

12 Fabbisogno, ambiente e risparmio energetico

Prerequisiti

- Conoscere l'unità di misura dell'energia nel sistema SI.
- Conoscere i multipli del sistema SI.
- Conoscere la conversione da tonnellata di petrolio equivalente [toe] a joule [J] e in particolate a gigajoule [GJ].
- Conoscere le fonti di energia primaria e secondaria.
- Possedere nozioni di base di chimica.

12.1 Il fabbisogno di energia

A fine 2018, circa l'86% dell'energia primaria (*Figura 12.1*) proveniva da fonti non rinnovabili: gas naturale, petrolio, carbone e combustibile nucleare.

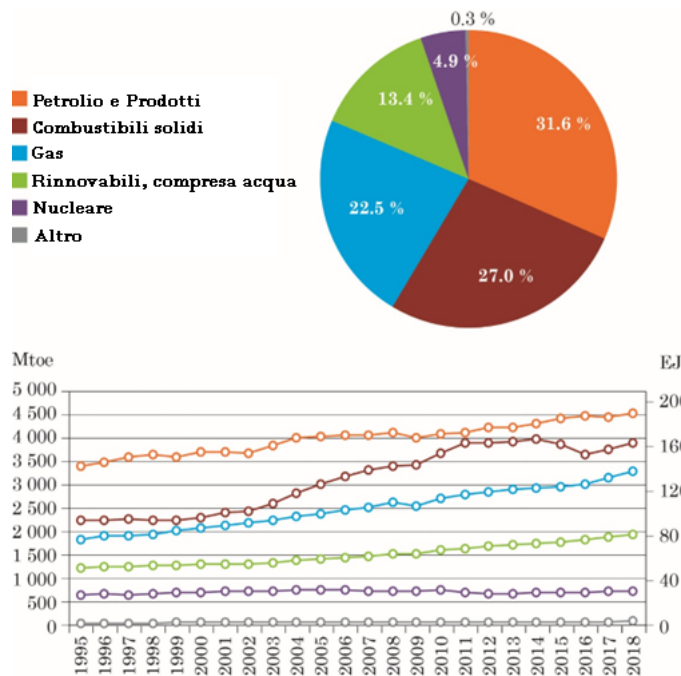


Fig. 12.1 - Produzione mondiale di energia a seconda della fonte a partire dal 1995. La produzione totale nel 2018 è stata di 603,78 EJ = 14.421 Mtoe^{12.1}.

Il fabbisogno di energia in questi ultimi anni è cambiato profondamente per due motivi:

1. i Paesi occidentali, tradizionali centri della domanda di energia, sono stati superati dalle economie in forte crescita come Cina e India (*Figura 11.2*);

12.1 - 1 Mtoe (million toe) = $41,868 \times 10^{-3}$ EJ (exajoule) $\approx 42 \times 10^{-3}$ dalla *Tabella 11.1*.

2. continua la transizione verso un insieme di sorgenti di energia a contenuto di carbonio minore o addirittura assente, guidata dal gas naturale e dalle rinnovabili (*Figure 12.1 e 12.2*).

Il *gas naturale* con una crescita annuale dell'1,7%, aumenta in modo molto più rapido di petrolio e carbone: nel 2022 ha superato il carbone quale seconda maggiore sorgente globale di energia e dovrebbe arrivare a uguagliare il petrolio alla fine del 2035. Il gas naturale gioca un ruolo fondamentale nella diminuzione del carbonio poiché nel suo componente principale, il metano, la percentuale in massa di carbonio è pari al 75% del combustibile mentre nel petrolio questa percentuale arriva all'80 ÷ 83%. L'aumento del consumo di gas naturale (*Paragrafo 11.2*) verrà aiutato dalla rapida crescita del trasporto del gas liquefatto (*liquefied natural gas*, LNG) che lo renderà accessibile dovunque e compenserà la riduzione di petrolio e carbone.

Accanto all'*energia idroelettrica*, da tempo conosciuta, si sono recentemente sviluppate il gruppo delle *energie rinnovabili*: geotermica, solare, eolica, biocombustibili e rifiuti solidi urbani. Dal 2018 al 2019, il consumo di energia idroelettrica è aumentato dello 0,8%, mentre nei 10 anni precedenti era stato dell'1,9% all'anno. Questo aumento è stato determinato da Cina (0,6 EJ), Turchia (0,3 EJ) e India (0,2 EJ). Il consumo di energia dalle fonti rinnovabili continua a crescere rapidamente con una variazione annuale di 3,2 EJ, passando dal 2018 al 2019, maggiore di quella di qualsiasi altra fonte. Il maggior contributo a questa crescita è stato dato dall'energia eolica (1,4 EJ) seguito da vicino da quello del solare (1,2 EJ). Altre fonti di energia rinnovabile, biomasse e geotermica, sono cresciute di 0,3 EJ, mentre il consumo di biocombustibili è aumentato di 0,2 EJ. In Cina l'uso delle rinnovabili è aumentato (+ 0,8 EJ) di più che in qualsiasi altra regione; dietro alla Cina ci sono Stati Uniti (0,3 EJ) e Giappone (0,2 EJ).

A giudicare dall'andamento attuale, le rinnovabili rappresentano la fonte di energia con la crescita più rapida, aumentando dal 5% a fine 2019 fino a oltre il 40% dal 2050 (*Figura 12.2*). Le rinnovabili, con la loro quota nell'energia mondiale passata dall'1% al 10% in 25 anni, rappresentano storicamente la fonte di energia con la crescita maggiore di quella di ogni altro combustibile; si prenda, ad esempio, la quota del petrolio passata dall'1% dell'energia globale al 10% in 45 anni (fine 1800/inizio 1900) oppure del gas naturale cresciuta del 10% in cinquanta anni da inizio del 1900.

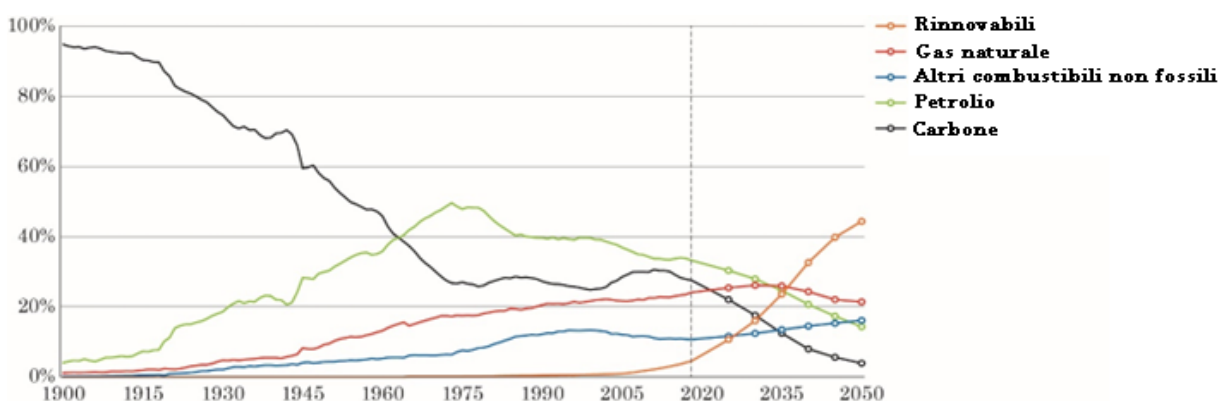


Fig. 12.2 - Percentuali di energia primaria in uno scenario di rapida transizione verso combustibili a basso tenore di carbonio. Questo scenario richiede una serie di interventi, in particolare sul prezzo del carbone, che portino a una diminuzione del 70% delle emissioni di carbonio dal 2050; in questo modo sarà possibile limitare dal 2100 l'aumento nelle temperature globali ben al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali.

// 12.2 L'ambiente

12.2.1 Inquinanti

L'inquinamento dell'aria, che condiziona pesantemente l'inquinamento delle acque e del suolo, deriva, in larga misura, da sostanze utilizzate nelle macchine a fluido. Queste sostanze sono rappresentate principalmente da prodotti della combustione dei combustibili fossili. Vi sono poi degli inquinanti che non derivano dal processo di combustione come, ad esempio, l'*asbesto* (o amianto)^{12.2}, usato per lungo tempo come isolante, e i *clorofluorocarburi* (CFC)^{12.3}, impiegati una volta come solventi per la pulizia dei circuiti elettronici e come fluidi frigoriferi negli impianti di climatizzazione.

Nella combustione dei combustibili fossili si formano cinque classi di *inquinanti (pollutants)* raccolti nella *Scheda 12.1*:

- Ossidi di azoto (*nitrogen oxides*) NO_x (NO ed NO_2): sia l'ossido di azoto NO sia il biossido NO_2 reagiscono con altri composti dando luogo a inquinanti, mentre il biossido di azoto è anche tossico.
- Monossido di carbonio (*carbon monoxide*) CO tossico.
- Composti organici volatili (*volatile organic compounds*) VOC : idrocarburi (*hydrocarbons*) HC , escluso il metano che non è reattivo, e prodotti di parziale ossidazione come, ad esempio, aldeidi, irritanti e di odore sgradevole; il benzolo e alcuni idrocarburi aromatici policiclici sono mutageni.
- Particolato (*particulates*) PM : aggregati di particelle costituite da un nucleo carbonioso e da una frazione organica solubile potenzialmente mutagena più un residuo di acqua e solfati.
- Ossidi di zolfo (*sulfur oxides*) SO_x (SO_2 ed SO_3): tossici, funzione del tenore di zolfo del combustibile.

12.2.2 Gas serra

La maggior parte dell'energia viene ottenuta mediante la combustione di combustibili fossili che, reagendo con l'ossigeno dell'aria, danno luogo a biossido di carbonio (*carbon dioxide o anidride carbonica*) CO_2 , vapor d'acqua H_2O e altri elementi (*Tabella 12.1*). Il biossido di carbonio appartiene ai gas a effetto serra (*greenhouse gases*), fenomeno naturale per il quale alcuni gas riescono a intrappolare nell'atmosfera le radiazioni infrarosse emesse dalla Terra (*Figura 12.3*). È l'effetto serra che mantiene la temperatura del globo sufficientemente alta

12.2 - L'asbesto è pericoloso per gli organi della respirazione a causa delle microfibre che penetrando negli alveoli polmonari provocano una reazione dell'organismo che può determinare l'insorgere di tumori. L'asbesto, essendo usato tra l'altro nei materiali di attrito impiegati per il rivestimento di freni e frizioni, si poteva disperdere nell'atmosfera, in microscopiche concentrazioni, per effetto dell'usura di tali materiali.

12.3 - La troposfera è la fascia dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre e ha uno spessore variabile a seconda della latitudine: ai poli è spesso solamente 8000 m mentre raggiunge i 20.000 m all'equatore. La stratosfera è lo strato atmosferico che sta al di sopra della troposfera e arriva a un'altezza di 50.000 ÷ 60.000 m. I clorofluorocarburi oltre a contribuire all'effetto serra nella troposfera, danneggiano lo strato di "ozono buono" della stratosfera (buco dell'ozono). Questo strato funge da filtro per le radiazioni ultraviolette (trattenendo da solo circa il 99% della radiazione UV solare), che possono essere dannose per la pelle (melanomi), causare una parziale inibizione della fotosintesi delle piante (con conseguente rischio di diminuzione dei raccolti) e distruggere frazioni importanti del fitoplancton che è alla base della catena alimentare marina.

Inquinanti primari

<i>Monossido di carbonio (CO)</i>
Gas incolore e inodoro. Cause: Incompleta combustione. Effetti su: – Salute: <ul style="list-style-type: none"> • Formazione di carbossiemoglobina, riduce la capacità del sangue di portare in circolo l'ossigeno. Letale in concentrazioni elevate (>0,3%); in piccole concentrazioni aggrava situazioni patologiche come l'angina pectoris. – Ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Può contribuire alla formazione di ozono. • Collegato alla formazione di acidi nell'atmosfera. • Contribuisce all'effetto serra.
<i>Composti organici volatili (VOC)</i>
Complessi di composti organici gassosi costituiti da idrocarburi (HC) incombusti, escluso il metano che non è reattivo, e da prodotti parzialmente ossidati come le aldeidi. Cause: Incompleta combustione. Effetti su: – Salute: <ul style="list-style-type: none"> • In genere non tossici con qualche eccezione. • Cancerogeni: benzene, 1,3-butadiene. • Irritanti: aldeidi. – Ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Formazione di smog fotochimico.
<i>Ossidi di azoto (NO_x)</i>
Due gas: monossido NO e biossido di azoto NO ₂ . Cause: Alte temperature (e quindi combustione molto efficiente) e presenza di ossigeno. Effetti su: – Salute: <ul style="list-style-type: none"> • Livelli di picco (da 300 a 400 ppb [parti per bilione]) influenzano le persone affette da asma e aumentano la probabilità di attacchi di asma. L'esposizione prolungata in casa aumenta la probabilità di infezioni respiratorie nei bambini. Non sono stati dimostrati effetti sulla salute per esposizione all'aperto. – Ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Formazione di ozono. • Precipitazioni acide. • Effetto serra.
<i>Particolato (PM)</i>
Particelle con dimensioni inferiori a 10 μm (PM ₁₀) oppure a 2,5 μm (PM _{2,5}), solide o liquide alla temperatura di 52 °C, costituite da un nucleo carbonioso su cui adsorbono composti organici altobollenti, solfati e acqua. Cause: Insufficiente ossidazione del combustibile iniettato in camera di combustione. Effetti su: – Salute: <ul style="list-style-type: none"> • Potenzialmente mutageno o per i composti organici oppure per il nucleo carbonioso della particella. – Ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Relazione complessa con l'effetto serra: il particolato carbonioso peggiora l'effetto serra, mentre le particelle a base di solfati lo riducono.
<i>Ossidi di zolfo (SO_x)</i>
Biossido SO ₂ e triossido di zolfo SO ₃ . Cause: Combustione dello zolfo contenuto nel combustibile. Effetti su: – Salute: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema respiratorio. – Ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Precipitazioni acide con danni all'ecosistema e agli edifici.
<i>Biossido di carbonio o anidride carbonica (CO₂)</i>
Gas inerte. Cause: Combustione del combustibile fossile. Effetti sull'ambiente: <ul style="list-style-type: none"> • Effetto serra.

da consentire la vita sulla Terra. Le concentrazioni atmosferiche dei gas serra sono aumentate da circa 280 ppm (parti per milione) prima della rivoluzione industriale alle 370 ppm di oggi. Nello stesso periodo la temperatura della superficie terrestre è aumentata di circa 0,6 °C e le organizzazioni internazionali^{12.4} prevedono aumenti di temperatura compresi tra 1,4 a 5,8 °C nel corso del 21° secolo.

Tabella 12.1

Elementi caratteristici dei gas di scarico derivanti dalla combustione dei combustibili fossili in centrali termoelettriche. Le concentrazioni sono espresse come percentuali [%] in volume; non sono riportati i valori delle emissioni di ossidi di azoto e di particolato

Elemento	Carbone	Gas naturale
Ar	0,86	0,89
O ₂	3,20	12,30
N ₂	72,00	74,50
H ₂ O	10,10	8,20
CO ₂	13,74	4,11
SO ₂	0,10	0
TOTALE	100,00	100,00

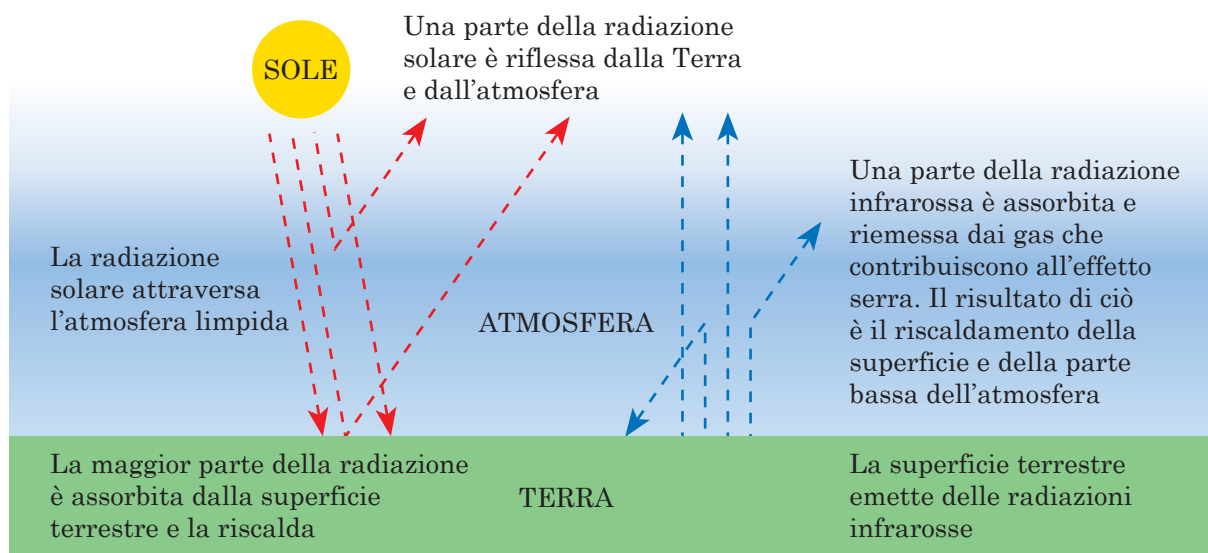


Fig. 12.3 - Modello semplificato dell'effetto serra. I gas serra, come il vapor d'acqua, il biossido di carbonio e il metano sono presenti naturalmente nell'atmosfera. Assorbendo le radiazioni infrarosse (lunghezza d'onda di 8 ÷ 15 µm) emesse dalla superficie terrestre, essi mantengono la temperatura della superficie terrestre a un livello sostenibile; senza i gas serra la Terra sarebbe più fredda di 33 °C. Il problema non sono i gas serra, ma la loro concentrazione che va contenuta in modo da impedire un aumento della temperatura della superficie terrestre non sopportabile dalle specie viventi.

12.4 - L'organizzazione internazionale che ha il compito di elaborare le informazioni disponibili sul cambiamento del clima e sul riscaldamento globale a opera dei gas serra è il gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) presieduto da scienziati governativi ma comprendente anche centinaia di scienziati e ricercatori accademici.

Per impedire i cambiamenti climatici occorre limitare l'immissione nell'atmosfera di biossido di carbonio, composto che, per le enormi quantità generate, dà il maggior contributo al riscaldamento globale dell'atmosfera terrestre. Per questo si può intervenire:

- passando a combustibili con minor contenuto di carbonio, ad esempio il gas naturale rispetto al petrolio o al carbone, oppure aumentando l'impiego di fonti di energia rinnovabile o di energia nucleare;
- aumentando il rendimento di conversione e/o utilizzazione dell'energia nella trasformazione del combustibile fossile;
- sequestrando il CO₂ dall'atmosfera mediante aumento della capacità di assimilazione biologica delle foreste e dei suoli oppure mediante cattura e stoccaggio per un periodo di tempo molto lungo del biossido di carbonio.

La tecnologia, chiamata cattura e stoccaggio del biossido di carbonio (CCS, *CO₂ capture and storage*), è in grado di contrastare in modo efficace l'immissione del CO₂ nell'atmosfera; essa rappresenta l'applicazione innovativa di processi noti. Secondo questa tecnologia la cattura del CO₂ può essere realizzata in tre modi:

- *Cattura post-combustione* – Il flusso dei gas di scarico dopo la combustione viene lavato con una soluzione di ammine (composti organici contenenti un atomo di azoto)^{12.5} per catturare il CO₂. La bassa concentrazione del CO₂ nel gas di combustione (*Tabella 12.1*) richiede costi elevati delle attrezzature, che devono essere molto grandi per poter trattare grandi volumi di gas, e notevoli quantità di energia nel processo di rigenerazione (estrazione del CO₂) dei solventi (*Figura 12.4*).
- *Cattura pre-combustione* – Gli elementi contenenti carbonio vengono rimossi secondo un processo sviluppato più di 60 anni fa. Il combustibile, che viene fatto reagire con ossigeno e/o vapore, forma il gas di sintesi, composto da monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H₂); successivamente il CO viene fatto reagire con vapore in un reattore catalitico per dare CO₂ e altro H₂ (*Figura 12.5*).
- *Combustione oxy-fuel* – Togliendo l'azoto^{12.6} dall'aria, si fa avvenire la combustione del combustibile con il solo ossigeno in modo da aumentare la concentrazione del CO₂ nei gas di scarico e rendere quindi meno costosa la sua rimozione. In questo processo occorre riciclare parte dei gas combusti, composti da vapor d'acqua e CO₂, nel combustore in modo da far scendere le temperature di combustione che con il solo ossigeno sarebbero estremamente elevate. Lo svantaggio del sistema è che la produzione di ossigeno richiede elevate quantità di energia e costi molto alti.

Lo stoccaggio del biossido di carbonio in serbatoi naturali consistenti in formazioni geologiche sepolte oppure nel mare profondo (*Figura 12.6*) deve soddisfare tre requisiti: la presenza di una barriera fisica che garantisca la permanenza del CO₂ nel serbatoio, basso impatto ambientale e costi contenuti.

12.5 - La cattura post-combustione del CO₂ è analoga alla desolfurazione dei gas di combustione, tecnica utilizzata nelle centrali alimentate a carbone o petrolio per ridurre le emissioni di biossido di zolfo (SO₂).

12.6 - La combustione ossigeno-combustibile (in inglese *oxygen-fuel*, abbreviata in *oxy-fuel*) viene anche chiamata denitrogenazione (l'azoto è stato chiamato *nitrogène* dal chimico francese J.A. Chaptal) perché si evita di introdurre l'azoto nel sistema di combustione.

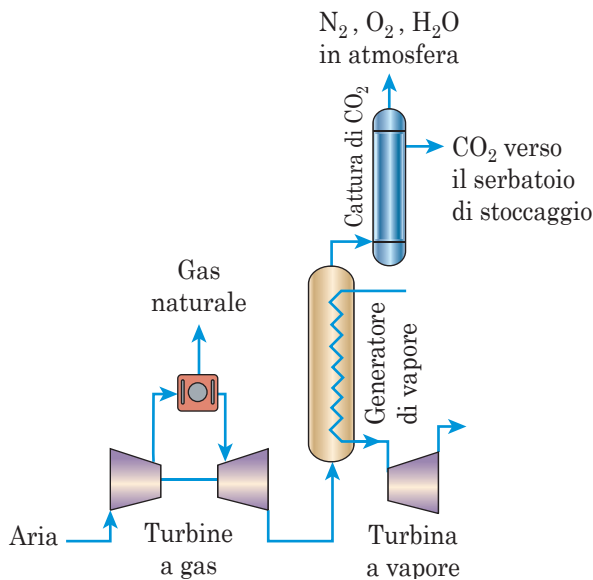


Fig. 12.4 - Diagramma schematico di centrali con ciclo combinato turbina a gas – vapore progettate per la cattura del biossido di carbonio (*International Energy Agency*). Centrale alimentata a gas naturale dotata di sistema di cattura post-combustione del CO_2 .

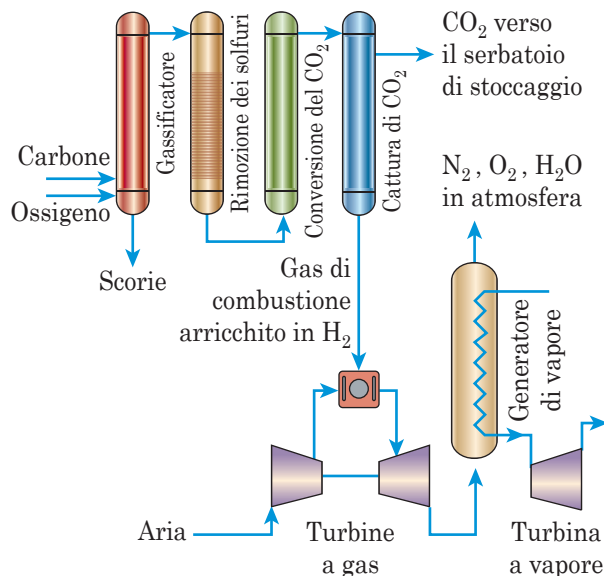


Fig. 12.5 - Diagramma schematico di centrali con ciclo combinato turbina a gas – vapore progettate per la cattura del biossido di carbonio (*International Energy Agency*). Centrale alimentata a carbone dotata di un sistema di cattura pre-combustione del CO_2 .

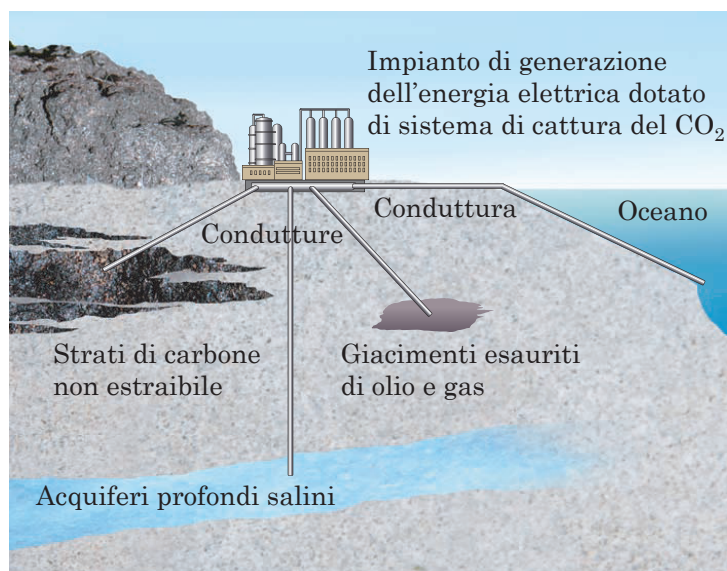


Fig. 12.6 - Stoccaggio del biossido di carbonio in giacimenti naturali di capacità tale da trattenere una frazione significativa delle emissioni globali di CO_2 , per centinaia di migliaia di anni in modo da non interferire con i cambiamenti climatici (*International Energy Agency*).

12.2.3 Qualità dell'aria

Gli inquinanti primari, immessi dalle varie sorgenti: trasporti, industria, impianti termoelettrici, riscaldamento domestico ecc., possono, in determinate condizioni, reagire nell'atmosfera dando luogo a *inquinanti secondari* che vengono rilevati nell'ambiente (Figura 12.7). Gli inquinanti secondari sono principalmente rappresentati da:

- *precipitazioni acide*, costituite da solfati e nitrati, originate dall'ossidazione di NO_x e SO_x;
- *smog fotochimico*, che ha per prodotto principale l'ozono O₃ nella troposfera (dalla superficie terrestre fino a 10.000-15.000 m di altitudine), originato da reazioni di NO_x e HC, in presenza di un'intensa radiazione solare. Questo ozono troposferico "cattivo", causa di disturbi alla respirazione, non va confuso con quello "buono" che manca nel cosiddetto buco dell'ozono a livello della stratosfera^{12.3}).

	Ambito locale (10 km)	Ambito regionale (> 100 km)	Ambito globale* (> 1000 km)
Effetti	Salute, smog fotochimico	Ossidanti, piogge acide	Cambiamenti climatici (potenziale riscaldamento terrestre)
Piombo	●		
Particolato organico	●		
Ossidi di zolfo	●	●	
Ossidi d'azoto	●	●	● 7
Ozono	●	●	
Idrocarburi	●	●	● 11
Monossido di carbonio		●	● 3
Metano			● 23
Biossido di carbonio			● 1
Protossido d'azoto			● 296
Clorofluorocarburi**			● 4600 ÷ 14.000
Esaffluoruro di zolfo			● 22.200

* I valori dei cambiamenti climatici sono riferiti al biossido di carbonio preso uguale a 1 e vengono valutati in un orizzonte temporale di 100 anni.

** Altri gruppi di gas serra aventi valori elevati sono gli idrofluorocarburi (HFC) e i perfluoro-carburi (PFC).

Fig. 12.7 - Effetti delle emissioni dovute alle attività umane (riferite al biossido di carbonio posto uguale a 1).

La limitazione degli inquinanti primari viene stabilita in funzione della **qualità dell'aria** (*air quality*), e cioè del livello di soglia di quel determinato inquinante primario, come il CO, oppure secondario, come l'ozono, al di là del quale si manifestano dei rischi per la salute delle persone. Vengono così limitate^{12.7} le concentrazioni in aria di biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo e particolato.

12.7 - Secondo l'Organizzazione mondiale della sanità (World Health Organization, WHO) le concentrazioni sono: 25 µg/m³ (3 giorni/anno) e 10 µg/m³ per PM2,5, 50 µg/m³ (3 giorni/anno) e 20 µg/m³ per PM10, 100 µg/m³ per O₃, 200 µg/m³ (in un'ora) e 40 µg/m³ (in un anno) per NO₂.

In Europa, le emissioni di molti inquinanti sono sostanzialmente diminuite dal 1990 con un miglioramento della qualità dell'aria; altri inquinanti, come particolato e biossido di azoto (NO_2), sono scesi (*Figura 12.8*) ma non così tanto come sarebbe dovuto avvenire a seguito della progressiva diminuzione dei limiti di emissioni allo scarico dei veicoli. Inoltre una percentuale notevole di persone vive ancora in città dove alcuni limiti della qualità dell'aria, stabiliti per la protezione della salute, sono superati; così risulta difficile rispettare in numerosi Paesi uno o più limiti di quattro importanti inquinanti dell'aria (ossidi di azoto, composti organici volatili, biossido di zolfo e ammoniaca).

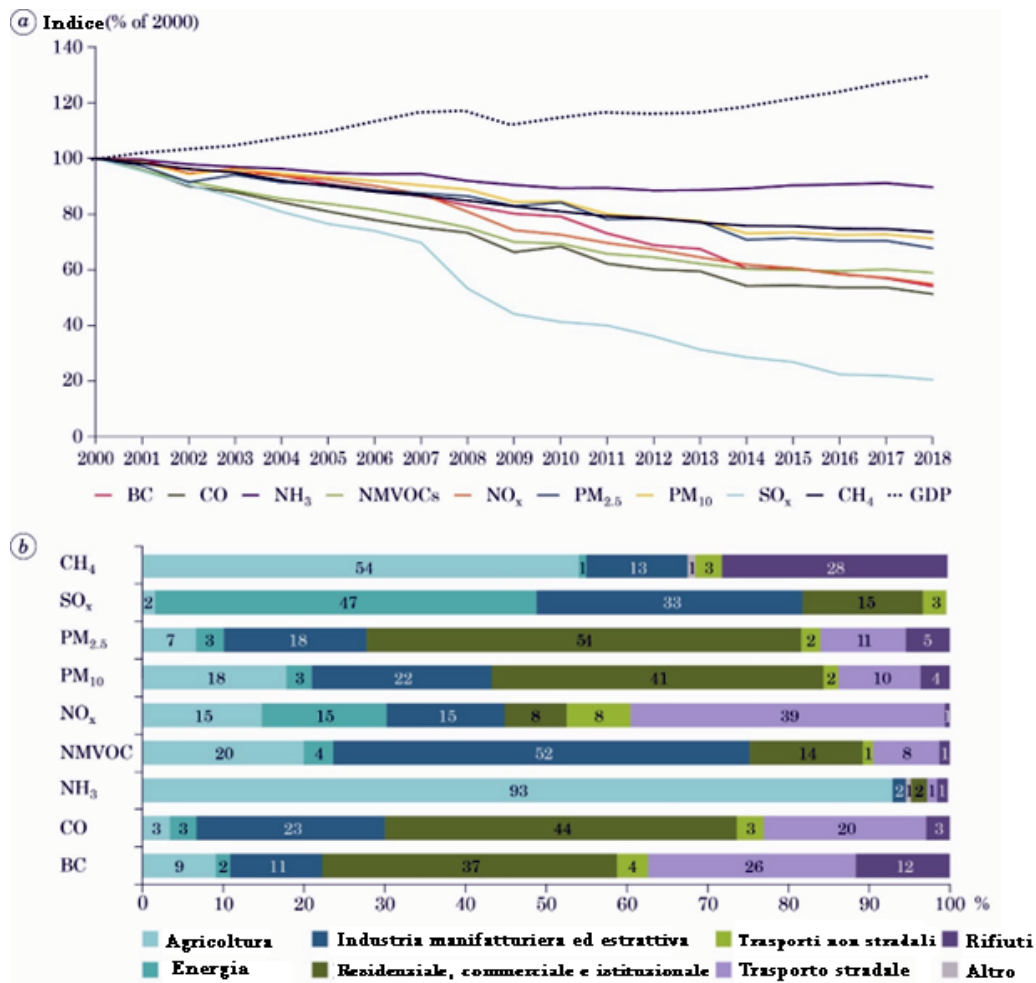


Fig. 12.8 - Emissioni^{12.8} di CH_4 , SO_x , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NH_3 (ammoniaca), NMVOC (composti organici non-metanici volatili), CO e BC (*black carbon*).

a) Evoluzione delle emissioni nell'Unione Europea, 2000-2018 (% riferito ai livelli 2000). Per confronto, si è riportata la variazione del prodotto interno lordo (*gross domestic product*, GDP).

b) Contributi alle emissioni nell'Unione Europea dei principali settori di attività nel 2018. Si sono considerati solo quei settori che contribuiscono per più dello 0,5% alle emissioni totali di ciascun inquinante.

12.8 - I dati delle emissioni degli inquinanti e dell'energia, inclusi i gas serra, sono tratti dai rapporti periodici dell'Agenzia dell'ambiente europea (*European Environment Agency, EEA*) su qualità dell'aria e statistiche dell'energia.

12.3 Risparmio energetico e cambiamenti climatici

La riduzione del consumo di combustibile si ottiene aumentando l'efficienza del sistema che converte, ad esempio, l'energia termica del combustibile nell'energia elettrica di un alternatore oppure nel lavoro meccanico disponibile all'asse di un motore a combustione interna. Requisito fondamentale, al quale deve sottostare il progetto di ciascuna macchina e di ciascun impianto, è il **risparmio energetico** (*energy saving*) con esso realizzabile in modo da limitare il consumo di quella data fonte di energia. Questo non vale solo per il motore di un'automobile, del quale si vuole ovviamente limitare il consumo di benzina, ma anche per una pompa che, venendo trascinata da un motore elettrico, ha bisogno dell'energia fornita dalla centrale termoelettrica; anzi, le considerazioni di risparmio energetico vanno viste in un quadro complessivo: una migliore efficienza di conversione dell'energia idraulica in energia elettrica e un maggior ricorso alle energie rinnovabili innovative determinano infatti, su scala nazionale, una minore richiesta di energia elettrica generata con impianti termici.

È proprio in questo contesto che il risparmio energetico diventa necessario per evitare i **cambiamenti climatici** (*climate changes*) provocati principalmente dalle emissioni di biossido di carbonio (o anidride carbonica), vista l'importanza che ancora hanno i combustibili fossili come fonti di energia primaria (*Figura 12.1*). Anzi, la riduzione del CO₂ va considerata il principale risultato del risparmio energetico. Così, nelle statistiche sull'uso dell'energia, l'emissione di biossido di carbonio è diventata uno dei fattori più importanti da tenere sotto controllo insieme agli inquinanti dannosi per la salute umana (*Scheda 12.1*). Ad esempio, nel motore a combustione interna un rendimento elevato è accompagnato da alte temperature di combustione. Tuttavia alte temperature di combustione portano a valori elevati di ossidi di azoto; occorre così trovare un compromesso fra due termini tra loro in conflitto: NO_x e CO₂. La ricerca di un maggior rendimento si applica a tutte le macchine! Anche se è possibile raggiungere rendimenti elevati con i cicli combinati (*Paragrafo 10.13*) e con sistemi *total energy* (*Paragrafo 10.14*), si può stimare che complessivamente l'energia primaria raggiunga l'utilizzatore finale con un rendimento di 0,25; cioè un quarto dell'energia entrante viene effettivamente utilizzato. Questo lascia uno spazio notevole nel miglioramento del rendimento di conversione dell'energia nelle macchine a fluido, nei diversi settori di applicazione^{12.9}: industria, residenziale, servizi e trasporti.

Il rapporto tra il biossido di carbonio e l'energia consumata si aggira attorno a 2,5 CO₂ Mg/toe (tonnellate di CO₂ diviso la tonnellata di petrolio equivalente): un valore maggiore indica un largo ricorso ai combustibili fossili, come nel caso di quei Paesi in cui vi sono molte centrali termoelettriche alimentate a carbone, mentre un valore più basso di 2,5 indica un maggior peso di fonti di energia non legate a combustibili fossili. Nel caso della Francia il ricorso all'energia nucleare per generare l'elettricità porta questo rapporto a 1,5 CO₂ Mg/toe.

12.9 - Per il miglioramento del rendimento nelle trasformazioni dell'energia si citano, come esempio, l'etichettatura energetica per i sistemi di riscaldamento nelle abitazioni e per gli elettrodomestici secondo diverse classi e la classificazione delle abitazioni secondo diverse categorie di risparmio energetico richiesto dalla direttiva sulle prestazioni energetiche degli edifici.

Il protocollo di Kyoto^{12.10} sul cambiamento climatico rappresenta un primo passo nella riduzione del riscaldamento globale (*global warming*): è l'impegno dei Paesi più industrializzati nel ridurre le emissioni di gas serra, responsabili del riscaldamento globale. Benché vi siano opinioni diverse su quello che dovrebbe essere nel lungo periodo un livello sostenibile di CO₂ per il settore dell'energia, l'Unione Europea e gli altri Paesi si sono posti come obiettivo un limite massimo di aumento della temperatura globale di 2 °C. Per non superare il limite di 2 °C, la concentrazione dei gas serra nell'atmosfera andrebbe stabilizzata a un livello equivalente a 450 ppm di CO₂ contro l'attuale valore di 370 ppm. L'aggettivo "equivalente" sta a indicare che le emissioni di ciascun gas serra vanno espresse in termini di CO₂; così, ad esempio, nel caso di un'automobile che usa il gas naturale come combustibile e in 1000 km di percorso emette 90 kg di CO₂ e 0,3 kg di CH₄, il CO₂ equivalente sarà:

$$90 \text{ kg CO}_2 + 0,3 \text{ kg CH}_4 \times 23 \text{ kg CO}_2/\text{kg CH}_4 = 96,9 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}$$

poiché (*Figura 12.7*) le emissioni di metano equivalgono a 23 volte quelle del biossido di carbonio in un orizzonte temporale di 100 anni.

Alle conferenze delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici a Parigi (2015) e a Glasgow (2021), i Paesi hanno sottoscritto un accordo internazionale per ridurre le emissioni di gas serra di tutti i Paesi sviluppati e in via di sviluppo. In primo luogo, si è concordato di ridurre progressivamente l'uso del carbone, che costituisce la maggiore sorgente di CO₂. L'accordo comprende un sistema più trasparente di conteggio delle emissioni, valido per tutti i Paesi, in modo da arrivare a un limite globale dell'aumento della temperatura media dell'atmosfera ben al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con l'impegno di fare ogni sforzo per mantenere questo aumento entro 1,5 °C. I Paesi sviluppati e le economie emergenti dovranno presentare ogni due anni un rapporto sui dati nazionali di gas serra e sulle azioni in corso per la loro riduzione.

Le emissioni medie di biossido di carbonio pro capite riflettono le differenze nei livelli di consumo di energia tra Paesi sviluppati e Paesi emergenti. Nel 2018 il consumo medio di energia [gigajoule pro capite] dei Paesi sviluppati era più di tre volte quello delle economie emergenti: 170 GJ/capite contro 50 GJ/capite (in termini di CO₂: 9 tonnellate/capite contro 3,5 tonnellate/capite). Negli Stati Uniti, la persona media consuma 12 volte più energia della persona media in India. Vi è una relazione molto stretta tra qualità della vita e con-

12.10 - Il protocollo di Kyoto è un trattato internazionale riguardante il riscaldamento globale sottoscritto nella città giapponese di Kyoto l'11 dicembre 1997 da più di 160 Paesi nell'ambito della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici. Esso contiene l'impegno di gran parte dei Paesi industrializzati a ridurre mediamente del 5% le emissioni di sei gas a effetto serra, responsabili del riscaldamento del pianeta. I gas considerati sono (*Figura 12.7*):

- biossido di carbonio (CO₂);
- metano (CH₄);
- protossido di azoto (N₂O);
- idrofluorocarburi (HFC);
- perfluorocarburi (PFC);
- esafluoruro di zolfo (SF₆).

Il protocollo di Kyoto è successivo al protocollo di Montreal, trattato internazionale del 16 settembre 1987, volto a ridurre la produzione e l'uso di quelle sostanze, come i clorofluorocarburi (CFC), che minacciano lo strato di ozono.

sumo di energia. Secondo le Nazioni Unite, un aumento del consumo di energia fino a 100 GJ/capite è associato con un aumento sostanziale del progresso.

L'aumento delle emissioni di carbonio (*Figura 12.9*) indica la necessità di un insieme di misure per raggiungere più bassi livelli di carbonio nell'atmosfera. Questa riduzione deve essere in linea con gli obiettivi di Glasgow: stabilizzare nel lungo periodo la concentrazione di gas serra nell'atmosfera a 450 parti per milione di CO₂ equivalente [ppm CO₂-eq]. Circa due terzi della riduzione del CO₂ risiede nella sostanziale riduzione del carbonio nel settore della generazione di potenza che occupa un ruolo centrale nel sistema globale dell'energia dovuto alla progressiva elettrificazione del pianeta.

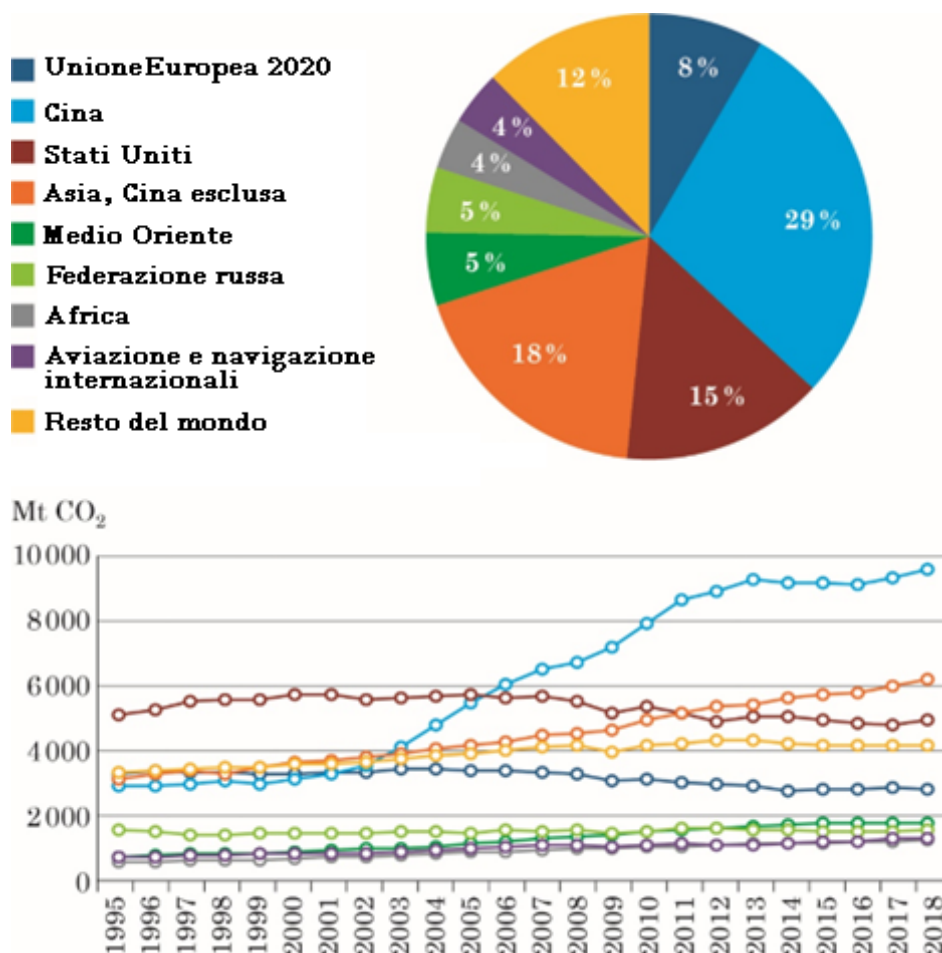


Fig. 12.9 - Emissioni mondiali di CO₂ per regione in milioni di tonnellate [Mt] dal 1995; emissioni totali di CO₂ nel 2018: 33.513 Mt (1 Mt = 106 × 106 g = 1012 g = 109 kg).

Il settore di generazione di potenza è la maggiore sorgente delle emissioni di CO₂. Le emissioni di CO₂ dall'industria e dalle costruzioni costituiscono un'altra parte consistente, mentre il contributo del trasporto è decisamente modesto. La progressiva riduzione delle emissioni di carbonio dovrebbe considerare la combinazione dei seguenti interventi:

- aumento del rendimento nella conversione dell'energia;

- spostamento verso i combustibili a basso tenore di carbonio;
- rapida crescita delle rinnovabili;
- potenziamento dei processi di sequestro del carbonio (*Figura 12.6*).

SINTESI

L'evoluzione della *domanda globale di energia primaria* è condizionata da due elementi principali:

1. lo spostamento della domanda dai centri tradizionali, i Paesi occidentali, alle economie emergenti;
2. la transizione energetica verso un mix di combustibili a basso tenore di carbonio, guidata dal gas naturale e dalle rinnovabili.

Gli *inquinanti primari* che si formano nella combustione dei combustibili fossili sono gli ossidi di azoto, il monossido di carbonio, i composti organici volatili, il particolato e gli ossidi di zolfo.

I principali interventi per limitare l'immissione dei *gas serra* e in particolare del biossido di carbonio CO₂ nell'atmosfera sono:

- passare a combustibili con minor contenuto di carbonio e/o aumentare l'impiego di fonti di energia rinnovabile;
- aumentare il rendimento di conversione e/o utilizzazione dell'energia nella trasformazione del combustibile fossile;
- sequestrare il biossido di carbonio dall'atmosfera.

Gli inquinanti primari possono reagire nell'atmosfera dando luogo a *inquinanti secondari* rappresentati da:

- *precipitazioni acide*, costituite da *solfati e nitrati*;
- *smog fotochimico*, che ha per prodotto principale l'*ozono*.

Il *risparmio energetico* richiede che il progetto di ciascuna macchina e di ciascun impianto venga realizzato in modo da limitare il consumo di energia. Esso diventa necessario per evitare i *cambiamenti climatici* provocati principalmente dalle emissioni di *biossido di carbonio*.

VERIFICA DEI PREREQUISITI

1. Il kilowattora [kW·h] e la tonnellata di petrolio equivalente [toe] sono ambedue unità di misura dell'energia nel sistema SI. Vero Falso
2. Per convertire il kilowattora [kW·h] in megajoule [MJ] occorre moltiplicare per:
a) 1 b) 3,6 c) 10
3. 1 tonnellata di petrolio equivalente [toe] è pari a 41,868 gigajoule [GJ]. Vero Falso
4. 440 Tg (teragrammi) di biossido di carbonio corrispondono a:
a) 440 milioni di tonnellate di CO₂ c) 440 × 10⁹ kg di CO₂
b) 440 × 10¹² g di CO₂ d) 440 × 10⁶ Mg di CO₂
5. 3929 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (3929 × 10⁶ toe) corrispondono a:
a) 93,5 PJ c) 165 × 10⁹ × 10⁹ J
b) 165 × 10⁹ GJ d) 165 EJ
6. Riportare di seguito alcune fonti di energia non rinnovabile:
..... e alcune fonti di energia rinnovabile:
.....
7. Il biossido di carbonio (CO₂) alla temperatura di 0 °C e alla pressione atmosferica è un:
a) gas b) liquido c) solido
8. La formula chimica del vapor d'acqua scaricato da impianti che bruciano combustibili fossili è:
a) H₂O b) H₂O₂ c) HO₂
9. I due gas principali che compongono l'aria sono (nome e formula chimica)
e
10. Gli idrocarburi sono dei composti inerti. Vero Falso

VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

1. La domanda di energia delle economie emergenti (Cina, India) ha superato quella dei Paesi occidentali. Vero Falso
2. Quale dei tre combustibili fossili ha il minor contenuto di carbonio:
a) carbone b) gas naturale c) petrolio
3. Il maggior contributo alla crescita delle fonti rinnovabili è stato dato dall'energia
..... e dall'energia

4. Disponi in ordine decrescente le energie rinnovabili elencate di seguito in funzione del loro attuale contributo in Italia:
 a) bioenergia b) idroelettrica c) solare d) eolica
5. Elencare di seguito gli inquinanti primari che si formano nella combustione dei combustibili fossili:
6. Il prodotto della combustione dei combustibili fossili che, per le enormi quantità scaricate nell'atmosfera, dà il maggior contributo ai cambiamenti climatici è
7. Elencare i principali interventi da farsi per limitare l'immissione del biossido di carbonio nell'atmosfera:
-
 -
 -
8. I due principali inquinanti secondari sono: e
9. Il risparmio energetico è necessario per evitare i provocati principalmente dalle emissioni di biossido di carbonio (CO₂).
10. Il rapporto tra le tonnellate [Mg] di CO₂ e le tonnellate di petrolio equivalente [toe] si aggira nei vari Paesi attorno a
11. Il valore al quale si vuole limitare l'aumento della temperatura mondiale è:
 a) 0,2 °C
 b) 2 °C
 c) 20 °C
12. Scrivere i nomi di alcuni gruppi di gas serra:
13. Il CO₂ equivalente [CO₂-eq] a un'emissione di 400 kg di biossido di carbonio e 1,0 kg di metano vale:
 a) 42,3 CO₂-eq
 b) 423 CO₂-eq
 c) 4230 CO₂-eq