

**Daniele Cocco** è professore ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente presso la Facoltà di Ingegneria e Architettura dell'Università di Cagliari, dove insegna Macchine e Sistemi Energetici, Termodinamica e Macchine e Tecnologie delle Energie Rinnovabili nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Chimica, Ambientale, Elettrica ed Elettronica ed Energetica e dove per oltre 10 anni è stato docente di Impatto Ambientale dei Sistemi Energetici.

Svolge la sua attività di ricerca prevalentemente nell'ambito dei sistemi e delle tecnologie di conversione industriale dell'energia, delle relative interazioni con l'ambiente e dell'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili.

**Pierpaolo Puddu** è professore ordinario di Macchine a Fluido presso la Facoltà di Ingegneria e Architettura dell'Università di Cagliari, dove insegna Macchine a Fluido nell'ambito del Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica e dove per oltre 10 anni è stato docente di Dinamica e Controllo dei Sistemi Energetici e di Oleodinamica e Pneumatica. La sua attività di ricerca si inquadra prevalentemente nel settore delle turbomacchine e delle tecnologie delle energie rinnovabili.

Questo volume è dedicato alla nostra carissima amica Chiara Palomba, professore associato di Macchine a Fluido presso la Facoltà di Ingegneria e Architettura dell'Università di Cagliari, che ci ha lasciato il 15 Maggio del 2015, a soli 47 anni.

D. Cocco - P. Puddu

TECNOLOGIE  
DELLE ENERGIE RINNOVABILI

# TECNOLOGIE DELLE ENERGIE RINNOVABILI



€ 28,00  
IVA COMPRESA

ISBN 978-88-89884-33-1

## *Prefazione*

*Mercoledì 2 Gennaio 2008, nel corso della sua prima seduta annuale, alla Borsa di New York il petrolio ha superato per la prima volta la fatidica quotazione dei 100 dollari al barile. Si tratta di una soglia che in realtà è stata per mesi in procinto di essere raggiunta e che nei mesi successivi è stata ampiamente superata, ma che assume un indubbio valore simbolico. Il continuo aumento del prezzo del petrolio, unitamente alla presa di coscienza dei rischi legati al progressivo esaurimento delle riserve di fonti fossili ed alla consapevolezza dei danni arrecati all'ambiente per effetto del loro utilizzo, primo fra tutti l'aumento dell'effetto serra, mantengono molto alto il livello di attenzione dell'opinione pubblica, degli operatori economici e dei decisori politici nei confronti delle tematiche connesse alla produzione di energia.*

*Negli ultimi tempi, infatti, i provvedimenti normativi e gli accordi a livello internazionale in materia di riduzione delle emissioni di gas serra, risparmio energetico e promozione delle fonti energetiche rinnovabili si susseguono a ritmi incalzanti. A tal proposito si può ricordare la recente Conferenza delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici tenutasi a Bali dal 3 al 14 Dicembre 2007, nella quale pur in assenza di precisi impegni vincolanti (peraltro fortemente auspicati dall'Unione Europea), è stata comunque definita una "roadmap" per la riduzione delle emissioni di gas serra. A conferma del suo ruolo di apripista mondiale in questo settore, agli inizi del 2008 la Commissione Europea ha presentato un piano d'azione per tagliare entro il 2020 del 20% le emissioni di gas serra, per ridurre del 20% il consumo di energia primaria e per portare il contributo delle fonti rinnovabili al 20% del fabbisogno energetico interno. A livello nazionale, negli articoli dedicati all'energia, la legge finanziaria*

per il 2008 ed il suo collegato hanno introdotto novità di rilievo al sistema degli incentivi alle fonti energetiche rinnovabili e agli interventi di risparmio energetico.

Nell'ambito di un così dinamico contesto, questo volume nasce principalmente come supporto didattico per gli allievi del corso di "Tecnologie delle Energie Rinnovabili", che dal 2003 viene proposto nei Corsi di Laurea appartenenti all'area dell'Ingegneria Industriale dell'Università di Cagliari. In relazione alle sue finalità ed alla consapevolezza che l'argomento trattato è molto vasto e in continua evoluzione, il volume vuole fornire le informazioni di base, i principi di funzionamento, le prestazioni fondamentali e le prospettive di sviluppo delle principali tecnologie oggi disponibili nel settore delle energie rinnovabili. Gli autori coltivano tuttavia la speranza che il volume possa risultare utile non solo agli studenti universitari, ma anche ai tecnici, agli utenti e a tutti coloro che sono semplicemente interessati all'affascinante mondo delle fonti energetiche rinnovabili.

Come risulta chiaro dall'indice, il volume si articola in sette capitoli a carattere sostanzialmente monografico, che nel loro insieme analizzano le più importanti tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

In particolare, il primo capitolo è volto ad inquadrare, all'interno di una cornice unitaria, gli aspetti energetici, economici e ambientali del settore delle rinnovabili. Vengono infatti illustrate le caratteristiche salienti del sistema di approvvigionamento energetico, con una breve sintesi dei principali dati statistici sulla produzione e sul consumo di energia in Italia, in Europa e nel mondo. Successivamente, vengono richiamati gli elementi fondamentali degli attuali meccanismi di incentivazione delle fonti rinnovabili, con particolare riferimento ai Certificati Verdi ed al Conto Energia. Infine, il capitolo si chiude con alcuni sintetici richiami agli aspetti economici e di impatto ambientale.

I successivi capitoli sono dedicati, nell'ordine, all'energia eolica, all'energia idraulica, all'energia solare, all'energia delle biomasse, all'energia geotermica e all'energia delle maree e del moto ondoso. Per ciascuna fonte energetica sono riportati i principi di funzionamento delle tecnologie oggi disponibili, le potenzialità di utilizzo, le prestazioni fondamentali, le nozioni basilari per impostare un dimensionamento di massima, unitamente agli elementi necessari per una valutazione economica e ambientale di tipo preliminare.

Gli Autori fanno fin da ora ammenda per gli errori che inesorabilmente, dopo aver letto e riletto a sei occhi le varie bozze, si presenteranno quando si aprirà ad una pagina a caso la prima copia stampata del volume<sup>⊗</sup>.

Cagliari, febbraio 2008

Daniele Cocco  
Chiara Palomba  
Pierpaolo Puddu

---

<sup>⊗</sup> Legge di Jones sull'editoria:

“Gli errori si vedranno solo dopo che il libro sarà stato stampato”

Corollario di Black:

“La prima pagina che l'autore guarderà è quella con il peggiore errore”

## *Prefazione alla II Edizione*

Alla luce della sperimentazione condotta attraverso la pubblicazione della prima edizione del volume “Tecnologie delle energie rinnovabili” siamo in grado di rassicurare i lettori circa la perfetta validità della Legge di Jones sull’editoria citata nelle pagine precedenti.

In questa seconda edizione del volume abbiamo pertanto cercato di eliminare i piccoli errori che erano presenti nella prima edizione, nella speranza di averli eliminati tutti e di non averne introdotti di nuovi. Anche se sono trascorsi solo poco più di due anni dalla prima edizione, abbiamo inoltre aggiornato tutti i dati relativi alle statistiche energetiche e la normativa inerente i meccanismi di incentivazione delle fonti rinnovabili. Infine, nel tentativo di migliorare la qualità del volume e grazie alla disponibilità dell’editore, gran parte delle figure in questa seconda edizione sono state stampate a colori.

Cagliari, ottobre 2010

Daniele Cocco  
Chiara Palomba  
Pierpaolo Puddu

## *Prefazione alla III Edizione*

Negli ultimi anni il settore delle energie rinnovabili ha vissuto una fase di forte evoluzione tecnologica e normativa. A distanza di 6 anni dalla precedente, in questa nuova edizione del volume “Tecnologie delle energie rinnovabili” abbiamo pertanto aggiornato, per quanto possibile, le statistiche energetiche e le principali normative del settore.

In questa terza edizione del volume abbiamo inoltre ampliato in maniera significativa il capitolo sull'energia solare, introducendo due nuove sezioni dedicate al solare termodinamico e al fotovoltaico a concentrazione, due tecnologie che hanno assunto in questi ultimi anni un crescente interesse. Abbiamo anche introdotto uno specifico capitolo dedicato all'accumulo energetico, di grande interesse proprio in relazione al continuo aumento della produzione di energia da impianti non programmabili, come quelli eolici e fotovoltaici.

Abbiamo ancora una volta cercato di eliminare i piccoli errori che erano presenti nella seconda edizione e che non mancheranno neppure in questa edizione. Infine, grazie alla disponibilità dell'editore, tutto il volume è stato stampato a colori.

Purtroppo, all'inizio dei lavori di questa nuova edizione, il 15 Maggio del 2015, a soli 47 anni, la nostra carissima amica Chiara ci ha lasciato.

Questo volume lo dedichiamo a te, Chiara.

Cagliari, Febbraio 2016

Daniele Cocco  
Pierpaolo Puddu



# INDICE

<b>Prefazione</b> .....	VII
<b>CAPITOLO 1 – LA STRUTTURA DEL SISTEMA ENERGETICO E LE FONTI RINNOVABILI</b> .....	1
1.1 I consumi di energia in Italia e nel mondo .....	4
1.2 La struttura del sistema elettrico .....	8
1.3 Gli incentivi alle fonti energetiche rinnovabili .....	16
1.4 L’analisi di fattibilità per gli impianti IAFR .....	23
1.5 L’impatto ambientale degli impianti IAFR .....	33
<b>CAPITOLO 2 – L’ENERGIA EOLICA</b> .....	37
2.1 L’energia del vento .....	40
2.2 L’analisi anemometria .....	42
2.3 Massima potenza estraibile dal vento .....	57
2.4 Prestazioni dei convertitori eolici a resistenza .....	63
2.5 Prestazioni dei convertitori eolici a portanza .....	66
2.6 Il coefficiente di potenza rotorico .....	71
2.7 Valutazione della produzione di energia .....	80
2.8 Le caratteristiche delle turbine eoliche .....	86
2.9 L’analisi economica degli impianti eolici .....	91
2.10 Impatto ambientale degli impianti eolici .....	95
<b>CAPITOLO 3 – L’ENERGIA IDRAULICA</b> .....	103
3.1 Le prestazioni degli impianti idroelettrici .....	107

---

3.2 Classificazione degli impianti idroelettrici .....	112
3.3 Valutazione delle risorse idrauliche .....	116
3.4 Scelta e dimensionamento dell'impianto .....	121
3.5 Le opere di adduzione dell'acqua alla turbina .....	125
3.6 Le turbine idrauliche .....	133
3.7 L'analisi economica degli impianti idroelettrici .....	147
3.8 Impatto ambientale degli impianti idroelettrici .....	148
<b>CAPITOLO 4 – L'ENERGIA SOLARE .....</b>	<b>151</b>
4.1 La radiazione solare .....	151
4.1.1 L'irraggiamento solare extra-terrestre .....	151
4.1.2 La determinazione della traiettoria solare.....	156
4.1.3 L'irraggiamento su di una superficie orizzontale al suolo .....	160
4.1.4 L'irraggiamento su di una superficie comunque orientata .....	166
4.2 Gli impianti solari termici .....	175
4.2.1 Tipologia e caratteristiche dei collettori solari .....	176
4.2.2 Le prestazioni dei collettori solari.....	180
4.2.3 Tipologia e caratteristiche degli impianti solari termici .....	186
4.2.4 Metodologie di dimensionamento degli impianti solari termici	196
4.3 Gli impianti solari termodinamici .....	203
4.3.1 Il campo solare .....	210
4.3.2 L'impianto motore termico .....	226
4.3.3 L'accumulo termico .....	229
4.3.4 Dimensionamento di un impianto CSP .....	232
4.4 Gli impianti fotovoltaici .....	235
4.4.1 Il rendimento degli impianti fotovoltaici.....	243
4.4.2 Il dimensionamento degli impianti fotovoltaici.....	246
4.4.3 Il fotovoltaico a concentrazione .....	250

---

<b>CAPITOLO 5 – L’ENERGIA DELLE BIOMASSE</b> .....	255
5.1 Il meccanismo di fotosintesi clorofilliana .....	259
5.2 Le filiere di conversione energetica .....	262
5.3 La filiera delle biomasse ligno-cellulosiche .....	267
5.3.1 Gli impianti di riscaldamento alimentati a biomassa .....	274
5.3.2 Gli impianti di generazione elettrica alimentati a biomassa .....	279
5.4 La filiera del biodiesel .....	286
5.5 La filiera del bioetanolo .....	290
5.6 La filiera del biogas .....	295
<b>CAPITOLO 6 – L’ENERGIA GEOTERMICA</b> .....	303
6.1 Gli impianti geotermoelettrici .....	306
<b>CAPITOLO 7 – L’ENERGIA DEL MOTO ONDOSO E L’ENERGIA DELLE MAREE</b> .....	315
7.1 La risorsa energetica .....	317
7.2 Le caratteristiche del moto ondoso .....	320
7.2.1 Traiettorie delle particelle fluide e potenza dell’onda .....	325
7.2.2 Caratteristiche reali delle onde marine .....	328
7.3 I convertitori di energia del moto ondoso .....	331
7.4 L’energia delle maree .....	341
7.4.1 Principio di conversione dell’energia delle maree .....	342
7.4.2 Gli impianti per lo sfruttamento dell’energia delle maree .....	344
7.5 Analisi economica degli impianti di conversione dell’energia marina .....	346
7.6 Impatto ambientale degli impianti di conversione dell’energia marina .....	348
<b>CAPITOLO 8 – L’ACCUMULO DELL’ENERGIA</b> .....	351
8.1 Accumulo di energia meccanica .....	357

---

8.1.1 Impianti idroelettrici di pompaggio .....	357
8.1.2 Impianti di accumulo ad aria compressa .....	361
8.1.3 Volani.....	368
8.2 Accumulo di energia elettrica .....	373
8.2.1 Supercapacitori .....	373
8.2.2 Magneti superconduttori .....	376
8.2.3 Accumulatori elettrochimici .....	378
8.3 Accumulo di energia chimica .....	386
8.3.1 Impianti di accumulo con idrogeno .....	387
8.3.2 Accumulo con combustibili di sintesi .....	394
8.4 Accumulo di energia termica .....	395
8.4.1 Accumulo per calore sensibile .....	396
8.4.2 Accumulo per calore latente .....	401
8.4.3 Accumulo termochimico .....	405
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	407