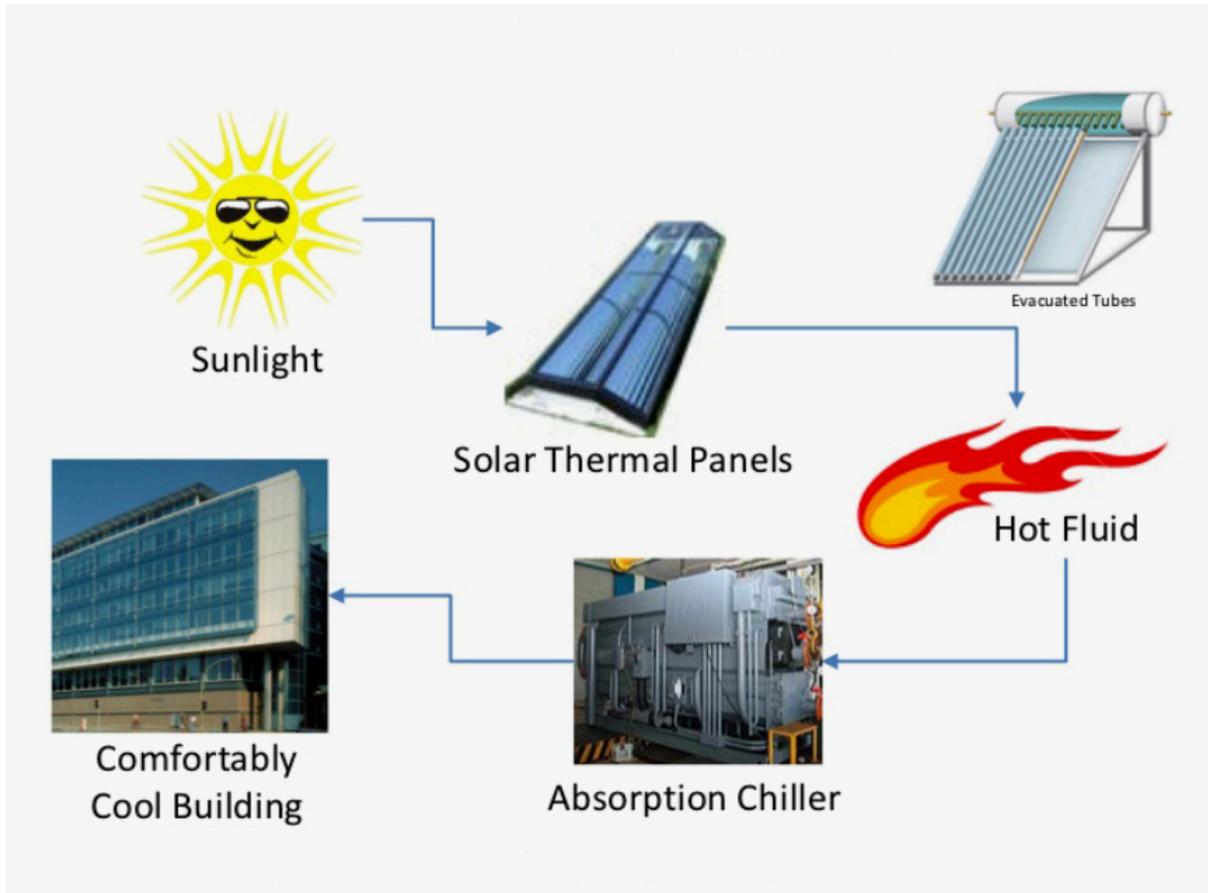


ENERGETICA



Prof. Dentice

A.A. 2017/2018

Questo elaborato è stato ricavato da un'accurata analisi e rielaborazione del materiale didattico fornito dal professore, degli appunti presi durante le lezioni e delle sbobbinature degli anni precedenti.

PREMESSA: solo nei primi due capitoli sono state riportate esclusivamente le slide ritenute fondamentali per lo svolgimento degli esercizi.

INDICE:

1. LA QUESTIONE ENERGETICA.....	pag. 4
2. MERCATI DELL'ENERGIA ELETTRICA E DEL GAS NATURALE.....	pag. 26
3. CALDAIE.....	pag. 43
4. POMPE DI CALORE E MACCHINE FRIGORIFERE.....	pag. 66
5. EVAPORATORI.....	pag. 134
6. HEAT INTEGRATION E PINCH ANALYSIS.....	pag. 148
7. AZIONAMENTI ELETTRICI A VELOCITÁ VARIABILE	pag. 175
8. COGENERAZIONE.....	pag. 191
9. ENERGIA EOLICA.....	pag. 237
10. LA FONTE SOLARE.....	pag. 266

1. LA QUESTIONE ENERGETICA

Principali unità di misura

ENERGIA

Unità di misura	Simbolo	Definizione	Relazione con altre U.M.
Joule	J	$N \cdot m = W \cdot s = V \cdot A \cdot s$	
Chilocaloria	kcal		$4,1868 \text{ kJ} = 1/860 \text{ kWh}$
British Thermal Unit	BTU		1,0545 kJ
Chilowattora	kWh	$1 \text{ kW} \times 1 \text{ h}$	$3600 \text{ kJ} = 860 \text{ kcal}$
Tonnellata equivalente di petrolio	TOE, tep	10^7 kcal	$41,868 \times 10^6 \text{ kJ} = 7,35 \text{ boe, bep}$
Barile equivalente di petrolio	boe, bep, bbl	0,136 tep	$565,2 \times 10^6 \text{ kJ}$

N.B.:

$$1 \text{ tep} = 10^7 \text{ kcal} = 10^7 / 860 \text{ kWh} = (1/0,136) \text{ bep} = 7,35 \text{ bep}$$

$$1 \text{ kWh} = 860 \cdot 10^{-7} \text{ tep}$$

POTENZA

- $1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/s} = 3600/4,1868 \text{ kcal/h} = 860 \text{ kcal/h}$
- $1 \text{ kW} = 0,948 \text{ btu/s} = 3414 \text{ btu/h}$
- etc.

Potere Calorifico dei combustibili

- ✓ POTERE CALORIFICO SUPERIORE, PCS (o Higher Heating Value, HHV):

ENERGIA TERMICA NECESSARIA PER RAFFREDDARE I PRODOTTI DELLA REAZIONE DI COMBUSTIONE DI UNA QUANTITA' UNITARIA DI COMBUSTIBILE, IN CONDIZIONI STECHIOMETRICHE, RIPORTANDOLI ALLE CONDIZIONI INIZIALI DI TEMPERATURA ($T_{\text{standard}} = 25^\circ\text{C}$), IN UN PROCESSO A PRESSIONE COSTANTE ($p_{\text{standard}} = 1 \text{ atm}$)

Possibili unità di misura:

- kJ/kg , kWh/kg , kcal/kg
- kJ/m^3 , kWh/m^3 , kcal/m^3
- kJ/L , kWh/L , kcal/L



Ex.: reazione di combustione del metano:
 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

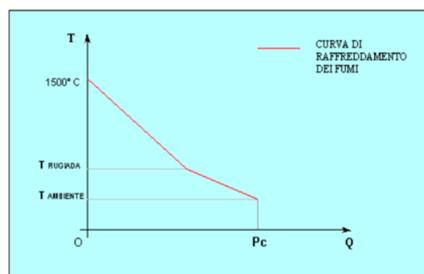
- ✓ POTERE CALORIFICO INFERIORE, PCI (o Lower Heating Value, LHV):

POTERE CALORIFICO SUPERIORE DIMINUITO DEL CALORE RECUPERABILE DALLA CONDENSAZIONE DEL VAPORE D'ACQUA PRESENTE NEI FUMI:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \Delta h_{\text{co}} \cdot m'_{\text{H}_2\text{O}}$$

dove:

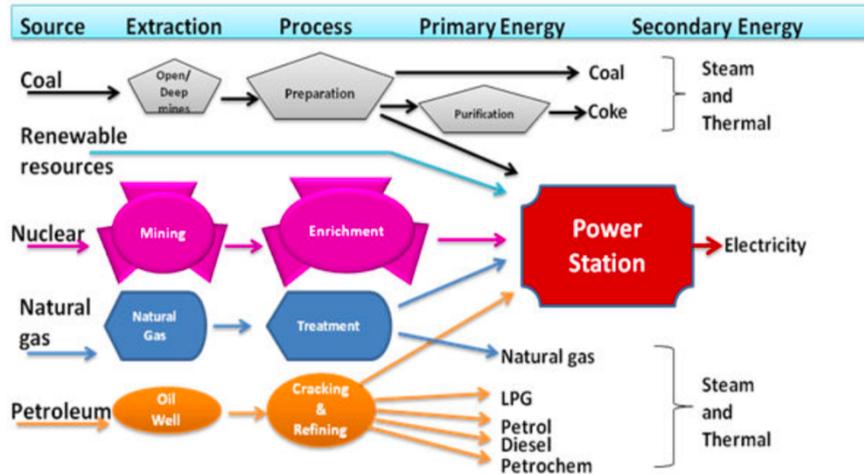
- Δh_{co} = calore latente di condensazione del vapor d'acqua ($\cong 2500 \text{ kJ/kg}$)
- $m'_{\text{H}_2\text{O}}$ = massa di vapor d'acqua nei fumi, per unità di massa (o volume) del combustibile



Classificazione delle fonti energetiche

✓ In base alla loro **origine**:

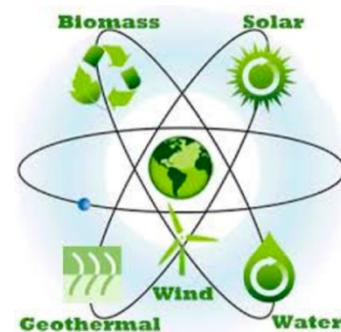
- **energia primaria**: risorsa disponibile in natura, previa estrazione ed eventuale pre-trattamento, a monte di qualsiasi processo di conversione energetica
- **energia secondaria**: ottenuta a partire da una fonte primaria mediante un processo di conversione energetica



In base alla loro **disponibilità**:

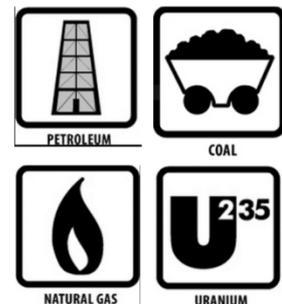
✓ **Fonti rinnovabili (virtualmente inesauribili)**:

- **energia solare**:
 - diretta: termica, fotovoltaica
 - indiretta: idraulica, eolica, biomasse
- **geotermia**
- **maree e moto ondoso**
- **combustibili nucleari (fusione e fissione autofertilizzante)**



✓ **Fonti non rinnovabili (destinate all'esaurimento, in quanto sfruttate ad un ritmo superiore a quello di rinnovamento)**:

- **combustibili fossili (solidi, liquidi, aeriformi)**
- **combustibili nucleari (fissione convenzionale)**



INTENSITÀ ENERGETICA

- ✓ Il fabbisogno di energia di un Paese, E , è legato a vari fattori, tutti di tipo dinamico:
 - consistenza demografica => numero abitanti, N
 - livello di sviluppo socio-economico =>
 - => PIL pro-capite
 - attività economico-produttive prevalenti
 - livello di sviluppo tecnologico e socio-economico => capacità di utilizzare in modo razionale ed efficiente le risorse disponibili
 - fattori climatici

- ✓ L'indicatore comunemente utilizzato per sintetizzare le correlazioni tra i consumi, e i fattori demografici ed economici è l'intensità energetica:

Intensità energetica => $I = E / (N \times \text{PIL pro-capite})$

"Global Warming Potential" (GWP) di alcuni gas serra (orizzonte: 100 anni)

GWP di un gas serra = rapporto tra il "forzante radiativo (*)" di una sua unità di massa e quello di una stessa unità di anidride carbonica durante un certo periodo di tempo

(*) **Forzante radiativo** = contributo di un determinato fattore all'alterazione della differenza tra l'energia solare in ingresso e quella in uscita dall'atmosfera; in altri termini, misura l'influenza di un fattore nell'alterazione del bilancio tra energia entrante ed energia uscente nel sistema terra-atmosfera. Si misura in W/m^2 .

Ad esempio, per la CO_2 , si può calcolare in prima approssimazione come:

$$\Delta F = 5.35 \times \ln \frac{C}{C_0} \text{ W m}^{-2}$$

dove C è la concentrazione volumetrica e C_0 quella di riferimento (entrambe in ppm).

Sostanza	GWP100
CO_2	1
CH_4	21
Nox	310
HFCs	140-11.700
PFCs	6.500-9.200
SF_6	23.900
CFC-11	3.400
HCFC-22	1.600
HC-10	1.300
HALON-1301	4.900
$CHCl_3$	25
CH_2Cl_2	15

Esempi di coefficienti di emissione di gas serra: combustibili (<http://www.eumayors.eu>)

Tabella 5. Fattori di emissione standard di CO₂ (da IPCC, 2006) e fattori di emissione LCA equivalenti di CO₂ (da ELCD) per i più comuni tipi di combustibile

Tipo	Fattore di emissione standard [t CO ₂ /MWh]	Fattore di emissione LCA [t CO ₂ -eq/MWh]
Benzina per motori	0,249	0,299
Gasolio, diesel	0,267	0,305
Olio combustibile residuo	0,279	0,310
Antracite	0,354	0,393
Altro carbone bituminoso	0,341	0,380
Carbone sub-bituminoso	0,346	0,385
Lignite	0,364	0,375
Gas naturale	0,202	0,237
Rifiuti urbani (frazione non biomassa)	0,330	0,330
Legno ^a	0 – 0,403	0,002 ^b – 0,405
Olio vegetale	0 ^c	0,182 ^d
Biodiesel	0 ^c	0,156 ^e
Bioetanolo	0 ^c	0,206 ^f
Energia solare termica	0	- ^h
Energia geotermica	0	- ^h

Esempi di coefficienti di emissione di gas serra: consumi finali di en. elettrica (<http://www.eumayors.eu>)

Tabella 6. Fattori di emissione nazionali ed europei per il consumo di elettricità. Si noti che l'anno cui i dati si riferiscono varia a seconda del paese e dell'approccio (standard o LCA)^g

Paese	Fattore di emissione standard (t CO ₂ /MWh _e)	Fattore di emissione LCA (t CO ₂ -eq/MWh _e)
Austria	0,209	0,310
Belgio	0,285	0,402
Germania	0,624	0,706
Danimarca	0,461	0,760
Spagna	0,440	0,639
Finlandia	0,216	0,418
Francia	0,056	0,146
Regno Unito	0,543	0,658
Grecia	1,149	1,167
Irlanda	0,732	0,870
Italia	0,483	0,708
Paesi Bassi	0,435	0,716
Portogallo	0,369	0,750
Svezia	0,023	0,079
Bulgaria	0,819	0,906
Cipro	0,874	1,019
Repubblica Ceca	0,950	0,802
Estonia	0,908	1,593
Ungheria	0,566	0,678
Lituania	0,153	0,174
Lettonia	0,109	0,563
Polonia	1,191	1,185
Romania	0,701	1,084
Slovenia	0,557	0,602
Slovacchia	0,252	0,353
UE-27	0,460	0,578

N.B.: a differenza dei precedenti, questi fattori di emissione:

1. sono riferiti al consumo di energia finale, e non all'energia primaria: infatti l'energia elettrica viene generata con un mix di combustibili, ciascuno con il proprio fattore di emissione;
2. sono variabili nel tempo, perché dipendono dal mix di combustibili e dall'efficienza di conversione delle centrali;
3. possono essere calcolati con vari criteri (soprattutto i fattori LCA).

Il valore Italiano di 0,483 kg/kWh_e è calcolato dividendo le emissioni totali (circa 155 Mt/anno) per i consumi finali (circa 320 TWh/anno).

Attribuendo le emissioni, come sarebbe più corretto, alla sola produzione termoelettrica convenzionale (fonti fossili), pari a circa 200 TWh/anno, il fattore di emissione salirebbe a oltre 0,77 kg/kWh_e.

I dati reali sulle emissioni di gas serra del settore elettrico, aggiornati anno per anno, sono reperibili sul sito: <http://www.isprambiente.gov.it>. Sullo stesso sito sono riportati anche i dati sull'inventario nazionale di tutte le emissioni di gas serra.

Il "Flusso di Cassa" (Cash-Flow) di un investimento

- ✓ Analisi, per un prefissato periodo di riferimento (vita "utile" o "tecnica" dell'investimento), dei flussi di denaro in uscita e ingresso associati alla realizzazione dell'investimento, ad ex.:

Esempio di Cash-Flow (dati in €)

ANNO	Investimenti fissi, I_k	Disponibilità (ricavi – costi), D_k	Flusso di cassa, $F_k = D_k + I_k$	Somma dei flussi di cassa, ΣF_k
0	-12.000		-12.000	-12.000
1		4.000	4.000	-8.000
2		4.000	4.000	-4.000
3		4.000	4.000	0
4		4.000	4.000	4.000
5		4.000	4.000	8.000
6		4.000	4.000	12.000
7		4.000	4.000	16.000
8		4.000	4.000	20.000
9		4.000	4.000	24.000
10		4.000	4.000	28.000

Recupero del
capitale

Un primo indice di valutazione: il periodo di recupero del capitale ("Pay-Back Period" o "Simple Pay-Back", SPB)

- ✓ Definizione:

$$SPB = N \text{ tale che: } \sum_{k=0}^N F_k = 0$$

Se, per ogni $k > 0$:

- $I_k = 0$
- $F_k = D_k = \text{costante} = D$



$$SPB = |I_0| / D$$

- ✓ Pregi:

- di interpretazione immediata (indice di liquidità)
- molto semplice da calcolare

- ✓ Limiti:

- non tiene conto della redditività dell'investimento nell'arco dell'intera vita utile o tecnica dello stesso
- non considera la variabilità del valore del denaro nel tempo

- ✓ Valori di riferimento tipici: max 4÷5 anni (imprenditoria privata), max 5÷8 anni (investitori pubblici)

Il valore del denaro nel tempo: capitalizzazione ed attualizzazione

Anche in assenza di inflazione, disporre di una somma di denaro oggi non è lo stesso che disporre tra N anni, in quanto solo il denaro disponibile può essere utilizzato o investito!

Ad ex.:

- ✓ capitalizzazione di una somma disponibile all'anno "0" in N anni, in regime di capitalizzazione composta^(*), al tasso di interesse (costante) "i":

$$C_1 = C_0 \times (1+i); C_2 = C_0 \times (1+i)^2; \dots \Rightarrow C_N = C_0 \times (1+i)^N$$



- ✓ attualizzazione all'anno "0" di una somma disponibile all'anno "N", in regime di capitalizzazione composta, al tasso di attualizzazione (costante) "a":

$$C_0 = C_N / (1+a)^N$$

^(*) In caso di capitalizzazione semplice, $C_N = C_0 + C_0 \times N \times i = C_0 \times (1 + N \times i)$

Pay-Back attualizzato,
a = 5%

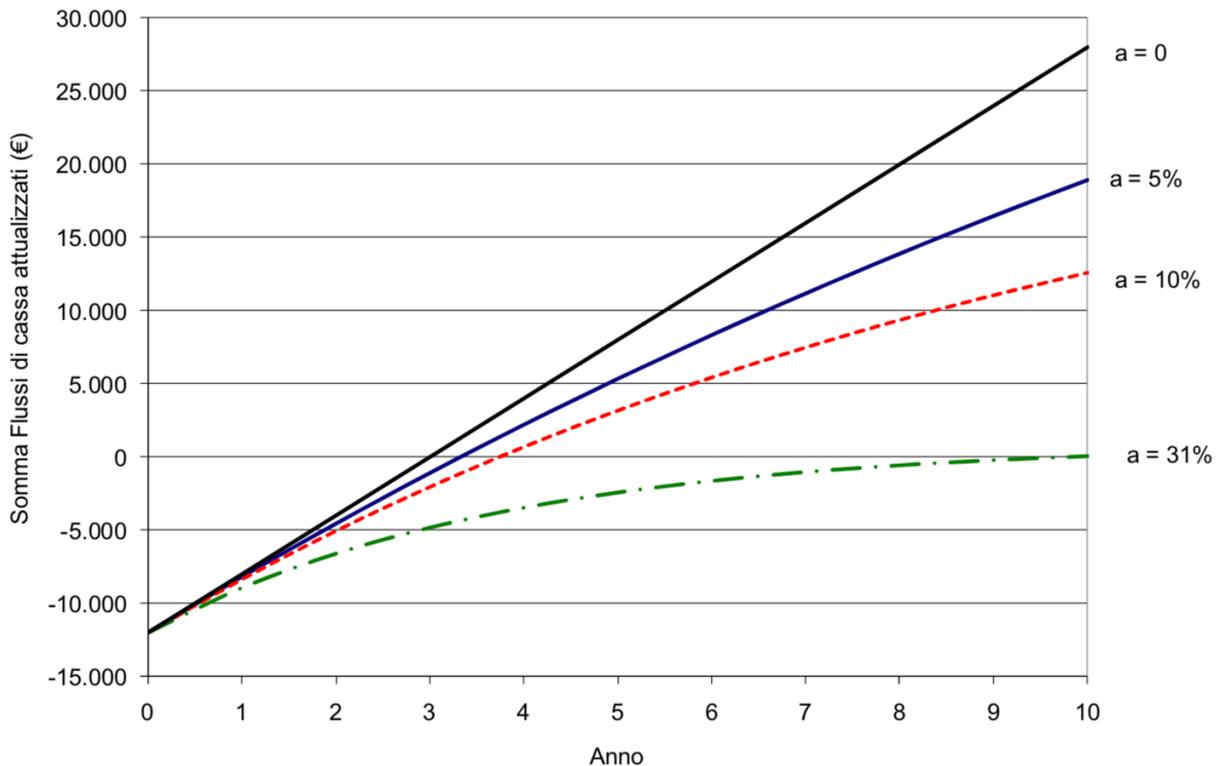
Cash-flow attualizzato

ESEMPIO DI CASH FLOW (€)

ANNO	I _k	D _k	F _k = D _k +I _k	ΣF _k	F _k /(1+a) ^k a = 5%	ΣF _k /(1+a) ^k a = 5%
0	-12.000		-12.000	-12.000	-12.000	-12.000
1		4.000	4.000	-8.000	3.810	-8.190
2		4.000	4.000	-4.000	3.628	-4.562
3		4.000	4.000	0	3.455	-1.107
4		4.000	4.000	4.000	3.291	2.184
5		4.000	4.000	8.000	3.134	5.318
6		4.000	4.000	12.000	2.985	8.303
7		4.000	4.000	16.000	2.843	11.145
8		4.000	4.000	20.000	2.707	13.853
9		4.000	4.000	24.000	2.578	16.431
10		4.000	4.000	28.000	2.456	18.887

Valore Attuale Netto (VAN),
per N = 10 anni e a = 5%

L'influenza del tasso di attualizzazione sugli indici di valutazione



La scelta del valore del tasso di attualizzazione

- ✓ Valori di "a" elevati tendono a sottostimare la redditività dell'investimento, il contrario per valori bassi
- ✓ La scelta del valore (o dei valori) di "a" va effettuata attentamente, tenendo conto:
 - delle capacità di investimento alternative (in caso di utilizzo di proprie risorse) =>
a ≥ tasso di interesse garantito dall'attività più remunerativa a disposizione
 - del tasso di interesse da corrispondere ai creditori (in caso di utilizzo di capitale di prestito) =>
a ≥ tasso di interesse da pagare ai creditori
- ✓ Di norma, si effettuano le analisi simulando diversi valori di "a", ed usando come riferimento il Tasso Ufficiale di Sconto o il "Prime Rate"
- ✓ Un valore convenzionale usato comunemente è a = 5%