconosciuta</i>	
Elettrica	<i>sconosciuta</i>	motori elettrici	effetti chimici	elettrolisi	—	radiazione elettromagnetica	<i>sconosciuta</i>	
Elettromagnetica	<i>sconosciuta</i>	fenomeni fotoelettrici	radiazioni termiche	fenomeni fotochimici	fenomeni fotoelettrici	—	reazioni γ	
Nucleare	<i>sconosciuta</i>	radiazioni α	fissione e fusione	catalisi da radiazione	batteria nucleare	reazioni γ	—	



FONTI DI ENERGIA E PROCESSI DI CONVERSIONE, TRADIZIONALI E NON TRADIZIONALI

E' consuetudine suddividere sia le *fonti primarie* sia i *processi di conversione* dell'energia, in **tradizionali e non tradizionali**, sulla base di una valutazione congiunta del *tempo trascorso dall'inizio della loro pratica utilizzazione* e dell'*ampiezza raggiunta da tale utilizzazione*. Così si possono considerare fonti energetiche primarie **tradizionali**

- l'energia idraulica potenziale
- l'energia chimica dei combustibili
- l'energia geotermica
- l'energia nucleare

Si può osservare come l'energia nucleare, talvolta considerata non tradizionale, sia nell'elenco in virtù dell'ampia diffusione mondiale che oggi ha raggiunto.

Tutte le altre fonti sono considerate **non tradizionali**. Tra esse figurano fonti come l'energia eolica, la cui prima utilizzazione risale a molti secoli addietro (ma la cui utilizzazione non ha mai raggiunto livelli comparabili alle esigenze energetiche di una società moderna), e come l'energia solare, il cui sfruttamento energetico è, invece, molto recente.

Lo sfruttamento di fonti tradizionali e non tradizionali può comportare indifferentemente processi di conversione tradizionali o non tradizionali.

Un esempio è quello dell'energia delle *maree* (**fonte non tradizionale**) che è convertita in energia meccanica mediante un'apposita macchina, la *turbina idraulica* (macchina idraulica), che realizza un **processo di conversione tradizionale**.

Un altro esempio è quello dell'energia chimica dei *combustibili* (**fonte tradizionale**) che può essere convertita in energia elettrica mediante sistemi di conversione a *celle a combustibile* o magneto-idrodinamici (*MHD*) che sono entrambi **non tradizionali**.

ATTUALE UTILIZZAZIONE DELLE FONTI PRIMARIE DI ENERGIA

Le utilizzazioni più diffuse riguardano non soltanto le *fonti tradizionali*, ma anche i *sistemi di conversione tradizionali*.

Ad eccezione del caso dell'energia idraulica, la conversione dell'energia naturale è attuata attraverso un processo termo-meccanico. La fonte energetica è utilizzata per rendere disponibile energia termica, la quale fornisce, mediante appositi sistemi energetici motori termici, l'energia meccanica desiderata. Questa è la soluzione di gran lunga più utilizzata, anche se sono in atto continui studi ed avanzate ricerche che hanno lo scopo di portare alla realizzazione di sistemi energetici in grado di convertire direttamente le energie naturali in energia utile, generalmente elettrica.

L'attuale situazione sulle possibilità di produrre energia meccanica è riassunta nella Tabella seguente.

<i>ENERGIA FONDAMENTALE</i>	<i>ENERGIA PRIMARIA</i>	<i>CONVERSIONE</i>
radiazione solare	idraulica	meccanica
radiazione solare	chimica (dei combustibili)	termo-meccanica
formazione del sistema planetario	geotermica	termo-meccanica
formazione degli elementi chimici	nucleare	termo-meccanica

INDICE

Frontespizio	1
Generalità.....	2
Simbologia.....	2
I sistemi energetici.....	3
Le macchine.....	4
La conversione delle unità di misura	6
Il sistema internazionale di unità	10
Analisi dimensionale	14
Energia.....	19
La situazione energetica	22
Classificazione dell'energia.....	29
Indice	33