



ITALIAN PHYSICAL SOCIETY  
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

# "L'energia nella scuola"

Enzo De Sanctis  
INFN-Laboratori Nazionali di Frascati  
Società Italiana di Fisica

# Il Progetto

PUBBLICAZIONE DI FASCICOLI SULLE PIÙ IMPORTANTI E PROMETTENTI FONTI ENERGETICHE, LE LORO POTENZIALITÀ E I LORO PROBLEMI.

SCOPO: **DIDATTICO/FORMATIVO** PER STUDENTI/INSEGNANTI  
**INFORMATIVO** PER UN PUBBLICO PIÙ VASTO.

IL TESTO È **ELEMENTARE**: I CONCETTI E GLI ASPETTI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI SONO PRESENTATI IN MANIERA **SEMPLIFICATA**, TALE DA NON RICHIEDERE UNA SPECIFICA CONOSCENZA SU ALCUNO DEGLI ARGOMENTI TRATTATI.

I FASCICOLI SONO PUBBLICATI COME NUMERI SPECIALI DEL "**GIORNALE DI FISICA**", LA RIVISTA DELLA SIF PER GLI INSEGNANTI DELLE SCUOLE.

# Obiettivo

- PROMUOVERE L'APPROCCIO SCIENTIFICO NEL DIBATTITO SUI PROBLEMI DELL'ENERGIA.
- EVIDENZIARE LE POTENZIALITÀ DELLA FISICA E DELLA CHIMICA PER LO SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE, TRASFORMAZIONE, TRASMISSIONE E RISPARMIO DELL'ENERGIA.
- STIMOLARE L'INTERESSE DEI GIOVANI PER LA RICERCA E LA SPERIMENTAZIONE SCIENTIFICA ILLUSTRANDO LE NUOVE ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO IN CORSO NEL CAMPO ENERGETICO.

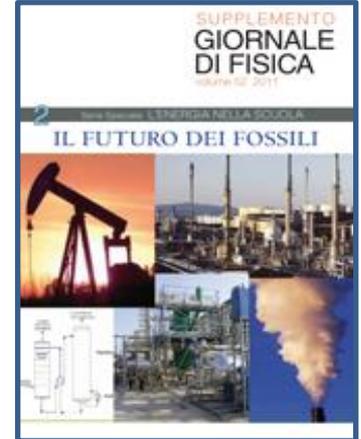
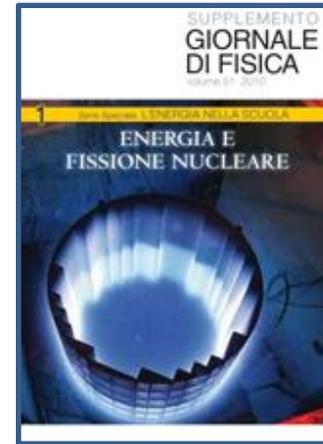
**Iniziativa congiunta SIF-SCI**

**Istituzioni coinvolte: AIF, INFN, ENEA, INGV**

# Il piano editoriale

## I Fascicoli previsti

1. Energia nucleare da fissione.
2. Il Futuro delle fonti fossili.
3. CO<sub>2</sub>: rifiuto o risorsa.
4. Fotovoltaico.
5. Fonti perenni naturali (idroelettrico, geotermico, eolico, solare termodinamico).
6. Produzione e trasporto dell'energia.  
Efficienza energetica.
7. Energia dalle biomasse.
8. Pile ed accumulatori: l'energia portatile.
9. Energia nucleare da fusione.



# Tre livelli di lettura

- IL **TESTO NORMALE** illustra in modo elementare e didattico la materia trattata.
- **GLI APPROFONDIMENTI** di argomenti specifici a beneficio dei lettori più curiosi.
- I **QUADRI DI SINTESI** evidenziano, con linguaggio semplice e autoconsistente, i punti salienti degli argomenti trattati. La loro lettura permette di farsi un'idea corretta e essenziale dei temi trattati
- Gli **Esempi** per approfondire in modo quantitativo alcuni aspetti particolarmente importanti.
- Il **Glossario** (termini tecnici, unità di misura, sigle, acronimi, ...)

# Energia e Fissione Nucleare

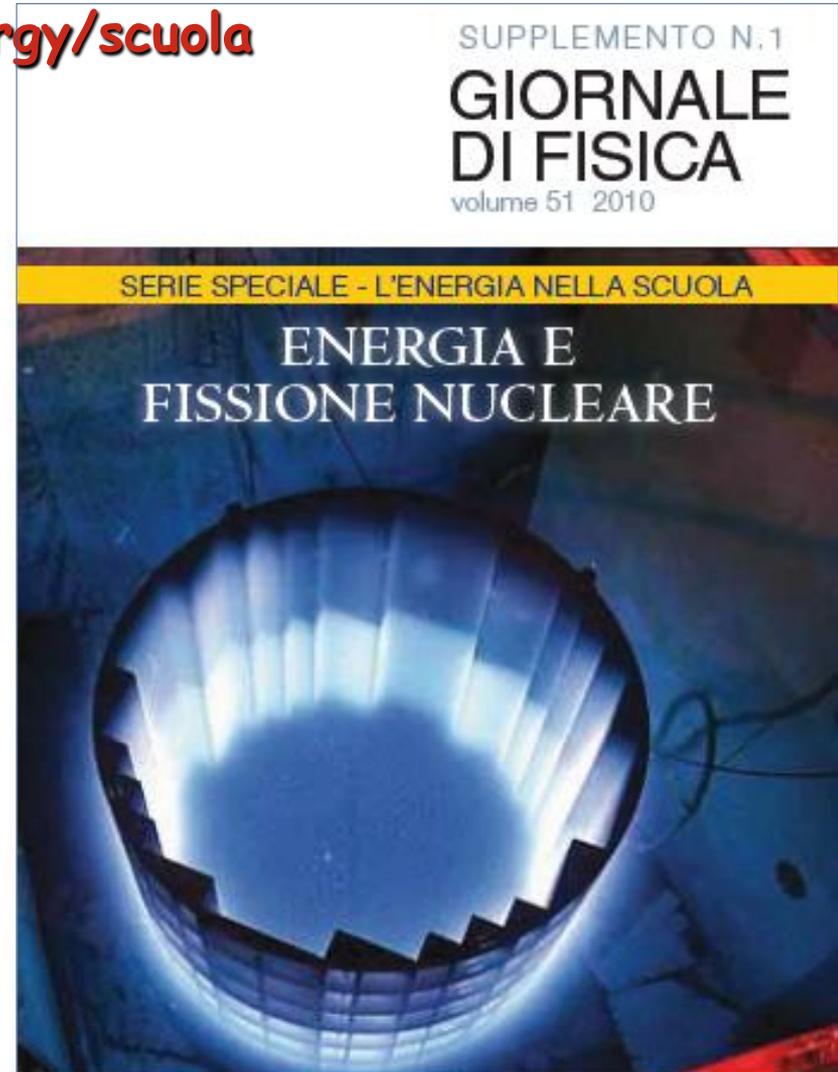
[www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola](http://www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola)

Stampato, con contributo del MIUR, in 6000 copie che verranno **distribuite gratuitamente alle scuole** tenendo conto della uniforme copertura di tutte le Regioni.

Per ricevere copie a stampa gli Istituti scolastici interessati devono **registrarsi al sito web**.

La versione elettronica è **scaricabile in accesso libero dal sito web**.

**Totale downloads dal 29 marzo:  
876 (circa 5 al giorno)**



# Sommario

PREFAZIONE

PREMESSA

**2 Capitoli, 9 Approfondimenti,  
24 Esempi, 12 Quadri di sintesi,  
2 Appendici, 1 Glossario.**

1. FISICA NUCLEARE E RADIOATTIVITÀ	9
1.1 Al cuore della materia	9
1.1.1 L'atomo	9
Approfondimento: Visualizzare gli atomi	11
1.1.2 Il nucleo	12
Approfondimento: Densità nucleare	14
1.2 La forza nucleare forte e la stabilità dei nuclei	15
1.3 L'energia di legame nucleare	18
1.4 Le reazioni nucleari	24
1.5 Nuclei instabili e radioattività	26
1.6 Tempo di dimezzamento, vita media, attività	28
Approfondimento: Famiglie radioattive	30
1.7 Radioattività naturale e artificiale	33
Approfondimento: Effetti biologici delle radiazioni. Dosimetria	35
1.8 Applicazioni delle radiazioni ionizzanti in medicina, industria e ricerca	40
Approfondimento: Metodi di datazione	41

2. ENERGIA DA FISSIONE NUCLEARE	45
2.1 La Fissione nucleare	45
Approfondimento: La cattura di neutroni su uranio	48
2.2 La reazione a catena	49
2.3 Applicazioni energetiche della fissione nucleare	53
2.3.1 La fisica del reattore	53
2.3.2 Il reattore nucleare termico	54
Approfondimento: Il rallentamento dei neutroni	57
2.3.3 Tipi di reattori nucleari	60
Approfondimento: Le generazioni di reattori nucleari	63
2.4 Il ciclo del combustibile	67
2.5 Riserve naturali di combustibile nucleare e loro utilizzo	69

2.6 Sicurezza degli impianti nucleari	72
2.7 Gestione dei rifiuti radioattivi	74
2.7.1 Gestione dei materiali a bassa e media attività	75
2.7.2 Gestione dei materiali ad alta attività	77
2.7.3 Sviluppi della ricerca	78
Approfondimento: Volume dei rifiuti radioattivi	79
2.8 Nuove frontiere: Ricerca e Sviluppo	82
2.9 Formazione	83

Appendice A: Proliferazione nucleare	87
Appendice B: I tre referendum del 1987 sul nucleare in Italia	87

Crediti iconografici	90
----------------------	----

Glossario	91
-----------	----

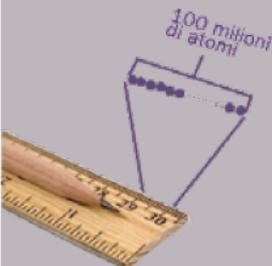
## INDICE DEI QUADRI DI SINTESI

Quadro 1: L'atomo	10
Quadro 2: Nuclei stabili. Isotopi e isotoni	17
Quadro 3: L'equivalenza massa-energia	24
Quadro 4: La radioattività	27
Quadro 5: Radioattività naturale e artificiale	34
Quadro 6: Effetti delle radiazioni sull'uomo	38
Quadro 7: La fissione nucleare e la reazione a catena	52
Quadro 8: Reattori nucleari	60
Quadro 9: Eventi storici della fissione nucleare	66
Quadro 10: Energia nucleare	69
Quadro 11: La sicurezza nucleare	74
Quadro 12: I rifiuti radioattivi	81

# QUADRO 1: L'ATOMO

## QUADRO 1: L'ATOMO

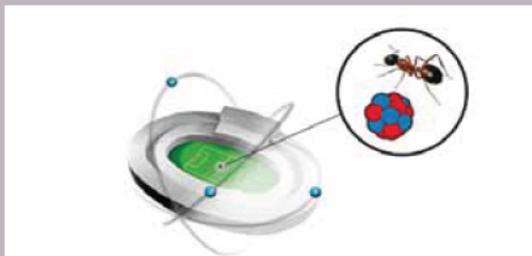
Gli atomi hanno dimensioni molto piccole, con diametri di qualche decimo di nanometro; per formare un segmento lungo un centimetro occorrerebbe metterne in fila cento milioni.



Tuttavia sono molto numerosi: mettendo in fila uno accanto all'altro gli atomi che formano un granello di sale\*, si potrebbe coprire una distanza pari a quella tra la Terra e il Sole (raggio medio dell'orbita 150 milioni di chilometri ( $1,5 \cdot 10^{11}$  m)).

Nel nucleo è praticamente concentrata tutta la massa dell'atomo: per esempio, nell'atomo più semplice, l'idrogeno (formato da 1 protone e 1 elettrone), il nucleo ha una massa circa 1836 volte più grande di quella dell'elettrone, precisamente  $1,67262 \cdot 10^{-27}$  kg contro  $9,109 \cdot 10^{-31}$  kg. Nell'atomo naturale più complesso, l'uranio (formato da 92 protoni, 146 neutroni e 92 elettroni), il nucleo ha una massa circa 4750 volte più grande di quella dei 92 elettroni.

Gli atomi sono fatti soprattutto di vuoto: i nuclei hanno dimensione dell'ordine di  $10^{-15}$  m, mentre le distribuzioni elettroniche sono relativamente molto grandi (con dimensioni di circa  $10^{-10}$  m). Mantenendo queste proporzioni, se il nucleo fosse grande come una formica al centro di uno stadio, le distribuzioni elettroniche occuperebbero uno spazio che arriva fin sugli spalti!



©INFN 2009, riprodotta per gentile concessione da Asimmetrie, anno 4, numero 9/9.00

\* In una mole di una qualsiasi sostanza (ossia in una quantità della sostanza il cui peso espresso in grammi è uguale al suo peso molecolare) ci sono  $6,022 \cdot 10^{23}$  molecole e ogni molecola è formata, a sua volta, da uno o più atomi legati insieme da forze elettriche.

$$R_{\text{atomo}} = 100'000 R_{\text{nucleo}}$$

$$M_{\text{nucleo}} = (3670 \quad 4750) M_{\text{elettroni}}$$

$$(m_n - m_p) / (m_n + m_p) < 0,13\%$$

$$\text{Densità nucleare} \sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

## QUADRO 3: L'EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

### QUADRO 3: L'EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

L'energia di un oggetto fermo,  $E$ , è legata alla sua massa  $M$  dalla relazione  $E=Mc^2$ , dove  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s è la velocità della luce nel vuoto.

La massa può trasformarsi in energia e viceversa. La quantità di energia che si produce trasformando la massa è enorme perché essa viene moltiplicata per  $c^2$ , un numero grandissimo. La *fusione*, cioè l'unione di due nuclei leggeri in uno più pesante, è energeticamente favorevole per i nuclidi più leggeri, e la *fissione*, cioè la scissione di un nucleo pesante in due nuclei di massa circa metà, per quelli più pesanti.

La bilancia di sinistra in figura mostra che la somma delle masse di due nuclei leggeri (per esempio deuterio,  $^2\text{H}_1$ , e trizio,  $^3\text{H}_1$ ) è maggiore della somma delle masse dei prodotti della loro fusione (elio,  $^4\text{He}_2$ , più un neutrone). La reazione di fusione converte in energia la massa mancante.

La bilancia di destra mostra invece che per atomi medi e pesanti la somma delle masse dei due nuclei medi (per esempio stronzio,  $^{90}\text{Sr}_{38}$ , e xenon,  $^{139}\text{Xe}_{54}$ ) più due neutroni è minore di quella del nucleo pesante (uranio,  $^{236}\text{U}_{92}$ ) che con la sua fissione li ha generati. In questo caso è la reazione di *fissione* che converte la massa mancante in energia.



$$E = \Delta m \cdot c^2$$

# QUADRO 5: RADIOATTIVITÀ NATURALE E ARTIFICIALE

## QUADRO 5: RADIOATTIVITÀ NATURALE E ARTIFICIALE

Le radiazioni sono da sempre una componente dell'ambiente naturale e pertanto una gran parte della dose di radiazioni che riceviamo è inevitabile. Noi conviviamo con questa radioattività ambientale che è naturale, ma non meno pericolosa (o benefica) di quella artificiale.

Una parte di tutti gli elementi di cui è composta la Terra, noi stessi inclusi, è costituita da nuclei instabili. Essi sono destinati, nel tempo, a trasformarsi in specie stabili. Nel processo di decadimento vengono emesse radiazioni (tra cui il radon,  $^{222}\text{Rn}$ , che oggi viene considerato con particolare attenzione) che costituiscono una parte della radioattività naturale.

Oltre alle radiazioni provenienti dal decadimento dei nuclei instabili, siamo bombardati anche dalle radiazioni provenienti dall'esterno della Terra ("radiazione cosmica").

### Radioattività naturale



In aggiunta alle radiazioni provenienti dai nuclei instabili naturali e alla radiazione cosmica, esistono altre sorgenti di radiazioni prodotte artificialmente dall'uomo. Si tratta di nuclei instabili ottenuti nei reattori a fissione come prodotti della scissione dell'uranio e del plutonio, in esplosioni di bombe termonucleari o per irraggiamento di nuclei stabili. La produzione di questi ultimi è legata al loro impiego in medicina per diagnostica e terapia e in numerose altre applicazioni.

Vanno infine ricordate le macchine radiogene (generatori di raggi X, acceleratori di particelle) usate in medicina diagnostica e terapeutica, nell'industria e per la ricerca scientifica.

### Radioattività artificiale



È bene notare che anche il corpo umano è radioattivo, grazie ad alcuni elementi che vi sono contenuti (per esempio uranio nelle ossa) o che mangiamo, come il potassio contenuto, per esempio, nelle banane e nei fagioli.

# QUADRO 10: ENERGIA NUCLEARE

1 kg Uranio = 22000 kg carbone  
45000 kg legna  
15000 kg olio  
14000 kg gas

## Quadro 10: ENERGIA NUCLEARE

Una centrale elettronucleare non è molto diversa da una centrale termoelettrica a combustibili fossili, l'unica differenza è che per produrre energia "brucia" uranio (o altro materiale fissile) invece che carbone o gas o olio combustibile.

La fissione nucleare è una straordinaria sorgente di energia: la fissione di 1 kg di uranio in un reattore nucleare tipico (reattore LWR a ciclo aperto) libera un'energia equivalente a quella rilasciata da circa 45000 kg di legna, 22000 kg di carbone, 15000 kg di olio combustibile e 14000 kg di gas liquido.

Grazie alla sua alta densità energetica, la fissione nucleare produce una quantità relativamente modesta di rifiuti per unità di energia prodotta.

A titolo esemplificativo, dal trattamento degli elementi di combustibile annualmente bruciati in

un reattore moderato e raffreddato ad acqua di 1000 MW<sub>e</sub> (reattore LWR a ciclo chiuso) si ottengono circa 15-35 metri cubi di rifiuti liquidi che, una volta solidificati e condizionati, possono essere ridotti a 2 o 3 metri cubi di rifiuti ad altissima radioattività.

A parità di potenza nominale un impianto nucleare occupa una superficie molto più piccola di quella di un impianto a energia solare (~1/10) o di un impianto a energia eolica (~1/800). Allo stato attuale delle tecnologie e tenendo conto delle efficienze di esercizio e della disponibilità di sole e vento, un impianto nucleare di 900 MW<sub>e</sub> produce in un anno la stessa quantità di energia di 70 chilometri quadrati di pannelli solari o alcune migliaia di mulini a vento.



1 kg di uranio



= 22000 kg di carbone

# Il Glossario

131 voci, 13 pagine

## **Acqua pesante**

È acqua con una quantità di atomi di deuterio molto maggiore di quella nell'acqua normale. Il deuterio è l'isotopo pesante dell'idrogeno il cui nucleo contiene un neutrone oltre al solo protone dell'isotopo più diffuso. L'acqua pesante è usata come refrigerante e moderatore nei reattori a acqua pesante in pressione (PHWR) perché le sue proprietà consentono l'uso di uranio naturale come combustibile. L'acqua pesante costituisce meno dell'1% dell'acqua presente in natura e deve essere separata e concentrata in appositi impianti per l'uso nei reattori nucleari.

**ADS:** acronimo di *Accelerator Driven System*.

Sistema di acceleratori di particelle accoppiati a reattori nucleari per la trasmutazione dei residui radioattivi allo scopo di abbreviare l'emivita delle scorie, permettendo un ulteriore recupero energetico. L'Italia è coinvolta seriamente in alcuni di tali progetti.

## **Agenzia per il Nucleare e la Sicurezza nazionale**

Istituita con la legge n. 99/2009, l'Agenzia è l'autorità nazionale responsabile per la sicurezza nucleare, in linea con le analoghe istituzioni a livello internazionale. Il suo compito è esercitare il potere di regolamentazione tecnica in materia e intervenire nei procedimenti di attualizzazione degli impianti.

# Il fascicolo N. 2

Suppl. 1

vol. 53  
2011

## GIORNALE DI FISICA

della  
Società Italiana di Fisica

Serie Speciale **L'ENERGIA NELLA SCUOLA**  
numero 2

### IL FUTURO DELLE FONTI FOSSILI

A cura di Stefano Rossini



Enzo De Sanctis: Incontri di Fisica 2011  
Bologna

Società Italiana di Fisica

#### SOMMARIO

PREFAZIONE	5
1. COSA SONO LE FONTI FOSSILI	7
1.1 Gas naturale	12
Approfondimento 1: Gas naturale liquefatto (GNL)	16
1.2 Petrolio	22
Approfondimento 2: La ricerca del giacimento in laboratorio	31
1.3 Carbone	34
2. LE RISERVE MONDIALI	37
2.1 Riserve di gas naturale	38
2.1.1 Riserve convenzionali	38
2.1.2 Riserve non convenzionali	41
<i>a. Tight natural gas</i>	42
<i>b. Shale gas</i>	42
<i>c. Coalbed methane</i>	43
<i>d. Natural gas from geopressurized zones</i>	44
<i>e. Deep natural gas</i>	44
<i>f. Gas hydrates</i>	45
2.1.3 Conclusioni: tiriamo le somme	47
2.2 Riserve di petrolio	48
2.2.1 Riserve convenzionali	49
2.2.2 Riserve non convenzionali	50
<i>a. Extra heavy oil and tar sands</i>	51
<i>b. Oil shale</i>	54
<i>c. Petrolio che viene dal freddo</i>	56
2.2.3 Conclusioni: tiriamo le somme	58
2.3 Riserve di carbone	58
3. LA PREVISIONE DEL FUTURO	61
3.1 La richiesta di energia nel mondo	62
3.2 La situazione energetica italiana	73
3.3 La teoria del picco	75
3.4 Gli scenari	79
Appendice A	85
Appendice B	88
Glossario	89

# Il fascicolo N. 3

SOMMARIO

Suppl. 2

vol. 53  
2011

## GIORNALE DI FISICA

della  
Società Italiana di Fisica

Serie Speciale L'ENERGIA NELLA SCUOLA  
numero 3

### CO<sub>2</sub>: RIFIUTO O RISORSA? RECUPERO, CONFINAMENTO ED UTILIZZAZIONE DEL CO<sub>2</sub>

A cura di Michele Aresta  
Dipartimento di Chimica e CIRCC  
Università degli studi, Bari



PREFAZIONE	5
1. PRODUZIONE DI ENERGIA DA FOSSILI A BASE DI CARBONIO: EFFETTI DELLA EMISSIONE DI CO <sub>2</sub>	7
1.1 Il ciclo del carbonio	12
1.2 La fissazione naturale del CO <sub>2</sub>	13
1.3 Dissoluzione del CO <sub>2</sub> nelle acque	15
1.4 Accumulo del CO <sub>2</sub> in atmosfera	16
2. TECNOLOGIE DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO <sub>2</sub> E DELLA SUA IMMISSIONE IN ATMOSFERA	17
2.1 Sostituzione di combustibili	17
2.2 Aumento della efficienza nella produzione di energia	21
2.3 Aumento della efficienza nell'utilizzo di energia	22
2.4 Utilizzo di energie perenni	23
2.5 Utilizzo di energie rinnovabili	24
2.6 Energie alternative: il nucleare	25
2.7 Integrazione di fonti energetiche	25
3. SEPARAZIONE DI CO <sub>2</sub> DA GAS EMESSI DA CENTRALI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E DA IMPIANTI INDUSTRIALI: LA TECNOLOGIA CCS	27
3.1 Separazione del CO <sub>2</sub> dai gas di combustione	28
3.1.1 Utilizzo di ammine liquide: monoetanolammina-MEA	29
3.1.2 La tecnologia "oxy-fuel"	31
3.2 Destino del CO <sub>2</sub> separato	32
3.3 Trasporto del CO <sub>2</sub> separato	33
3.4 Confinamento del CO <sub>2</sub> separato	34
3.4.1 Confinamento in pozzi esausti di gas naturale, coal-beds e acquiferi	34
3.4.2 Eliminazione negli oceani	36
3.4.3 Fissazione del CO <sub>2</sub> in carbonati inorganici	38
3.4.4 Stabilità del CO <sub>2</sub> confinato e condizioni per il confinamento	40
3.4.5 Stato dell'arte delle varie tecnologie di sconfinamento	41

## Indice fascicolo N. 3

4. I DIVERSI ASPETTI DELLA UTILIZZAZIONE DEL CO <sub>2</sub>	43
4.1 Le condizioni di utilizzo del CO <sub>2</sub>	44
4.2 Le fonti del CO <sub>2</sub> ed il suo valore	46
4.3 Utilizzo tecnologico del CO <sub>2</sub>	47
4.4 Utilizzo del CO <sub>2</sub> supercritico	50
4.5 Fissazione industriale in biomassa acquatica	51
4.6 Conversione del CO <sub>2</sub> per la sintesi di prodotti chimici utilizzati come "stoccaggio" di energia elettrica in eccesso o di energie intermittenti	56
4.7 Processi termici per la riduzione del CO <sub>2</sub>	57
4.8 Riduzione foto-catalitica del CO <sub>2</sub>	58
4.9 Produzione di prodotti chimici	59
4.9.1 Sintesi di intermedi e prodotti di chimica fine	60
4.9.2 Sintesi di prodotti energetici	63

Conclusioni

Glossario

Indice dei C

Quadro 1: I varie fonti	5
Quadro 2: C	12
Quadro 3: Il fattore 3,67	13
Quadro 4: Equilibri del CO <sub>2</sub> in fase acquosa	15
Quadro 5: Solubilità del CO <sub>2</sub> (mL/mL)	15
Quadro 6: Efficienza energetica	18
Quadro 7: Energia e ossidazione	18
Quadro 8	19
Quadro 9	21
Quadro 10: Frazione di C usato, economia di atomi, carbon-footprint	45
Quadro 11: Analisi del ciclo di vita-LCA	45

[www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola](http://www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola)