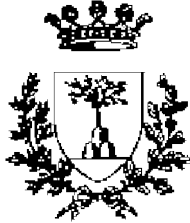


Università degli Studi di Ferrara



CORSO DI LAUREA IN SCIENZE NATURALI

VALUTAZIONE DEL BILANCIO ENERGETICO  
NELLA PRODUZIONE DI ENERGIA  
DA FONTI RINNOVABILI

Relatore:  
*Dott. Mirco Andreotti*

Laureando:  
*Elisa Samorì*

A.A. 2009/2010



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>iv</b>
<b>1 Combustibili fossili</b>	<b>1</b>
1.1 Caratteristiche generali . . . . .	2
1.2 Sostanze prodotte . . . . .	3
1.2.1 Il problema della CO <sub>2</sub> . . . . .	3
1.2.2 Acidificazione degli oceani . . . . .	4
1.2.3 Polveri sottili . . . . .	5
1.3 Altre problematiche . . . . .	5
1.4 Politica europea e incentivi italiani . . . . .	6
<b>2 Biomassa e biocombustibili</b>	<b>9</b>
2.1 Descrizione . . . . .	9
2.2 Filiera energetica . . . . .	10
2.2.1 Reperimento . . . . .	10
2.2.2 Processi di trasformazione . . . . .	11
2.2.3 Sistemi energetici . . . . .	13
2.3 Impianti che utilizzano biomassa: centrale a biogas, l'esempio di Bondeno . . . . .	14
2.3.1 Caratteristiche dell'impianto . . . . .	15
2.3.2 Materie prime utilizzate e produzione di biogas . . . . .	15
2.3.3 Fabbisogno di terreni . . . . .	16
2.4 Impianti che utilizzano biomassa: centrale a biodiesel . . . . .	16
2.4.1 Fabbisogno di terreni . . . . .	17
2.5 Consumi per lavorazione terreni . . . . .	17
2.5.1 Centrale a biogas . . . . .	18
2.5.2 Centrale a biodiesel . . . . .	19
2.5.3 Consumi a confronto . . . . .	20
2.6 Problematiche e azoto . . . . .	20
2.6.1 Ruolo dell'azoto nel cambiamento climatico . . . . .	21

---

<b>3</b>	<b>Fotovoltaico</b>	<b>23</b>
3.1	Caratteristiche . . . . .	23
3.1.1	Funzionamento . . . . .	24
3.2	Superficie produzione tradizionale . . . . .	25
3.2.1	Stima dell'energia prodotta da un impianto fotovoltaico . . . . .	25
3.2.2	Superfici fotovoltaico e fabbisogno energetico . . . . .	27
3.3	Modello fotovoltaico con accumulazione di idrogeno . . . . .	30
3.4	Problematiche . . . . .	33
3.4.1	Ciclo solare . . . . .	33
3.4.2	Albedo . . . . .	33
3.4.3	Tellururo di Cadmio . . . . .	34
3.4.4	Riciclo . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Efficienze energetiche a confronto</b>	<b>37</b>
4.1	Energia solare . . . . .	38
4.2	Efficienze di conversione dell'energia solare . . . . .	39
4.3	Confronto delle efficienze di riconversione solare . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>50</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>51</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>53</b>

# Introduzione

L'utilizzo di combustibili fossili come fonte di energia sta senza dubbio influenzando l'equilibrio della Terra in termini di concentrazione in atmosfera di anidride carbonica e altri inquinanti pericolosi per il pianeta stesso e, ovviamente, anche per l'uomo. Gli effetti dovuti all'inquinamento del pianeta non sono assolutamente facili da valutare, tanto meno da prevedere. Un esempio molto importante é il riscaldamento globale, che ancora non trova d'accordo studiosi ed esperti di tutti il mondo. Alcune tesi lo attribuiscono come un effetto dell'aumento di inquinanti atmosferici, altre tesi lo considerano come una fase del normale ciclo del clima della Terra, che si sarebbe già verificata, in maniera analoga, nel Medio Evo. Ricerche e studi in questi campi sono di fondamentale importanza, ma non si può avere la certezza di quando arriveranno le risposte e se arriveranno.

Oltre all'inquinamento i combustibili fossili, in particolare il petrolio, presentano un altro problema molto grave, sono limitati e con gli attuali ritmi di sfruttamento, con tendenza all'aumento, il rischio di esaurimento in un futuro non molto lontano, dovrebbe non essere affatto trascurato.

Nonostante le numerose domande senza risposta che ancora circondano queste problematiche, l'indirizzarsi verso azioni preventive é sicuramente un comportamento guidato dal buon senso, nonché dalla Scienza. Con lo scopo di ridurre le emissioni inquinanti, la ricerca ha introdotto nuove tecnologie basate su energie rinnovabili, che sono caratterizzate da cicli energetici ad impatto ambientale molto ridotto. Tra le svariate tecnologie di energie rinnovabili, in questa tesi vogliamo concentrare l'attenzione in particolare sulla biomassa e sul fotovoltaico.

La politica e l'economia a livello Europeo e Mondiale dedicano alle energie rinnovabili una legislazione che ne incentiva lo sviluppo e l'utilizzo con il fine di arrivare a ridurre la concentrazione di anidride carbonica e di inquinanti atmosferici al di sotto di limiti fissati da accordi internazionali. Sembrerebbe però non esserci un controllo centralizzato sulla proliferazione di impianti che danno diritto a incentivi e contributi. Questa osservazione deriva dal notare come impianti completamente diversificati nascano in luoghi ancor più diversificati sia da un punto di vista ambientale che degli insediamenti antropici circostanti. Per fare un esempio, il buon senso suggerirebbe di installare un impianto a biomassa che utilizzi scarti combustibili come legna, segatura etc etc in una zona che sia caratterizzata da insediamenti industriali di questo tipo.

Il quesito che principalmente ci si pone in questo lavoro di tesi é quanto sia conveniente dedicare ingenti estensioni di terreni, prima utilizzati per generi alimentari, esclusivamente per la coltivazione di piantagioni che serviranno per la produzione di biocombustibile per centrali a biomassa.

Il crescente fabbisogno energetico mondiale sembra mettere in secondo piano quesiti di questo tipo, al fine di determinare soluzioni per aumentare sempre di piú la produzione di energia. Questo é sicuramente un problema molto importante per i paesi sviluppati, ma l'aumento della produzione di energia da parti di questi per se stessi non risolve di certo i problemi che affliggono i paesi sottosviluppati, nei quali si lotta contro la fame ogni giorno. Queste considerazioni dovrebbero far riflettere e invitare tutti ad un uso responsabile del territorio e ad una pianificazione rigida e particolareggiata.

Con i risultati di questa tesi speriamo di fornire suggerimenti utili per costruire le risposte che cerchiamo. Mostriamo infatti come un impianto fotovoltaico sia decisamente piú efficiente di una centrale a biomassa, consentendo quindi la produzione della stessa energia prodotta da una centrale a biomassa equivalente, ma lasciando allo stesso tempo circa un 90% di terreni liberi da utilizzare per la produzione di generi alimentari.

Prima di fornire questi risultati faremo alcune considerazioni e approfondimenti sulla questione degli inquinanti atmosferici, illustreremo le principali tecnologie di produzione di energia elettrica da biomassa e da fotovoltaico e confronteremo le varie soluzioni basandoci su esempi concreti.

La tesi si articola nei seguenti capitoli:

**Capitolo 1** In questo primo capitolo, in seguito ad una classificazione delle fonti di energia, si parlerá delle problematiche connesse all'uso di combustibili fossili: in modo particolare verranno prese in considerazione l'aumento della CO<sub>2</sub> in atmosfera, l'acidificazione degli oceani, l'emissione di polveri sottili ed in fine la progressiva diminuzione dei combustibili fossili come il petrolio.

**Capitolo 2** Il capitolo é incentrato sulla biomassa con particolare attenzione alla filiera energetica che porta all'utilizzo di questa in apposite centrali. Partendo dagli esempi di bondeno si passerá poi alle considerazioni pratiche sul fabbisogno di terreno per soddisfare le richieste degli impianti, mettendo infine in luce i consumi collegati alla lavorazione di questi.

**Capitolo 3** Questo terzo capitolo é dedicato alla alternativa del fotovoltaico in modo tale da poter effettuare una stima della superficie di produzione, dell'energia prodotta e valutare infine le problematiche annesse: in modo particolare ogni valutazione verrà fatta tenendo conto

che la richiesta di energia può variare nell'arco della giornata e che la produzione di energia é condizionata dal periodo dell'anno e della giornata stessa.

**Capitolo 4** In questo ultimo capitolo verranno valutate e confrontate le efficienze dei tre tipologie di produzione di energia.

**Capitolo 5** Conclusioni.

**Ringraziamenti** Si ringraziano il Comune di Bondeno (Fe) ed Energy Renew S.r.l. per aver fornito materiale utile agli studi presentati.





# Capitolo 1

## Combustibili fossili

Quando parliamo di fonti di energia facciamo riferimento a qualche cosa di fisico che può essere trasformato, mediante diversi processi, in una o più forme di energia, le quali a volte possono essere convertite una nell'altra.

Un esempio di conversione può essere rappresentato dalla trasformazione dell'energia elettromagnetica del Sole in energia elettrica attraverso l'utilizzo di pannelli fotovoltaici.

In merito alle fonti di energia vengono solitamente proposte due classificazioni le quali possono essere individuate come:

- fonti primarie / secondarie.
- fonti non rinnovabili / rinnovabili.

Per quanto riguarda la prima tipologia di classificazione, per primarie si intendono tutte quelle fonti che sono presenti direttamente in natura, ad esempio petrolio, carbone, gas naturale, vento, energia solare, mentre per secondarie tutte quelle non direttamente presenti ma piuttosto ricavabili dalle fonti primarie attraverso metodi di trasformazione.

La seconda tipologia di classificazione fa invece riferimento alle caratteristiche intrinseche della risorsa dalla quale ricaviamo energia, facendo una distinzione tra le risorse finite, ovvero quelle non rinnovabili, come carbone, petrolio, gas naturali, uranio e quelle la cui reperibilità non viene minacciata dallo sfruttamento della risorsa stessa, definite quindi rinnovabili, come la luce solare. Prendiamo ora in considerazione un tipo di fonte primaria ma non rinnovabile ovvero i combustibili fossili.

L'energia che essi forniscono è utilizzata in sistemi a combustione e per funzionamento di motori per la produzione di energia elettrica.

In particolare i dati statistici su valori di produzione e consumo di energia elettrica in Italia, sono redatti e pubblicati da Terna [33], l'ente che si occupa a partire dal 2000 tramite la gestione di un sito specializzato chiamato GSE, dal quale è stato possibile ricavare alcuni dati inerenti al nostro Paese.

Secondo Terna la produzione elettrica netta in Italia nel 2009 è da attestarsi sui 221102 GWh complessivi, dei quali la maggior parte deriva dall'utilizzo di combustibili fossili.

Parlando invece di consumo a livello mondiale di energia primaria, secondo i dati riportati in *Energia per l'astronave Terra*[1], questo si aggirerebbe attorno ai 400 EJ dei quali 300 EJ deriverebbe dai combustibili fossili.

## 1.1 Caratteristiche generali

Parlando di fonti di energia primaria Armaroli e Balzani [1] riportano le seguenti percentuali riferite alla produzione mondiale di energia.

- petrolio 35%
- carbone 25%
- gas naturale 21%
- biomassa 10%
- energia nucleare 6,5%
- idroelettrico 2%
- nuove e rinnovabili 0,5%

Dai dati risulta chiaro che oltre l'80% dell'energia che il mondo utilizza deriva dai combustibili fossili.

Per combustibili fossili intendiamo tutti quei combustibili che derivano da processi di carbogenesi di materia organica, ovvero una trasformazione chimica che si attua nel corso di ere geologiche e che inizia col seppellimento della materia organica stessa, in condizioni di scarsa ossigenazione. Grazie alla carbogenesi si assiste ad una progressiva diminuzione di elementi come ossigeno, azoto ed idrogeno a favore di un aumento del tenore di carbonio all'interno della materia organica seppellita; maggiore è la durata del processo, maggiore sarà la quantità di carbonio riscontrabile. I derivati di questo lentissimo processo si presentano quindi secondo tre stati di aggregazione: solido (carbone), liquido (petrolio) e gassoso (gas naturale).

Ciò che risulta evidente è la lentezza del processo di formazione, che rappresenta il motivo principale per cui queste risorse sono considerate finite e non rinnovabili: una volta esaurito il combustibile fossile, prima di poterne disporre in quantità significative dovranno passare milioni di anni.

I motivi per cui questi tipi di combustibili sono stati enormemente sfruttati nel tempo sono da ricercare nelle loro caratteristiche intrinseche: essi infatti presentano un alto rapporto energia / volume, sono facilmente trasportabili ed immagazzinabili, soprattutto possono essere utilizzati con macchinari relativamente semplici. Accanto a questi vantaggi si presentano al contempo problematiche non trascurabili imputabili all'utilizzo, le quali rappresentano il motivo per cui si è alla costante ricerca di soluzioni energetiche alternative.

## 1.2 Sostanze prodotte

### 1.2.1 Il problema della CO<sub>2</sub>

Una prima conseguenza dell'utilizzo dei combustibili fossili è l'incremento della quantità di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, considerata oggi la causa primaria del riscaldamento globale, inoltre i combustibili fossili sono riconosciuti come inquinanti anche a causa dell'emissione di gas come l'anidride solforosa, ovvero SO<sub>2</sub>, la quale assieme alla CO<sub>2</sub> sta determinando un problema conosciuto come acidificazione degli oceani.

L'aumento di anidride carbonica in atmosfera è la diretta conseguenza della trasformazione chimica che si attua dal momento in cui i combustibili fossili sono fatti reagire con l'ossigeno che si trova nell'aria, ovvero al momento della combustione: i legami chimici C-C e C-H tenderanno quindi a rompersi a favore dei legami ovvero C-O e H-O che sono alla base della formazione di anidride carbonica ed acqua.

In merito si possono fare alcune considerazioni sulla benzina, la quale è ottenuta dalla lavorazione del petrolio: 1 g di essa, dal momento in cui reagisce con l'ossigeno, sviluppa una quantità di calore stimabile attorno a 47.8 kJ e genera come prodotti di reazione acqua e 3.08 g di CO<sub>2</sub>. Il primo dato particolarmente interessante che si ricava è che per ottenere energia attraverso la benzina si produce una quantità di anidride carbonica pari a 3 volte il peso stesso del combustibile, significa che per ogni gallone vengono emessi in atmosfera 8.8 kg di CO<sub>2</sub>.

Ai ritmi attuali di consumo di combustibile, ogni anno vengono immessi in atmosfera quasi 30 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub>, la quale rappresenta sicuramente una quantità considerevole soprattutto se si considerano le implicazioni: se questi valori dovessero aumentare ulteriormente, la conseguenza diretta sarebbe un aumento medio della temperatura globale, che oltre a essere causa di un cambiamento climatico rilevante determinerebbe anche l'aumento dei livelli del mare [1].

In riferimento a questi si stima che un raddoppio della concentrazione di CO<sub>2</sub> potrebbe comportare un aumento medio di 3 °C, come riportato da Armaroli e Balzani [1].

Alcuni dati riguardanti la concentrazione di CO<sub>2</sub> vengono inoltre riportati dalla rivista *Le Scienze* [25], il quale mette in luce che ad oggi la concentrazione di CO<sub>2</sub> sarebbe di 387 ppm. In merito si discute su quali siano i livelli complessivi di gas serra in grado di causare cambiamenti pericolosi: i valori ipotizzati sono compresi tra 350 e 550 ppm di CO<sub>2</sub> e (ovvero anidride carbonica equivalente la quale esprime la concentrazione di tutti i gas serra combinanti).

L'obiettivo che ci si pone, e che spinge a cercare valide soluzioni alternative, sarebbe quello di far rientrare questi valori al di sotto di 350 ppm.

I primi dati scientifici dell'aumento della CO<sub>2</sub> nell'atmosfera risalgono al 1957, ma solo nel 1992 al convegno di Rio de Janeiro l'organismo creato appositamente, ovvero l'IPCC [2] (*International Panel on Climate Change*), produce un accordo che mira alla riduzione delle emissioni dei gas serra e tale accordo viene modificato ed approvato a Kyoto nel 1997: questo protocollo prevede quindi la diminuzione delle emissioni entro il 2012 di una percentuale compresa tra il 5% ed il 10 % ri-

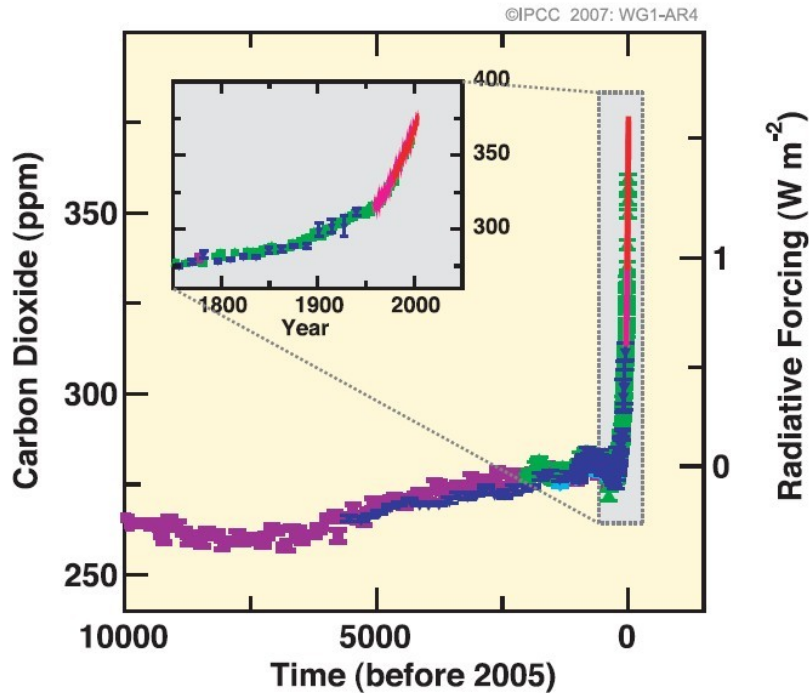


Figura 1.1: Aumento della concentrazione di  $\text{CO}_2$  in atmosfera secondo le rilevazioni del IPCC [2].

petto ai valori di riferimento del 1990.

### 1.2.2 Acidificazione degli oceani

Un altro degli effetti collaterali prodotti dall'anidride carbonica, come già accennato, sarebbe l'acidificazione degli oceani: la  $\text{CO}_2$  che entra nell'oceano diminuisce la disponibilità di ioni di carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e riduce il pH marino.

Il pH che normalmente si riscontra negli oceani si attesta su valori di 8.16, per cui possiamo dire che essi tendono ad essere basici: in seguito a questo processo di acidificazione il valore sta lentamente calando portandosi a 8.05 come riscontrato dai ricercatori dello *Scripps Institution of Oceanography*[16]. Questi cambiamenti nella chimica possono ostacolare la capacità di una grande varietà di organismi marini, come i coralli a formare le loro strutture protettive e a calcificarsi. I ricercatori ritengono infatti che, in fasi cruciali della vita di molti invertebrati marini, l'acidi-

ficazione degli oceani inibisce la calcificazione e, inoltre, sembra influire sulla riproduzione e la crescita.

Grazie alla sensibilità all'acidificazione, questi organismi possono essere utilizzati come indicatori per valutare il cambiamento chimico, soprattutto attraverso la valutazione del livello di aragonite presente (un minerale utilizzato nel processo di costruzione delle strutture protettive). In questo caso è possibile individuare come valore limite di saturazione 2.75 ppm: i valori attuali riportano un 2.90 ppm mentre quelli preindustriali 3.44 ppm e ciò dimostra come l'acidificazione stia rendendo meno accessibile questo composto per gli organismi [17].

### 1.2.3 Polveri sottili

L'uso dei combustibili fossili immette nell'atmosfera, oltre all'anidride carbonica, anche un gran numero di sostanze dannose alla salute per diverse ragioni.

Nei giacimenti i combustibili sono spesso mescolati a quantità più o meno rilevanti di sostanze come composti solforati, metalli, idrocarburi pesanti e composti aromatici, i quali solo in parte vengono separati dal combustibile prima del suo utilizzo.

Queste sostanze appena elencate, ed i loro prodotti come le polveri sottili, sono pericolose per la salute dell'uomo. Altro particolare non trascurabile per la salute dell'uomo è il processo di combustione di motori e caldaie: essi non utilizzano ovviamente ossigeno puro ma l'aria ed alle alte temperature che si generano nel processo di combustione, azoto ed ossigeno presenti naturalmente nell'aria si combinano per dare ossidi di azoto NOx, che sono di per sé stessi inquinanti ma anche i precursori del particolato atmosferico; si tratta di un inquinante dalla composizione chimica variabile la cui pericolosità aumenta con il diminuire del diametro delle particelle che lo compongono. In particolare la misura minore di 10  $\mu m$  e maggiore di 2.5  $\mu m$  possono penetrare all'interno dei bronchi e quelle di diametro inferiore direttamente nel sangue.

## 1.3 Altre problematiche

Le problematiche relative all'impatto ambientale e alla salute non sono le uniche a riguardare i combustibili fossili: essi infatti per definizione sono risorse primarie ma finite, per cui non saranno sempre disponibili.

Proprio per questo motivo già una ventina di anni fa, la comunità scientifica ha iniziato ad interessarsi alla questione petrolio, in modo tale da stimare quanto ve ne potrebbe essere ancora a disposizione sulla Terra, con la consapevolezza che ridurre l'utilizzo significherebbe non solo avere petrolio anche in futuro, ma anche ridurre l'inquinamento, essendo questo uno dei combustibili fossili maggiormente sfruttato.

La rivista *Le Scienze* ha pubblicato quest'anno alcune stime [32] sulla disponibilità del petrolio, secondo le quali nei prossimi cinque o dieci anni si verificherà il picco massimo della produzione di petrolio, in seguito al quale, si assisterà una progressiva decrescita. Sempre secondo queste

stime il picco delle scoperte di nuovi giacimenti è avvenuto tra il 1950 ed il 1970 e già a partire dalla metà degli anni '80 stiamo consumando più di quello che viene scoperto. Sempre secondo le stime riportate il petrolio sarebbe in veloce esaurimento ma esistono pareri discordanti, tra i quali possiamo citare quello di Leonardo Maugeri, vice presidente ENI, il quale sostiene che potremmo avere petrolio a sufficienza per altri 100 anni [32].

Queste sono alcune delle motivazioni alla base di una continua ricerca di soluzioni alternative efficienti dal punto di vista energetico ma allo stesso tempo rinnovabili e meno compromettenti per ambiente e salute.

## 1.4 Politica europea e incentivi italiani

L'Unione Europea in data 23 aprile 2009, ha emanato una nuova direttiva (2009/28/CE) che delinea gli aspetti fondamentali che gli Stati membri devono rispettare in fatto di politica energetica: la nuova direttiva si basa su tre obiettivi fondamentali da raggiungere entro il 2020 e prevedono un incremento del 20% dell'efficienza energetica, la copertura di almeno il 20% dell'energia prodotta assicurata da fonti rinnovabili e la riduzione del 20% delle emissioni di gas climalteranti.

Tra le possibili soluzioni utili al raggiungimento di questi obiettivi, verranno prese in considerazione in questa tesi la biomassa (prendendo come esempio una centrale di Bondeno, in provincia di Ferrara) ed il fotovoltaico, due modi di produrre energia molto diversi tra di loro, in modo tale da evidenziare caratteristiche peculiari, rendimenti energetici e poter comparare infine i due metodi di produzione energetica.

Nello specifico per quanto riguarda la biomassa, le valutazioni verranno fatte partendo da un modello concreto di produttività, rappresentato dalla centrale a biogas attualmente in funzione a Bondeno (Fe).

Per quanto riguarda l'Italia, la legge finanziaria del 2008 (L.24/12/2007 n.244) [3] ed il cosiddetto collegato alla finanziaria stessa (L.28/11/2007), definiscono gli incentivi previsti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Attraverso queste leggi viene definito un incremento della quota annua d'obbligo di energia da fonti rinnovabili di 0.75 punti percentuali per il periodo 2007-2012 ed un'estensione dei certificati verdi a 15 anni.

Per certificati verdi s'intende la fonte principale di incentivazione di energia elettrica da fonti rinnovabili: si tratta di titoli negoziabili che corrispondono ad una certa quantità di emissioni di CO<sub>2</sub>, per cui se un impianto produce meno CO<sub>2</sub> di quanto avrebbe fatto un impianto della stessa potenza alimentato da fonti fossili, il gestore ottiene certificati verdi che può rivendere a prezzi di mercato ad industrie o attività che sono obbligate a produrre una quota di energia da fonti rinnovabili ma che non lo fanno autonomamente.

In Italia i certificati verdi sono emessi dal Gestore dei Servizi Energetici (GSE) e sono stati introdotti con il Decreto Bersani [4].

Con l'attuazione della nuova legge questi certificati verdi, oltre ad ottenere una estensione di du-

rata pari a 15 anni come già accennato, presentano un valore pari a 88.66 euro per ogni MWh, inoltre l'emissione è pari al prodotto della produzione netta di energia elettrica moltiplicata per un coefficiente  $k$ , il cui valore si attesta a 1.8 per biomasse da filiera corta ed 1.3 per altre biomasse. Per gli impianti la cui potenza elettrica non supera l'1MWh, è possibile richiedere come alternativa al certificato verde, una tariffa fissa comprensiva di incentivo e del ricavo di vendita dell'energia elettrica prevista per 15 anni, il tutto in base alla fonte utilizzata: per biomasse da filiera corta si possono richiedere 300 euro, mentre per altre biomasse 280 euro.

Con il D.M. 18/12/2008 è stata stabilita la non cumulabilità dei certificati verdi, o della sostitutiva tariffa omnicomprensiva, con incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria, in conto energia, in conto capitale o in conto interessi. È fatta eccezione per gli impianti alimentati da biomasse di filiera per i quali è invece stata sancita la cumulabilità con altri incentivi pubblici, non eccedenti il 40% del costo dell'investimento.





## Capitolo 2

# Biomassa e biocombustibili

### 2.1 Descrizione

Con il termine biomassa vengono generalmente indicate sostanze di origine biologica di diverso tipo, le quali rientrano all'interno delle fonti rinnovabili, inoltre la CO<sub>2</sub> che viene emessa per la produzione di energia non rappresenta un incremento dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera; questo perché la quantità di CO<sub>2</sub> è la stessa che le piante hanno immagazzinato per crescere e che, in ogni caso, in seguito alla morte tornerebbe in circolo.

Le varie tipologie di biomasse possono essere riassunte schematicamente nel seguente modo [6]:

- Essenze impiegate per scopi energetici (pioppo, salice, eucalipto, legna da ardere)
- Residui industriali della lavorazione della cellulosa (black-liquor)
- Residui industriali derivanti dalla lavorazione del legno (segature, trucioli..)
- Essenze coltivate per scopi energetici. Tra queste abbiamo le annuali come colza, girasole (per produrre olio e biodiesel), mais (per produrre bioetanolo e biogas), bietola (per produrre bioetanolo), sorgo, canapa (che per combustione diretta danno syngas, pirogas e biogas). Oltre alla annuali esistono anche coltivazioni di tipo poliennali che per combustione diretta permettono di ottenere syngas, pirogas e biogas e sono: cardo, canna, miscanto ed alcune legnose.
- Residui di piantagione e di lavorazione agricole (fieno, paglia, gusci di nocciole, mandorle e noci, potature alberi da frutto, residui di canapa e cotone).
- Scarti dei prodotti agro-alimentari (semi, noccioli e scarti dalla lavorazione della frutta).
- Prodotti organici derivanti dall'attività biologica umana e zootecnica (reflui e liquami da allevamento di animali e discariche di rifiuti).
- Rifiuti urbani di origine vegetale (sfalcio dell'erba e potature).

## 2.2 Filiera energetica

Quando si parla di biomassa a scopo energetico è altrettanto importante inquadrare la filiera energetica, ovvero una serie di fasi che permettono di soddisfare il fabbisogno energetico: questi passaggi sono fondamentalmente tre e possono essere inquadrati come la produzione di biomassa, la sua trasformazione in un vettore energetico ed infine l'utilizzo di questo in un sistema per la conversione di energia.

### 2.2.1 Reperimento

Le modalità con cui si reperisce biomassa fanno riferimento alle produzioni agricole e forestali, ai residui e sottoprodotti agroalimentari e alle colture dedicate.

In modo particolare quando si parla di colture dedicate possiamo fare una prima suddivisione tra quelle annuali e quelle poliennali.

- Annuali: colza e girasole (da cui si ricava olio ed in seguito biodiesel), mais e bietola (che ci forniscono biogas quindi bioetanolo), sorgo e canapa (utili nei processi di combustione diretta).
- Poliennali: cardo, canna, miscanto e legnose come il pioppo e l'eucalipto (le quali sono sfruttabili per combustione diretta, syngas, pyrogas e biogas).

In merito al reperimento è possibile fare qualche considerazione sulle eventuali problematiche connesse.

Tenendo conto delle caratteristiche ambientali del nostro Paese, potrebbe non esserci una disponibilità elevata di materie prime se non in zone particolari per cui la convenienza dello sfruttamento a fini energetici, sarebbe concreta solo se la reperibilità di materie prime fosse certa in zone circostanti al sito di utilizzo.

A questa problematica si potrebbe ovviare mediante lo sfruttamento di colture dedicate, ma anche in questa circostanza potrebbero insorgere alcuni dubbi: in concreto significherebbe utilizzare terreni destinati all'agricoltura per fini energetici, rimpiazzare quindi una normale produzione di prodotti alimentari con prodotti energeticamente utili, il che si tradurrebbe su larga scala nella necessità di dover importare le mancanze che non sarebbero più prodotte nel nostro Paese.

Inoltre le biomasse non sono disponibili in ogni momento dell'anno. Basti pensare a tutte quelle che derivano da colture stagionali, la cui raccolta avviene in un determinato periodo dell'anno stesso. Anche il legno, che in via teorica potrebbe essere disponibile tutto l'anno, di fatto viene tagliato prevalentemente d'inverno, poichè durante questa stagione esso contiene meno umidità. Risulta quindi ovvio che una centrale che necessita di un certo quantitativo di biomassa per poter funzionare, avrà anche bisogno di una zona di raccolta abbastanza ampia. Nel caso si decida di coltivare canna da zucchero, mais e barbabietole (che potrebbero poi essere sottoposte ad un processo di fermentazione) bisogna prendere in considerazione anche l'uso di fertilizzanti (nocivi

per l'ambiente in quanto determinano l'emissione di azoto) e l'utilizzo di una certa quantità di combustibile fossile indispensabile per i macchinari con cui si lavorerà il terreno.

Verrà dimostrato in seguito che, nonostante non si possa parlare in termini assoluti di impatto zero, i combustibili utilizzati per i processi di coltivazione, sono quantità irrilevanti se confrontati con i consumi di una centrale standard che non prevede l'utilizzo di biomassa.

In questo caso l'immissione in atmosfera non è da considerarsi nulla: infatti per produrre biomassa, abbiamo alla base dei processi che aumentano la quantità netta di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, alla quale si aggiungono altri tipi di emissioni nocive come di fatto sono i prodotti dell'azoto.

Risulta evidente che i vantaggi dovuti all'utilizzo di biomassa, potrebbero venire meno con l'entrata in funzione di un impianto termoelettrico (sarà di questi tipi di impianti di cui ci occuperemo in seguito) la cui progettazione, e dimensionamento, sono assolutamente avulsi dalla realtà che li circonda, ovvero dalle vocazioni agro-alimentari del territorio che dovrebbe ospitarla. Questo perché molto spesso la costruzione di queste centrali è seguita dalla conversione dei terreni agricoli circostanti, i quali vengono poi adibiti a coltura energeticamente utile.

Ovviamente maggiore è la potenza della centrale, maggiore sarà il quantitativo di biomassa necessario al funzionamento, maggiore quindi sarà il numero di ettari di terreno che potenzialmente potrebbe subire conversione.

### 2.2.2 Processi di trasformazione

I processi di trasformazione possono essere classificati come:

- Combustione diretta.
- Processi di conversione chimica, più in specifico termochimici e biochimici.
- Processi meccanico / chimici dai quali si ottiene combustibili liquido attraverso spremitura e transesterificazione.

#### Combustione diretta

Il processo di combustione avviene grazie all'utilizzo di stufe o caldaie, che possono essere di varia potenza, ed utilizzano come combustibili il legno (sotto forma di tronchetti, pellet, segatura, cippato), residui e prodotti agricoli, come paglia e semi, oppure residui agroalimentari.

Questa tecnologia presenta quindi il vantaggio di poter utilizzare materiale ritenuto di scarto e può essere accoppiata con motori per la cogenerazione<sup>1</sup>, in specifico l'impiego può essere possibile in turbine a gas a combustione esterna, motori Stirling, cicli vapore e cicli ORC.

Un'altra applicazione possibile è rappresentata dalla co-combustione, mediante la quale viene

---

<sup>1</sup>Quando si parla di cogenerazione si fa riferimento a impianti di cogenerazione energia elettrica-calore: questo significa che vengono prodotte contemporaneamente entrambe. Questa tecnica nella produzione di energia offre la massima efficienza nella trasformazione dell'energia risparmiando quindi le risorse in fatto di energia primaria

bruciata biomassa assieme al carbone, permettendo quindi di risolvere i problemi di approvvigionamento di biomassa e ridurre allo stesso tempo il consumo complessivo di carbone.

Accanto a questi vantaggi esiste in ogni caso una problematica collegata all'uso di questa tecnologia, ed è rappresentata dall'emissione in termini di PM10, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, le quali risultano essere superiori alle emissioni del gasolio, per cui gli impianti a combustione necessitano di specifici sistemi di filtraggio e abbattimento.

### Conversione chimica

La distinzione che è possibile fare è tra la conversione termochimica e quella biochimica.

Il primo processo preso in considerazione è quello termochimico, il quale si basa sull'azione del calore che permetterebbe le reazioni chimiche necessarie per la trasformazione della biomassa (in genere legna e derivati, scarti di lavorazione e sottoprodotti di tipo lignocellulosico).

Un esempio di conversione termochimica è rappresentata dalla gassificazione, ovvero quel processo in cui la conversione della biomassa in composto gassoso avviene attraverso reazioni di ossidazione con ossigeno, aria, vapori e miscele di questi a temperature di circa 1000°C.

I prodotti che si ottengono sono ossido di carbonio, anidride carbonica, metano, idrogeno ed altre miscele); è un metodo che permette un'alta efficienza elettrica.

Oltre alla gassificazione, rientra nella categoria dei processi termochimici anche la pirolisi.

Per pirolisi si intende un processo di decomposizione termochimica del materiale organico che si ottiene attraverso l'applicazione di calore (a temperature comprese tra i 400 ed i 1000°C), in condizioni di assenza di ossigeno. Quest'ultimo particolare è ciò che distingue il processo della pirolisi dalla combustione, la quale richiede invece la presenza di un agente ossidante, appunto l'ossigeno. Il calore fornito serve in questo caso per rompere i legami chimici mediante omolisi termicamente indotta, la quale determina come risultato finale diversi tipi di combustibili in proporzioni diverse che dipendono direttamente dalla temperatura.

Alcuni problemi connessi alla pirolisi possono essere l'instabilità del prodotto al quale in genere è associata anche una certa corrosività, soprattutto se si parla della frazione liquida.

Esiste inoltre un punto di contatto tra le due tecnologie illustrate, ovvero la pirogassificazione: questa tecnologia permette di ottenere come prodotto finale il syngas, il quale ha il vantaggio di poter essere utilizzato sul luogo di produzione oppure può consentire lo stoccaggio in gasometri o essere trasportato attraverso gasdotti.

Un altro modello di conversione chimica è rappresentato dal processo biochimico. Questo processo permette di ricavare combustibile gassoso attraverso le reazioni biochimiche scatenate da enzimi, funghi o altri micro-organismi che si formano nella biomassa quando questa è conservata in particolari condizioni.

Un esempio di reazione biochimica è la digestione anaerobica ovvero un processo che avviene in assenza di ossigeno e permette il disfacimento di lipidi, glucidi e protidi contenuti nella materia organica, grazie all'azione di micro-organismi.

Il prodotto principale è un biogas costituito prevalentemente da metano (50-60 %) e  $\text{CO}_2$ ; altri sottoprodotti sono invece residui solidi che possono essere impiegati come fertilizzanti perché composti per lo più da fosforo, potassio ed azoto.

Accanto alla digestione anaerobica, troviamo tra i processi biochimici, anche la fermentazione alcolica, attraverso la quale è possibile ricavare bioetanolo in seguito alla trasformazione dei glucidi (proprio per questo motivo le biomasse utilizzate contengono una buona percentuale di zucchero e le più sfruttate sono barbabietola, canna e sorgo dolce). È possibile utilizzare anche biomassa a base di amido (come granturco, orzo, riso e cereali), ma in questo caso il processo è più lungo perché l'amido deve essere prima trasformato in destrine e solo infine in zucchero per idrolisi.

### **Conversione meccanica**

Questo ultimo tipo di conversione ricava combustibile attraverso operazioni prettamente meccaniche, come la spremitura, alle quali a volte si aggiunge la combinazione con processi chimici.

In questo caso le colture preferite sono colza, girasole, soia e palma, con rese diverse; l'olio vegetale viene quindi ottenuto semplicemente attraverso spremitura o spremitura associata ad un solvente, ed il prodotto finale, generalmente indicato come olio grezzo, seguirà un processo di raffinazione per eliminare eventuali impurità.

### **Conversione meccano-chimica**

I processi meccanico-chimici permettono di ottenere un importante prodotto energetico, ovvero il biodiesel.

Il biodiesel è il prodotto di un'operazione chiamata transesterificazione: si tratta della reazione per sostituzione dei componenti alcolici, come il glicerolo, con metanolo.

Ciò che in questo caso si ottiene assomiglia per molti aspetti al normale diesel e può rappresentarne una buona alternativa anche nei motori di piccola taglia; per quanto riguarda invece un raffronto con altri oli vegetali, il biodiesel presenta minori emissioni di particolato anche se risulta essere incompatibile con alcuni materiali impiegati con la costruzione di motori, come il bronzo, il rame e lo stagno.

## **2.2.3 Sistemi energetici**

I sistemi energetici sono quelli che permettono di utilizzare il combustibile ottenuto dalla biomassa per produrre energia e possono essere suddivisi in sistemi a combustione interna ed esterna.

I sistemi a combustione interna prevedono un particolare motore nel quale avviene la combustione di una miscela che comprende sia il combustibile, rappresentato dalla gas o olio, che un comburente ovvero l'aria, il tutto contenuto all'interno di una camera di combustione. I prodotti che si ottengono sono energia utile meccanica / elettrica ma anche energia termica: un esempio è rappresentato dai MicroTG ovvero turbine a gas ed i motori ciclo diesel.

I sistemi energetici a combustione esterna si differenziano da quelli a combustione interna perché l'impianto di combustione è separato dal generatore.

In questo caso il combustibile è utilizzato per riscaldare un fluido di lavoro, attraverso il quale si realizza la conversione dell'energia termica in lavoro meccanico; si ottiene sempre energia meccanica / elettrica ed energia termica. Alcuni esempi sono portati dal ciclo vapore, motori Stirling e ciclo ORC.

La capacità di poter produrre non solo energia elettrica, ma anche termica, fa sì che questi impianti possano essere definiti come impianti di cogenerazione: in questi impianti infatti, il calore che andrebbe dissipato allo scarico, viene recuperato ed impiegato nel riscaldamento.

Parlando di biomassa, e centrali che la utilizzano, analizzeremo ora due tipologie differenti, prendendo come riferimento le realtà di Bondeno (Fe): una centrale a biogas attualmente in funzione e una proposta di centrale ad olio vegetale.

## 2.3 Impianti che utilizzano biomassa: centrale a biogas, l'esempio di Bondeno

La costruzione dell'impianto di Bondeno è incominciata già a partire dal 2007 ad opera della *Schmack Biogas*[19], un'azienda di Bolzano che opera nel settore dal 1995 e che vanta la costruzione di 240 impianti; in questo caso l'azienda opera per l'azienda agricola, *Energy Renew S.r.l.* [18], la quale è composta da una decina di soci, ed ha ottenuto l'autorizzazione per costruzione ed esercizio di 4 impianti autonomi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, mediante produzione e combustione di biogas.

La biomassa prodotta proverrà sia da uno dei soci della *Energy Renew*, sia dalla cooperativa estense Capa, la quale vanta 3000 produttori con 30000 ettari di terreno coltivato prevalentemente a cereali.

L'energia che questo impianto sarà capace di produrre verrà venduta alla CRTN, ovvero la società gestore della rete del trasporto nazionale, la quale è controllata dal GSE ovvero il *Gestore dei Servizi Elettrici*: le stime dicono che il ricavato per la vendita potrebbe attestarsi sui 3 milioni di euro l'anno, ai quali si aggiungeranno i premi concessi dai certificati verdi relativi alla produzione di energia con scarsa emissione di CO<sub>2</sub> [5].

### 2.3.1 Caratteristiche dell'impianto

Come già accennato, l'impianto a biogas prevede quindi la costruzione di 4 motori separati, con una potenza di 999kW ciascuno.

In sintesi, il ciclo di lavorazione sarà costituito da: stoccaggio e alimentazione materie prime (biomasse), fermentazione anaerobica delle biomasse, produzione di biogas, combustione del biogas mediante motori a combustione interna, produzione di energia elettrica. Dalla fermentazione anaerobica si ottiene inoltre il digestato che, dopo adeguato stoccaggio, sarà utilizzato come amendante in agricoltura.

L'energia è ricavata quindi attraverso un preciso processo che prevede alcune tappe fondamentali.

- Come prima cosa la raccolta di materie prime, le quali derivano da coltivazioni del territorio circostante, e consistono per lo più in mais ed altri cereali.
- Queste vengono poi utilizzate per il processo di digestione anaerobica, ovvero quel processo che permette di ottenere biogas grazie all'azione di ceppi batterici, il tutto all'interno del fermentatore.
- Il biogas che deriva dal processo di fermentazione viene fatto bruciare mediante motori a combustione interna.  
Avremo infine produzione di energia termica per chiusura del ciclo termodinamico, ed elettricità.

### 2.3.2 Materie prime utilizzate e produzione di biogas

La biomassa utilizzata all'interno dell'impianto è essenzialmente composta da: mais ceroso (insiliato), granella di mais, altri cereali insiliati come loietto e triticale, ai quali si aggiungono reflui zootecnici che verranno utilizzati solo nel processo di avviamento, le cui quantità potranno essere variate nei limiti dettati dalle ricette di alimentazione: in modo particolare nel progetto si stima un fabbisogno di biomassa di circa 20000 ton.

Dal punto di vista tecnico sarà necessario dilazionare i tempi di raccolta del mais, in modo da scongiurare una massiccia circolazione di mezzi, concentrando l'attività in pochi giorni e dilazionandola nel tempo.

In seguito alla raccolta, la biomassa sarà quindi trasportata con automezzi e depositata all'interno di trincee, dove sarà quindi compattata e coperta temporaneamente con teli plastici, prima di essere prelevata e scaricata nel dosatore di alimentazione. Successivamente al deposito, grazie all'utilizzo di pompe, la biomassa sarà inviata fino ai digestori anaerobici a flusso continuo, dove ha inizio la fase di fermentazione.

Il biogas che deriva da questo processo, viene raccolto negli accumulatori pressostatici (i quali

si trovano a copertura dei fermentatori), e solo in seguito alla desolforazione viene inviato al cogeneratore: negli accumulatori interviene un processo di desolforazione, ovvero viene iniettato ossigeno all'interno, in particolare nella zona tra la copertura ed il prodotto in fase di fermentazione. Questa procedura permette di proteggere il motore e le condotte del gas, proprio perché il processo di ossigenazione fa sì che si insedino alcuni batteri in grado di estrarre lo zolfo dall'acido solfidrico presente nel biogas, che tenderebbe quindi ad aggrumarsi sulle travi e sul feltro.

La produzione di biogas è quindi alla base per la produzione di energia elettrica, ma non bisogna dimenticare che accanto a questa verrà prodotta anche energia termica, la quale non sarà dispersa ma utilizzata per riscaldare l'impianto stesso, e digestato: con questo termine facciamo riferimento al sottoprodotto agricolo di utilizzazione certa poiché derivante da prodotti agricoli come la biomassa, e a sua volta utilizzato per concimare futuri prodotti agricoli.

### 2.3.3 Fabbisogno di terreni

Come già accennato, il progetto della centrale riporta una stima di fabbisogno annuo di biomassa la quale, esclusi i reflui zootecnici, di circa 18200 ton e comprende prevalentemente mais insiliato, granella di mais ed altri cereali.

Sempre da progetto si stima un fabbisogno di terreno per la coltivazione pari a 420 ha:

$$S_{biogas} = 420ha \quad (2.1)$$

In seguito da questo dato partiremo per stimare la quantità di combustibili fossili utilizzati in tutti i processi di agricoltura.

## 2.4 Impianti che utilizzano biomassa: centrale a biodiesel

Un'altra possibilità di sfruttamento della biomassa è la realizzazione di impianti che utilizzano come combustibile biodiesel, il quale, come già accennato è prodotto a partire da oli vegetali e può essere paragonato al gasolio.

La costruzione di una centrale a olio vegetale è stata proposta per rivalorizzare l'ex zuccherificio di Bondeno (Fe) e per la creazione di una filiera locale di attività produttive correlate. Da una presentazione di Guidi, presidente Finbieticola Bondeno [10], si ipotizza che l'impianto in progettazione avrà una potenza pari a 24 MW e sarà alimentato sia da olio vegetale proveniente dalla filiere per una quantità stimabile sui 2500 ton, che da olio di palma per 35000 ton, il quale dovrà essere quindi importato.

Per quanto riguarda l'olio vegetale prodotto localmente, questo deriva principalmente da soia, colza e girasole.



### 2.4.1 Fabbisogno di terreni

Ovviamente i tre tipi di colture prese in considerazione hanno rese diverse, come è mostrato nella Tab. 2.1, ed a queste corrispondono diverse quantità in fatto di semi, le quali sono quantificabili come 6024 ton per la colza, 13889 ton per la soia e 5952 ton per il girasole.

Coltivazione	Resa percentuale in olio	Resa in tn per ettaro
Colza	41.5%	3.5
Soia	18.00%	4.0
Girasole	42.00%	3.5

Tabella 2.1: Rese quantitative specifiche

Anche in questo caso è possibile fare una stima dei terreni occupati da queste colture, durante l'arco di un anno: in particolare verrà preso come esempio il girasole, il quale sembrerebbe avere la resa migliore, i cui dati sono stati riportati nella Tab.2.2:

Ettari necessari alla coltivazione	1700 ha
Tonnellate da filiera locale	2500 ton
Tonnellate complessive	37500 ton

Tabella 2.2: Terreni occupati dalle colture

Per ottenere gli ettari necessari complessivi (per cui non solo quelli della filiera locale), ogni anno per coltivare girasole possiamo procedere in questo modo:

$$S_{olio}^{24MW} = (1700ha/2500ton) \cdot (37500ton) = 25.500ha \quad (2.2)$$

Questo valore rappresenta il numero di ettari necessari per alimentare una centrale che produce 24 MW, ora possiamo fare una stima per una potenza di 1MW, in modo tale da poter fare un raffronto con i dati emersi dalla valutazione inerente alla centrale a biogas:

$$S_{olio} = 25.500/24 = 1063ha \quad (2.3)$$

## 2.5 Consumi per lavorazione terreni

Avendo stimato il fabbisogno di terreni per le due tipologie di centrale, possiamo ora valutare i consumi per la lavorazione di questi e stimare un rapporto tra queste quantità di combustibili

e quelle utilizzate da una centrale che potremmo definire standard, ovvero che non utilizza la biomassa nei processi di produzione di energia.

### 2.5.1 Centrale a biogas

I dati presentati di seguito sono una stima riportata dal prontuario dei consumi di carburante per l'impiego agevolato in agricoltura di Enama [12]. Partendo da questi saranno fatte le valutazioni successive in fatto di consumi complessivi

Riportiamo nel seguente elenco le lavorazioni ed il consumo di diesel corrispondente per ettaro.

1. Aratura 30 l/ha
2. Arieggiatura 25 l/ha
3. Semina + concimazione 10 l/ha
4. Diserbo pre-emergenza 10 l/ha
5. Sarchiatura 10 l/ha
6. Diserbo post-emergenza 10 l/ha
7. Irrigazione 50 / 100 l/ha
8. Trebbiatura 20 l/ha

per un totale complessivo di circa  $C_{ha} = (150 \div 200)l/ha$ .

Quindi il consumo totale ( $C_{tot}$ ) per la lavorazione del terreno sarà dalla seguente relazione:

$$C_{tot}^{biogas} = C_{ha} \cdot S_{biogas} = (63000 \div 84000)l \quad (2.4)$$

Questi dati saranno ora confrontati con il consumo di combustibile fossile per una normale centrale termoelettrica che funziona a dieselS.

Secondo le stime della *Diesel Service and Supply* [24], i consumi di diesel espressi in galloni ogni ora, da utilizzare in un impianto di 1MW sono 71.1. Siccome un gallone equivale a 3.79

$$S_{orario}^{diesel} = 71.1 \cdot 3.79 = 270l/h \quad (2.5)$$

Questo significa che nell'arco di una anno, il consumo sarà

$$C_{anno}^{diesel} = N_{ore} \cdot S_{orario}^{diesel} \approx 3 \cdot 10^6 \quad (2.6)$$

Possiamo approssimare questo valore per eccesso con un  $10^3$

$$Tot_{consumo} = 270 \cdot 10^3 = 3 \cdot 10^6 \quad (2.7)$$

L'ammontare di carburante utilizzato da una centrale tradizionale decisamente superiore al diesel consumato per la lavorazione del terreno per la centrale a biogas, infatti

$$\frac{C_{biomassa}^{diesel}}{C_{standard}^{diesel}} = (2.1 \div 2.8) \cdot 10^{-2} \quad (2.8)$$

Questo significa che il consumo di combustibile fossile per la filiera che porta alla biomassa circa il 2 % del consumo di un generatore diesel tradizionale.

Da questi dati risulta chiaro che una centrale a biomassa determina un notevole risparmio di combustibili fossili e quindi minori emissioni di  $CO_2$ , anche se non si può parlare di impatto zero, per via del carburante utilizzato nei processi di lavorazione del terreno. A tutti gli effetti i dati riportano comunque una quantità quasi irrilevanti rispetto ai valori di una normale centrale a diesel.

### 2.5.2 Centrale a biodiesel

Riportiamo le valutazioni dei consumi per una centrale ad olio vegetale. Anche in questo caso sono stati utilizzati i valori stimati nel prontuario dei consumi di carburante per l'impiego agevolato in agricoltura di Enama [12]: in questo caso la necessità di riportarli nuovamente deriva dal fatto che la coltivazione del girasole, che viene presa come esempio, determina valori di consumo leggermente differente rispetto a quelli riportati precedentemente.

1. Aratura 61 l/ha
2. Arieggiatura 20 l/ha
3. Rullatura 4 l/ha
4. Semina 23 l/ha
5. Concimazione 12 l/ha
6. Diserbo pre-emergenza 6 l/ha
7. Raccolta 36 l/ha
8. Trasporti vari 13 l/ha
9. Trinciatura residui colturali 50 / 100 l/ha

### 10. Irrigazione 170 l/ha

La somma dei litri necessari a tutti i processi di coltivazione è quindi 358 per ogni ettaro, una quantità decisamente superiore rispetto ai 150 / 200 litri necessari alla lavorazione di masi, sorgo e tricale utilizzati nelle centrali a biogas.

In questo caso i litri necessari per la lavorazione di 1063 ettari di terreno dedicati al girasole sarebbero:

$$C_{tot}^{o.vegetale} = C_{ha} \cdot S_{o.vegetale} = 380375l/ha \quad (2.9)$$

### 2.5.3 Consumi a confronto

Confrontando tra loro i risultati ottenuti e con i valori relativi ad una centrale standard, si nota che la convenienza in termini di uso di combustibili fossili annuo, è maggiore nel caso della centrale a biogas

- Consumo lavorazione del terreno per centrale a biogas 73500 l
- Consumo lavorazione del terreno per centrale a biodiesel 380375 l
- Consumo centrale standard  $3 \cdot 10^6$  l

In precedenza era stato stimato il consumo per la centrale a biogas tra il 2,1% ed il 2,8% rispetto a quello della centrale standard: possiamo procedere allo stesso modo per valutare la percentuale relativa alla centrale a biodiesel.

$$\frac{C_{o.vegetale}^{diesel}}{C_{standard}^{diesel}} = 13\% \quad (2.10)$$

La convenienza in fatto di consumi è certa se confrontata rispetto alla centrale standard, anche se non quanto la centrale a biogas.

## 2.6 Problematiche e azoto

Dalle precedenti valutazioni emerge che: se vogliamo produrre una certa quantità di energia da biomassa, avremmo bisogno di ampi terreni da coltivare e dovremmo farlo abbastanza velocemente: ciò che l'uomo utilizza per velocizzare i processi naturali di crescita sono ovviamente i

fertilizzanti, i quali sono ormai noti per le loro caratteristiche nocive a causa della presenza di abbondanti quantità di azoto.

La maggior parte dell'azoto reattivo che viene prodotto per sintetizzare fertilizzanti o, in misura minore, come prodotto secondario della combustione dei combustibili fossili, viene disperso nell'atmosfera, nei fiumi ecc.

Nella forma gassosa come molecola biatomica  $N_2$  l'azoto, il componente più abbondante dell'atmosfera è innocuo ma nella forma reattiva prodotta dai veicoli che consumano combustibili fossili, o dai fertilizzanti, l'azoto ha un ruolo in molti problemi che riguardano l'ambiente e la salute umana.

Da molti anni gli scienziati indicano infatti l'azoto reattivo come il responsabile di processi dannosi. Inoltre recenti ricerche hanno dimostrato che l'azoto ha un ruolo fondamentale nella perdita della biodiversità e nel riscaldamento globale. In modo particolare la perdita di biodiversità sulla terra ferma è dovuta al fatto che le piante di un ecosistema complesso non rispondono allo stesso modo all'aggiunta dell'azoto e molte non sono equipaggiate per affrontare un improvviso aumento delle risorse e cedono il passo a nuove specie più competitive in un mondo sovrabbondante di nutrienti [30].

L'effetto netto che si verifica è quindi la perdita di biodiversità (ovvero ciò che sta avvenendo in alcune zone d'Europa, in cui le praterie hanno perso un quarto delle specie autoctone dopo decenni di esposizione all'azoto atmosferico di origine antropica).

Questo problema è talmente diffuso che viene indicato come una delle tre principali minacce globali alla biodiversità [30] e nella *Convention on Biological Diversity* dello *United Nations Environment Programme* l'uso di azoto è stato considerato come un indicatore chiave degli sforzi di conservazione ambientale.

I *feedback* ecologici innescati da un eccesso di azoto sono anche all'origine di alcune minacce per la salute umana: le analisi del *National Institutes of Health*[31] mostrano che le elevate concentrazioni di nitrati dell'acqua potabile (un riflesso degli alti livelli di questi composti nei fertilizzanti) possono contribuire all'insorgenza di alcune malattie tra le quali alcune tipologie di cancro. L'inquinamento dell'aria invece sarebbe una delle cause del manifestarsi di alcune malattie cardiopolmonari aumentando l'incidenza di mortalità.

### 2.6.1 Ruolo dell'azoto nel cambiamento climatico

Come già accennato l'azoto potrebbe avere anche un ruolo importante nel cambiamento climatico; può presentarsi come ossido nitrico (NO) oppure biossido di azoto ( $NO_2$ ) ovvero due forme di azoto preoccupanti perché a livello del suolo l'ozono è un gas serra.

Questa forma di azoto non è pericolosa solo per la salute dell'uomo, ma anche perché danneggia i tessuti vegetali, causando perdite di produttività dei raccolti: con l'inibizione della crescita l'azoto inibisce anche la capacità delle piante di assorbire l'anidride carbonica e di contrastare il surriscaldamento globale.

Tra i vari gas serra l'azoto può essere in grado di combinarsi e produrre anche l'ossido di diazoto ( $\text{NO}_2$ ), il quale è sicuramente meno abbondante della  $\text{CO}_2$  ma la sua presenza potrebbe determinare un surriscaldamento globale pari al 10% dell'anidride carbonica.

Occorre notare che l'eccesso di azoto può anche contrastare in alcuni casi il riscaldamento, soprattutto se si combina con altri composti che possono essere in grado di riflettere la radiazione incidente dal momento in cui formano uno spesso aerosol, stimolando la crescita di piante di foresta senza un uso rilevante di azoto, così che possano immagazzinare livelli più alti di anidride carbonica.

Nonostante questa particolarità, le prove sembrano essere a favore dell'aumento del rischi di riscaldamento come conseguenza della produzione antropica di azoto.[30]<sup>2</sup> I biocombustibili, come fonte rinnovabile, stanno però incrementando la domanda di fertilizzanti; negli Stati Uniti, l'incremento della produzione di etanolo da mais è quadruplicata rispetto all'anno 2000 ed ha già innescato un effetto vistoso nel fiume Mississippi, il quale scarica a livello del Golfo del Messico alimentando così le fioriture algali creando così zone morte, una delle problematiche principali dovute all'uso dei fertilizzanti.

Le considerazioni fatte sull'azoto mettono quindi in evidenza che l'utilizzo della biomassa non è così lontana dai problemi di inquinamento: sicuramente non in termini di  $\text{CO}_2$  ma sicuramente in termini di fertilizzanti.

---

<sup>2</sup>Gli studi esposti sono quelle del professore Alan R. Townsend, ovvero il nuovo direttore dell'*Institute of Arctic and Alpine Research* e del dipartimento di ecologia e biologia evolutiva della stessa università, il quale studia il modo in cui i cambiamenti climatici, lo sfruttamento del suolo ed i cicli globali dei nutrienti nonché il funzionamento degli ecosistemi. Altre ricerche importanti sono state condotte da Robert W. Howarth, professore di ecologia ambientale alla Cornell University, che si occupa di come le attività antropiche influenzino gli ecosistemi.

## Capitolo 3

# Fotovoltaico

In questo capitolo verrà esposta la tecnologia del fotovoltaico e, oltre al funzionamento, sarà evidenziata la superficie necessaria per soddisfare una determinata richiesta energetica per fare quindi una stima dell'energia prodotta in relazione alla richiesta. Ovviamente non saranno trascurate le problematiche che in qualche modo possono condizionare l'assorbimento, come il ciclo solare, ed accanto a queste verrà illustrata la migliore soluzione presente attualmente ovvero i moduli ad accumulazione di idrogeno.

### 3.1 Caratteristiche

Tra le fonti di energia considerate rinnovabili e pulite, l'energia solare ricopre un ruolo fondamentale, e la possibilità di utilizzarla grazie agli impianti fotovoltaici di conversione è la diretta conseguenza di alcuni indubbi vantaggi dovuti all'utilizzo di questa fonte.

Il vantaggio principale che questa tecnologia fornisce risiede nelle caratteristiche intrinseche della radiazione solare: essa ha infatti reperibilità illimitata e, grazie alle moderne tecnologie, è possibile incamerare l'energia in eccesso, per poi utilizzarla nei momenti in cui le ore di luce e l'intensità della radiazione non sono a livelli ottimali, ad esempio durante il periodo invernale. Accanto a questi vantaggi esistono in ogni caso anche svantaggi, come il basso rendimento o l'impatto visivo e di occupazione del territorio, anche se la vastità dei territori occupati non è paragonabile alla quantità di territori da utilizzare per la coltivazione della biomassa, come verrà dimostrato in seguito.

Un altro svantaggio potrebbe essere rappresentato dai costi di produzione, i quali però possono essere ammortizzati dal cliente nell'arco di qualche anno, in oltre anche in Italia vengono ora concessi i finanziamenti in conto energia: questo significa che è possibile rivendere l'energia elettrica prodotta da impianti fotovoltaici, anche di piccole o medie dimensioni.

### 3.1.1 Funzionamento

La tecnologia fotovoltaica permette di convertire l'energia solare che incide sull pannello, in energia elettrica: questo processo avviene grazie a quella che viene chiamata *cella fotovoltaica* la quale è formata da una lastra sottile di materiale semiconduttore, in genere silicio, la quale prima dell'utilizzo viene opportunamente trattata mediante processi chimici riconosciuti come drogaggi, ovvero l'inserimento nella struttura cristallina del silicio, di atomi di Fosforo oppure Boro i quali sono utili per determinare la formazione di un campo elettrico rendendo anche disponibili alcune cariche per formare corrente elettrica. La corrente elettrica si formerà quindi la cella (le cui facce sono collegate ad un utilizzatore) viene esposta alla luce in seguito all'effetto fotoelettrico.

Alla base dell'effetto fotovoltaico ci sono quindi alcuni materiali formati da atomi di silicio, il quale presenta determinate caratteristiche: se consideriamo solo atomi isolati questi avranno una determinata configurazione elettronica e livelli energetici, ma quando ne avviciniamo quattro per formare una struttura cristallina, gli elettroni di valenza ora raggiungono diversi livelli energetici.

In un monocristallino di silicio ogni atomo forma legami covalenti con altri quattro atomi e questo legame può essere spezzato con una quantità di energia tale da liberare l'elettrone dal legame covalente per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione dove sarà in grado di contribuire al flusso di elettricità.

una volta che la cella fotovoltaica è esposta alla luce, il flusso di fotoni che la colpisce sarà in grado di fornire energia a sufficienza per liberare gli elettroni del reticolo cristallino del silicio.

Per creare corrente sarà necessario creare una corrente continua di questi elettroni, formando quindi un campo elettrico. Si utilizzano il boro ed il fosforo per una ragione particolare: questi due atomi appartengono rispettivamente al terzo e quinto gruppo, per cui dal momento in cui questi sono inseriti nella struttura, si crea una zona con un numero di elettroni insufficienti ed un'altra con un numero di elettroni in eccesso, queste zone sono chiamate p ed n. Le diverse concentrazioni di carica sono in grado di creare quindi un flusso elettronico.

L'efficienza di conversione per le celle a silicio viene stimata tra il 10% ed il 20%, per cui non un valore altissimo [34].

In genere le celle fotovoltaiche sono di forma quadrata e possono essere connesse tra di loro in serie o in parallelo e possono essere incapsulate all'interno di uno spessore di EVA (Etil Vinil Acetato), un isolante nei confronti della cella. La cella fotovoltaica si comporta quindi come una piccola batteria che può produrre fino a 3 A di corrente con una tensione di 0,5 V ed una potenza di 1,5 W per ogni  $dm^2$  (questi valore fanno riferimento a condizioni di soleggiamento di 1000  $W/m^2$  di intensità luminosa e 25 °C di temperatura).

Per quanto riguarda i materiali, accanto al silicio monocristallino il cui funzionamento nella cella è stato appena descritto, esiste anche la possibilità di utilizzare il silicio policristallino: questi due scelte rappresentano la maggior parte del mercato e sono tecnologie simili dal punto di vista della costruzione poichè prevedono che la cella sia cablata in superficie con una griglia di materiale conduttori per catalizzare gli elettroni. Accanto a questi esistono anche i moduli a film sottile,



ovvero silicio amorfo con struttura disorganizzata, i quali mostrano però un'efficienza inferiore.

## 3.2 Superficie produzione tradizionale

In generale quando si parla di un impianto fotovoltaico se ne riporta la potenza elettrica di picco, ossia la potenza elettrica sviluppata in condizioni di irraggiamento standard. La potenza di picco è un dettaglio tecnico caratteristico di ogni impianto, ma non fornisce una stima diretta di quanta energia elettrica un certo impianto può produrre, per esempio, nell'arco di un anno.

È evidente che la quantità di energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico dipende dal ciclo solare, dalle condizioni atmosferiche, dal periodo dell'anno e in generale da tutti quei fenomeni che condizionano la frazione di radiazione solare che incide sulle celle. Tutte queste variabili, essendo soprattutto di natura meteorologica, fanno sì che si possano ricavare solo delle stime sulla quantità di energia prodotta da un impianto fotovoltaico.

In questa sezione ci proponiamo anzitutto di valutare una stima dell'energia elettrica prodotta per unità di superficie ( $1 \text{ m}^2$ ) da un sistema fotovoltaico nell'arco di un anno. In secondo luogo valuteremo la superficie di fotovoltaico necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico di una ipotetica comunità.

### 3.2.1 Stima dell'energia prodotta da un impianto fotovoltaico

Per stimare l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico prendiamo in considerazione un ipotetico pannello di celle solari di superficie  $S_F = 1 \text{ m}^2$  disposto, per semplicità, orizzontalmente e assumiamo che questo abbia un'efficienza di conversione di energia luminosa in energia elettrica  $\epsilon_F = 10\%$ . Tale valore di efficienza è ragionevole se si considera il fatto che attualmente alcuni impianti raggiungono anche efficienze del 20%, ma ovviamente i fattori che causano decremento di efficienza possono essere vari. Conoscendo quindi la radiazione visibile ( $RV$ ) incidente si può calcolare la potenza elettrica sviluppata dal sistema.

L'entità della radiazione visibile incidente dipende da molti fattori. Il fenomeno che maggiormente influisce è sicuramente il ciclo solare giornaliero, in quanto durante la notte la luce è praticamente nulla, poi vi sarà un graduale aumento seguito da una graduale diminuzione. Il secondo contributo è dovuto al periodo dell'anno che si considera, l'inverno è infatti caratterizzato da un valor medio inferiore ai valori estivi. Gli altri fenomeni non trascurabili sono la situazione meteorologica, giornate nuvolose, nebbia, umidità etc etc.

Per poter stimare la produzione di energia media giornaliera del sistema in esame dobbiamo quindi conoscere la variazione della radiazione nell'arco del giorno, nel corso dell'anno e dobbiamo anche tenere in considerazione quanto mediamente la situazione meteorologica la riduce.

anziché fare previsioni di tipo meteorologico, che sarebbe impensabile da realizzare per una stima, analizziamo i valori di radiazione visibile media oraria misurati negli ultimi cinque anni da una stazione ARPA Emilia Romagna [49] installata a Ferrara. I dati sono resi pubblici da ARPA presso il servizio web Dexter [49]. usando questo campione di cinque anni di dati dovremmo mediamente essere in grado di tenere in considerazione una serie di parametri, difficilmente valutabili in altro modo.

I valori misurati da ARPA riportano la radiazione visibile media oraria ( $RVM_O$ ) incidente su una superficie orizzontale di  $1 m^2$ . Abbiamo quindi valutato, per ogni ora del giorno, il valor medio della radiazione visibile ( $\overline{RVM}$ ) mediando su tutti i valori corrispondenti a quell'ora nell'arco degli ultimi cinque anni. Al fine di tenere conto delle variazioni che si verificano nel corso dell'anno, indichiamo un intervallo di variabilità, per ogni ora del giorno, i cui estremi sono rispettivamente il valori medi della RVM invernale ed estiva <sup>1</sup>. Riportiamo in Fig.3.1 l'andamento della  $RVM$  nell'arco della giornata.

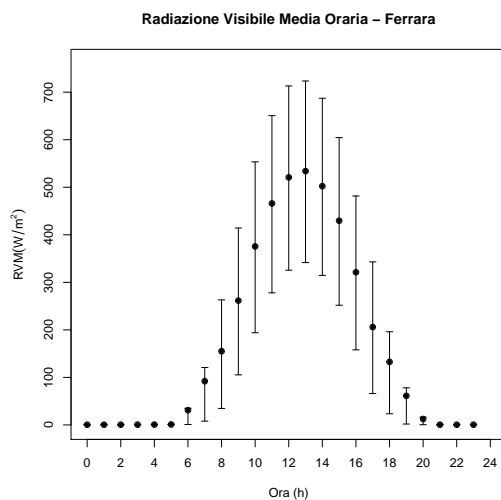


Figura 3.1: Andamento giornaliero medio della Radiazione Visibile Media determinati con i dati ARPA em misurati dal 2005 al 2009 nella città di Ferrara. L'intervallo di variabilità è rappresentato dai valori medi della RVM invernale ed estiva.

Da questo andamento medio, nell'arco di un giorno risulta una energia luminosa incidente su un metro quadro orizzontale pari a circa  $4 kWh$ , che nell'arco di un anno corrisponde a circa 1.4

<sup>1</sup>Il periodo invernale è considerato da Ottobre a Marzo, mentre quello estivo da Aprile a Settembre. Questi mesi sono stati scelti in seguito ad una valutazione dei valori di RVM maggiori e minori rispetto al valor medio annuale. Nel maggior parte dei casi si verifica che i valori di RVM sono inferiori al valor medio da Ottobre a marzo, mentre sono maggiori da Aprile a Settembre. Come intervallo di variabilità non abbiamo considerato quello compreso fra il valore minimo e quello massimo, in quanto questi ricoprono in generale periodi dell'anno diversi e risultano tra l'altro poco significativi da un punto di vista statistico. Da notare inoltre che non si è utilizzata la deviazione standard come intervallo di variabilità, in quanto considerando insieme diversi periodi dell'anno, le distribuzioni di RVM non mostrano un andamento Gaussiano.

*MWh*. Questo valore è confrontabile con i valori che fornisce il servizio *web* Atlante Italiano della Radiazione Solare di previsione della radiazione visibile media messo a disposizione da ENEA [50], il quale fornisce una previsione alle coordinate di Ferrara pari a circa 1.4 *MWh* annui. Da questi valori medi qui determinati, possiamo quindi stimare la potenza media oraria  $\overline{P}_{oraria}$  sviluppata dal sistema fotovoltaico qui considerato per ogni ora della giornata, con la seguente relazione:

$$\overline{P}_{oraria} = \epsilon_F \cdot \overline{RVM} \quad (3.1)$$

Conoscendo quindi la  $\overline{P}_{oraria}$ , che si suppone essere costante nell'arco dell'ora ( $\Delta t = 1h$ ) corrispondente, possiamo stimare l'energia media giornaliera prodotta dal sistema fotovoltaico in esame con la seguente relazione:

$$\overline{E}_{giornaliera}/m^2 = \sum_{h=0}^{23} \overline{P}_{oraria} \cdot \Delta t = 412Wh \quad (3.2)$$

un metro quadrato di fotovoltaico produce quindi mediamente 0.4 *kWh* ogni giorno, che nell'arco dell'anno corrispondono circa 150 *kWh*.

è ovvio che vi saranno giornate in cui la produzione sarà maggiore e altre in cui la produzione sarà minore, ma la valutazione media che qui abbiamo proposto tiene in considerazione proprio questa variabilità e ci fornisce un parametro con il quale poter valutare la superficie necessaria per soddisfare certi fabbisogni energetici come analizziamo nel paragrafo che segue.

### 3.2.2 Superfici fotovoltaico e fabbisogno energetico

Per concretizzare sull'utilizzo dei sistemi fotovoltaici e per poterli confrontare con le altre tecnologie affrontate in questa tesi, determiniamo quanta superficie di pannelli fotovoltaici è necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico di una ipotetica comunità che necessita di un fabbisogno energetico giornaliero di  $E_{fabb} = 24 MWh$ <sup>2</sup>.

Conoscendo l'energia media giornaliera per  $m^2$  stimata nel precedente paragrafo determiniamo la superficie di fotovoltaico necessaria a soddisfare il fabbisogno di 24 *MWh* giornalieri con la seguente relazione:

$$S_{foto} = \frac{E_{fabb}}{\overline{E}_{giornaliera}/m^2} = 58429m^2 \approx 6ha \quad (3.3)$$

Approssimativamente 6 ettari di fotovoltaico forniscono una quantità di energia integrata nell'arco del giorno sufficiente a soddisfare un'ipotetica comunità che potrebbe essere servita da una centrale a biomassa da 1 MW di potenza, la quale necessita approssimativamente di circa 400 ettari per il fabbisogno di materia prima.

Le stime ottenute da queste considerazioni sono sicuramente conservative, in quanto abbiamo considerato bassa efficienza delle celle solari e una disposizione orizzontale dell'impianto, che

<sup>2</sup>Questo valore è stato scelto in modo da poter confrontare i risultati direttamente con la produzione energetica di una centrale a biomassa da 1 MW di potenza, la quale genera nell'arco delle 24 ore 24MWh.

sicuramente non è la configurazione più efficiente.

Nonostante le stime diano forti indicazioni delle grandi potenzialità del fotovoltaico (6 ettari contro i 400 per la biomassa), da un'analisi che rispecchi il reale andamento del consumo energetico nell'arco della giornata si possono evidenziare alcune difficoltà pratiche. Per capire questo abbiamo bisogno di conoscere l'andamento del fabbisogno energetico della comunità nell'arco della giornata. Queste informazioni le possiamo estrarre dai dati pubblicati da Terna [33] riferiti all'andamento della richiesta di energia in Italia. Lo stesso andamento lo possiamo adottare per l'ipotetica comunità del nostro esempio, riscaldando i valori in modo da ottenere una energia integrata nella giornata pari a quella richiesta dalla comunità, quindi pari a 24 MWh.

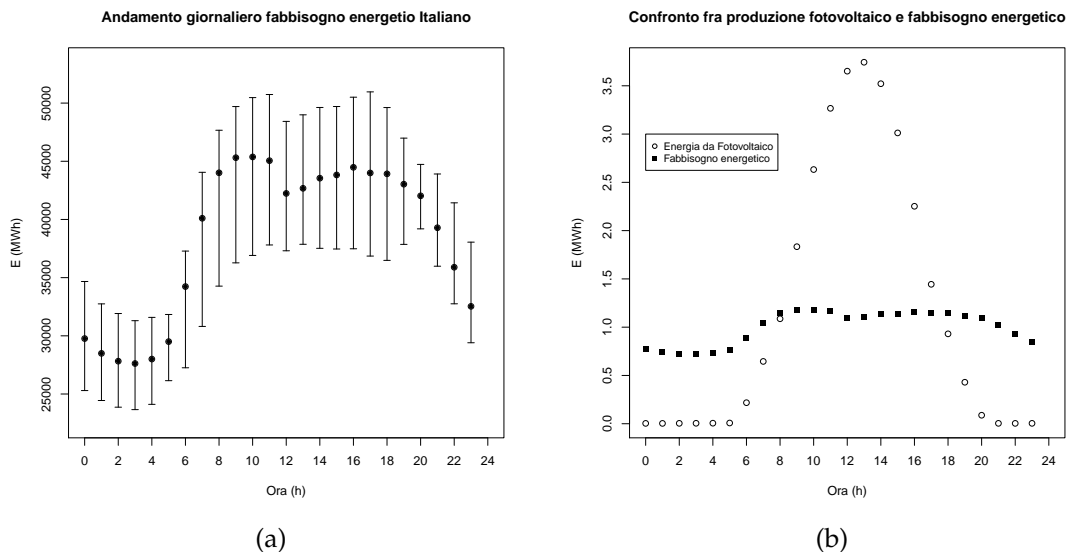


Figura 3.2: (a) Andamento medio giornaliero della richiesta di energia in Italia, valutato per l'anno 2009 dai dati rilevati da Terna in corrispondenza del terzo Mercoledì di ogni mese. L'intervallo di variabilità è determinato dal valore minimo e massimo di richiesta energetica per l'ora corrispondente. (b) Confronto fra l'andamento della produzione di energia dell'impianto fotovoltaico da 24 MWh (integrati nel giorno) e l'andamento della richiesta di energia riscaldato per una energia integrata nella giornata pari a 24 MWh.

Riportiamo in Fig.3.2(a) l'andamento medio della richiesta di energia in Italia, valutato per l'anno 2009 dai dati rilevati da Terna in corrispondenza del terzo Mercoledì di ogni mese. L'intervallo di variabilità è determinato dal valore minimo e massimo di richiesta energetica per l'ora corrispondente. Confrontiamo quindi in Fig.3.2(b) l'andamento della produzione di energia dell'impianto fotovoltaico e l'andamento della richiesta di energia riscaldato per una energia integrata nella giornata pari a 24 MWh. Le problematiche che emergono da questo confronto sono sostanzialmente due:

- Anzitutto si può notare dalla Fig.3.2(b) che nell'orario serale-notturno (dalle 17 alle 8 circa) l'impianto fotovoltaico non è in grado di soddisfare il fabbisogno energetico della comunità.

- Diversamente nelle ore di luce (dalle 8 alle 17 circa) l'impianto produce più energia di quella richiesta.

La prima osservazione risulta un serio problema per la comunità, mentre il secondo potrebbe essere un problema per l'impianto stesso. Queste difficoltà in linea di principio non si verificano con la produzione di energia da biogas o bioDiesel, in quanto i motori possono regolarsi per adattarsi alla richiesta di energia <sup>3</sup>.

un ulteriore fattore da tenere in considerazione in questo studio è il fatto che la produzione di energia da fotovoltaico varia non solo nell'arco del giorno, ma anche nell'arco dell'anno. In aggiunta anche il fabbisogno energetico varia nell'arco dell'anno, ma questa variazione non concorde alla variazione del ciclo solare. Questa affermazione risulta evidente dagli andamenti riportati in Fig.3.3, che mostrano, per ogni mese, il valore integrato in un giorno della fabbisogno energetico e dell'energia prodotta da fotovoltaico, rinormalizzato alla media di 24 MWh integrati nelle 24 ore. Per il fabbisogno energetico abbiamo considerato i valori di riferimento riportati da Terna per ogni mese.

Dalla Fig.3.3 risulta che nei mesi invernale ( da ottobre a marzo) l'impianto fotovoltaico qui

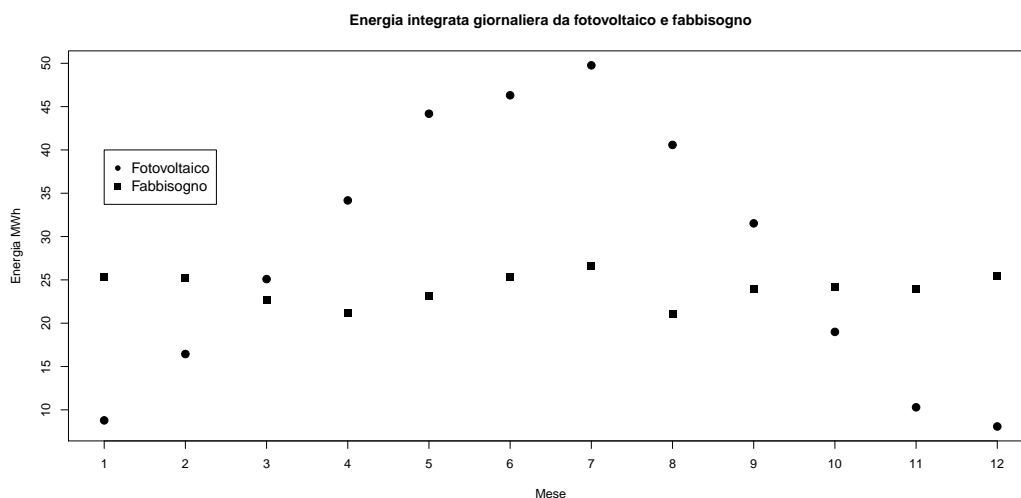


Figura 3.3: Andamento annuale dei valori di fabbisogno energetico e energia da fotovoltaico integrati in un giorno e rinormalizzati con il valor medio di 24 MWh.

dimensionato, nell'arco del giorno, non produce una quantità di energia elettrica sufficiente a soddisfare il fabbisogno della comunità di riferimento. Diversamente nei mesi estivi (da aprile a settembre) produce più energia del necessario. Anche le variazioni annuali quindi conducono a problemi analoghi a quelli dovuti alla variazione giornaliera.

<sup>3</sup>è chiaro che la centrale deve essere dimensionata in modo da poter fornire la massima potenza richiesta, ma è anche vero che non funzionando sempre al massimo, può essere considerata equivalente ad una centrale di dimensioni più ridotte.

Per ovviare a questi problemi con un sistema fotovoltaico proponiamo una soluzione nel paragrafo seguente.

### 3.3 Modello fotovoltaico con accumulazione di idrogeno

Per ovviare al problema della non controllabilità della produzione di energia di un impianto fotovoltaico possiamo pensare ad un sistema in grado di accumulare l'energia in eccesso e in grado di restituirla per compensare quando l'impianto non riesce a soddisfare la richiesta.

A titolo di esempio proponiamo di studiare in questa sezione un sistema composito formato da un impianto fotovoltaico e un accumulatore ad idrogeno, come l'impianto prototipo in un articolo di un gruppo di ricerca dell'università di Bologna[43]. In pratica l'energia elettrica in eccesso viene utilizzata per produrre e accumulare idrogeno, il quale viene riutilizzato in una cella a combustibile per produrre nuovamente energia elettrica. È evidente che un tale sistema risulta essere meno efficiente di un singolo fotovoltaico, in quanto il processo di trasformazione  $Energia \rightarrow Idrogeno \rightarrow Energia$  è caratterizzato da un'efficienza  $\epsilon_H \approx 20\%$ <sup>4</sup>.

Rispetto all'impianto fotovoltaico singolo visto nel paragrafo precedente, questo modello sarà caratterizzato da una superficie maggiore, in quanto la presenza del ciclo dell'idrogeno introduce una efficienza di conversione in più per la frazione di energia prodotta in eccesso dal fotovoltaico. Quantitativamente solo il 20% dell'energia prodotta in eccesso potrà essere riutilizzata come energia elettrica utile.

Per determinare la superficie di fotovoltaico per il modello proposto dobbiamo prima identificare quali sono gli intervalli di tempo in cui il fotovoltaico produce in eccesso o in difetto rispetto al fabbisogno. Per una stima che tenga conto delle variazioni giornaliere e invernali, come evidenziato nel paragrafo precedente, non basta considerare l'andamento medio giornaliero, ma dobbiamo anche considerare come variano nell'arco dell'anno gli andamenti giornalieri di produzione da fotovoltaico e di fabbisogno energetico. A questo scopo consideriamo le variazioni annuali osservando come cambiano mesilmente gli andamenti, quindi per ogni mese valutiamo i seguenti andamenti:

1. Andamento medio giornaliero della radiazione visibile media solare, ottenuto calcolando per ogni ora del giorno la media sui giorni del mese considerato dal 2005 al 2009.
2. Andamento giornaliero del fabbisogno energetico, ottenuto dall'andamento del giorno di riferimento usato da Terna per il mese considerato, dati del 2009.

Riportiamo in Fig.3.4 gli andamenti appena descritti per un impianto fotovoltaico opportunamente dimensionato e per un fabbisogno energetico normalizzato ad un valor medio di 24 MWh

<sup>4</sup>Il valore del 20% è ottenuto approssimando per difetto l'efficienza pari al 24% del ciclo completo dell'idrogeno che si ottiene dal prodotto dell'efficienza di elettrolizzazione e dell'efficienza della cella a combustibile, che sono rispettivamente 60% e 40%, come riportato in [44].

integrati nel giorno. In Fig.3.4 riportiamo gli andamenti giornalieri che caratterizzano ciascun mese dell'anno. Dagli andamenti di produzione da fotovoltaico e di fabbisogno energetico riportati

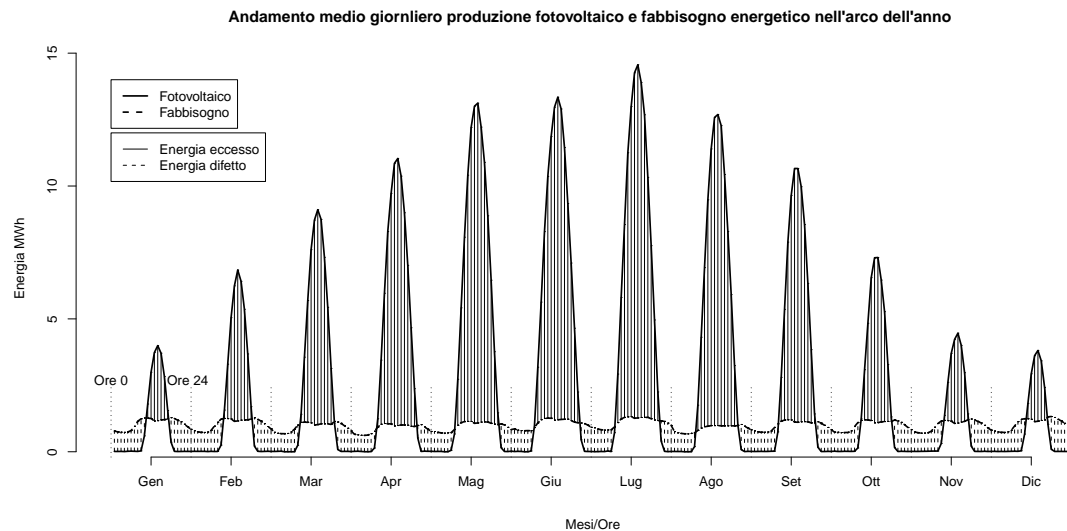


Figura 3.4: (Linea continua) Andamento medio giornaliero e variazione mensile dell'energia prodotta da fotovoltaico. (Linea tratteggiata) Andamento medio giornaliero e variazione mensile del fabbisogno energetico, normalizzato con il valore medio di 24 MWh integrati nel giorno. L'impianto fotovoltaico è dimensionato per essere associato ad un accumulatore ad idrogeno come descritto in dettaglio nel paragrafo. Confronto dell'energia da fotovoltaico in eccesso, indicata dall'area con linea continua, ed energia in difetto, indicata dall'area con linea tratteggiata.

in Fig.3.4 possiamo distinguere i seguenti intervalli di tempo nel corso del giorno:

1. Periodo in difetto: nelle ore di buio, o serale-notturno, (dalle 17 alle 8 circa) l'energia prodotta dal fotovoltaico è in difetto rispetto al fabbisogno. Questa energia in difetto dovrà essere fornita dall'idrogeno accumulato con l'energia in eccesso del periodo che segue;
2. Periodo in eccesso: nelle ore di luce (dalle 8 alle 17 circa) il fotovoltaico produce energia in eccesso rispetto al fabbisogno. Questa energia in eccesso sarà utilizzata per produrre e accumulare idrogeno che sarà riutilizzato nelle ore di buio.

I due periodi appena definiti cambiano da mese a mese, come dimostrano gli andamenti di Fig.3.4, quindi il modello di impianto qui presentato non deve essere dimensionato per accumulare in idrogeno e ricedere energia con un ciclo giornaliero, ma deve essere pensato per un accumulo e una successiva cessione di energia dilatata nell'arco dell'anno. Il periodo estivo più incisivo dal punto di vista della produzione in eccesso dovrà permettere l'accumulo di energia sia per il ciclo giornaliero sia per una riserva invernale.

Per dimensionare la superficie di un tale impianto fotovoltaico è necessario quindi impostare questo vincolo analizzando l'andamento annuale come riportato in Fig.3.4. Da questi andamenti

definiamo quindi l'energia in eccesso ( $E_{ecc}$ ), la somma di tutti i contributi in eccesso che derivano da tutti i mesi, e l'energia in difetto ( $E_{dif}$ ), la somma di tutti i contributi in difetto che derivano da tutti i mesi. L'energia in eccesso servirà per produrre e accumulare idrogeno, e nel momento del bisogno questo sarà riconvertito in energia per colmare l'energia in difetto <sup>5</sup>.

L'energia in difetto ottenuta dall'idrogeno sarà inferiore all'energia in eccesso per effetto dell'efficienza del ciclo  $energia \rightarrow idrogeno \rightarrow energia$ , quindi le due energia saranno legate dalla seguente relazione:

$$E_{dif} = \epsilon_H \cdot E_{ecc} \quad (3.4)$$

Questa relazione dovrà essere rispettata per il dimensionamento della superficie dell'impianto fotovoltaico. Per il calcolo di questa, osserviamo che al variare della superficie varia la produzione da fotovoltaico, quindi potrebbe variare l'intersezione fra gli andamenti energia prodotta e fabbisogno. Inoltre, siccome stiamo valutando una stima, non ci siamo preoccupati di ottenere una forma funzionale per i due andamenti, quindi un calcolo analitico non è possibile.

Da queste osservazioni possiamo concludere che il miglior modo per stimare la superficie che soddisfa la relazione 3.4 si può ottenere da un semplice calcolo iterativo che incrementa la superficie di piccole quantità fino ad ottenere il valore  $S_{foto+H}$  che soddisfa il vincolo energetico. A tale proposito abbiamo impostato come superficie iniziale pari a  $S_{foto}$ , quella dell'impianto fotovoltaico singolo studiato nel paragrafo precedente, quindi abbiamo eseguito incrementi successivi inserendo un fattore di superficie ( $f_S$ ) tale da incrementare la superficie dell'1% ad ogni iterazione secondo la relazione:

$$S_{foto+H} = f_S \cdot S_{foto} \quad (3.5)$$

Il calcolo iterativo fornisce i seguenti risultati <sup>6</sup>:

$$f_S = 2.5 \quad (3.6)$$

$$S_{foto+H} = 14.5ha \quad (3.7)$$

La Fig.3.4 riporta l'andamento della produzione da un impianto fotovoltaico dimensionato con questa superficie, quindi l'area complessiva dell'energia in difetto è pari al 20% dell'area complessiva dell'energia in eccesso.

Rispetto ad un impianto fotovoltaico tradizionale il modello associato all'accumulazione all'idrogeno necessita di una superficie maggiore di circa due volte e mezzo, ma notiamo che l'estensione rimane comunque sempre molto limitata rispetto all'estensione occupata dalle coltivazioni necessarie per alimentare una equivalente centrale a biomassa.

<sup>5</sup>Per l'impianto fotovoltaico abbiamo considerato, per il funzionamento utile alla produzione di energia, un irraggiamento minimo di  $100 W/m^2$ . Al di sotto di questo valore l'energia prodotta viene considerata nulla.

<sup>6</sup>Assumendo costante l'orario di intersezione fra i due andamenti si può ottenere un valore approssimato del fattore di superficie considerando il seguente bilancio energetico fra gli intervalli di eccesso e difetto:  $E_{fabb1} = E_{foto1} + E_{dif} = E_{foto1} + \epsilon_H \cdot E_{ecc}$ ;  $E_{fabb2} = E_{foto2} - E_{ecc}$ . Essendo  $E_{foto1} = f_S \cdot E_{foto1}^{24MWh}$  e  $E_{foto2} = f_S \cdot E_{foto2}^{24MWh}$ , insieme alle precedenti relazioni otteniamo la seguente espressione per il fattore di superficie:  $f_S = \frac{E_{fabb1} + \epsilon_H \cdot E_{fabb2}}{E_{foto1}^{24MWh} + \epsilon_H \cdot E_{foto2}^{24MWh}} \approx 2.3$ .



## 3.4 Problematiche

Affrontiamo ora le problematiche principali connesse alla tecnologia fotovoltaica, ovvero il ciclo solare (il quale condiziona l'assorbimento dei pannelli), l'albedo e la possibilità che l'utilizzo di determinati materiali possa essere causa di inquinamento. In fine sarà preso in considerazione il riciclo, una pratica ancora poco affermata.

### 3.4.1 Ciclo solare

La produzione di energia elettrica da alcune fonti rinnovabili è caratterizzata da disponibilità energetica variabile e a volte non prevedibile nel tempo, per cui è necessario trovare soluzioni che permettano di accumulare l'energia prodotta in eccesso nei momenti di massima disponibilità delle risorse, in modo tale da poterla utilizzare al momento opportuno. Come stato visto, la soluzione rappresentata dai moduli con accumulo di idrogeno.

### 3.4.2 Albedo

Una delle problematiche che l'uso del fotovoltaico potrebbe introdurre, riguarda il caso particolare dell'albedo.

Per albedo di una superficie intendiamo la frazione di luce o più in specifico di radiazione incidente che può essere riflessa indietro in tutte le direzioni: il valore dipende sia dal materiale incontrato prima della riflessione, sia dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata.

In genere si assegna il valore 1 quando tutta la luce incidente viene riflessa, mentre il valore 0 è associato in presenza di nessuna riflessione, parlando invece in termini di percentuali, se l'albedo massima ha valore 100%, la Terra presenta un valore medio che oscilla dal 37 al 40%.

Questo effetto può essere correlato alla temperatura poichè, se siamo in presenza di piccole percentuali di albedo, significa che abbiamo maggiore assorbimento della radiazione solare per cui maggiore temperatura.

In virtù di queste considerazioni potrebbe essere lecito chiedersi se il moltiplicarsi di questi impianti, a partire dai tetti delle abitazioni ad impianti industriali di dimensioni maggiori, possa in qualche modo provocare delle variazioni nel bilancio atmosferico energetico e comportare un aumento della temperatura media.

L'installazione dei pannelli fotovoltaici, potrebbero variare l'albedo di quel luogo, perché cambia la quantità di energia riflessa e, recenti studi (*Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics*, Nemet Gregory F., *Environmental science e technology* 2009) [45] hanno dimostrato che effettivamente si determina un piccolo aumento delle temperature: allo stesso modo potremmo chiederci cosa accadrebbe se la medesima quantità di energia elettrica prodotta dai pannelli solari, fosse prodotta da una centrale convenzionale, visto che la combustione di combustibili fossili ha come conseguenza l'emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera, il quale determina un innalzamento delle temperature.

Mettendo a confronto le modificazioni in termini di temperature emerge che, a parità di energia

prodotta, i pannelli fotovoltaici causano un effetto che è mediamente 30 volte minore rispetto all'effetto dei gas serra.

Questo studio riguarda gli effetti su larga scala, altri studi sono stati condotti per valutare invece gli effetti nelle città: uno di questi è rappresentato da *Solar energy and global heat balance of a city*, Claude-Alain Roulet, *Solar Energy* [46]. Questo lavoro prende in considerazione il calore urbano della città di Tokyo, valuta l'effetto che hanno i pannelli solari come trascurabile, ovvero determinano un piccolo aumento di temperatura ma questo rappresenta un incremento trascurabile rispetto al flusso di calore che deriva dalle altre attività come l'utilizzo di energia elettrica o anche le semplici automobili.

Per ovviare completamente a questo problema bisognerebbe cercare di installare i pannelli dove l'albedo è già stato inevitabilmente modificato, cercare quindi installazioni mirate: in questo senso si potrebbe procedere con l'installazione di pannelli prevalentemente sui tetti degli edifici, in parcheggi ed altre strutture in cui l'introduzione di questa tecnologia non comporterebbe variazioni significative in fatto di albedo.

### 3.4.3 Tellururo di Cadmio

Tra i diversi vantaggi che il fotovoltaico propone, si può sicuramente ricordare la mancanza di emissioni derivanti da combustibili fossili, i quali non vengono impiegati nel processo di produzione dell'energia. Accanto a questo indubbio vantaggio, la diffusione degli economici moduli a film sottile in Telluro di Cadmio, potrebbe far insorgere qualche dubbio in merito all'impatto ambientale determinato dall'installazione di questi e in situazioni particolari, che ad esempio possono coinvolgere lo smaltimento del materiale con conseguente liberazione di CdTe.

Il Tellururo di Cadmio è stato inserito nella struttura fotovoltaica perché il proprio uso determina processi produttivi particolarmente efficienti e soprattutto la quantità di semiconduttore utilizzata è inferiore di circa cento volte rispetto a quella necessaria nella realizzazione dei moduli in Silicio Cristallino: inoltre il CdTe presenta il grande vantaggio di essere più facilmente riproducibile e soprattutto adatto alla produzione industriale per i costi decisamente ridotti.

Ciò che rende l'uso di questo semiconduttore particolarmente conveniente è un gap di energia tra la banda di conduzione e quella di valenza di 1.5 eV, il che lo rende particolarmente adatto ad assorbire energia, portando l'assorbimento dei fotoni incidenti a valori prossimi al 90%.

Il sospetto che questo composto possa essere tossico deriva dalle caratteristiche intrinseche di un suo componente, ovvero il Cadmio, la cui tossicità risulta dimostrata ed è per questo che l'unione europea ha fissato il limite massimo di presenza all'interno delle batterie su valori prossimi allo 0.002%.

Inserito in questo contesto, l'unica possibilità di immettere CdTe nell'ambiente è rappresentata dalla decomposizione dello stesso, il quale si può manifestare in presenza di temperature prossime a  $1000^{\circ}\text{C}$ , raggiungibili quindi solo in caso di incendio. In questo caso è necessaria una precisazione, essendo in CdTe incapsulato all'interno del modulo fotovoltaico, la possibilità di rilascio è molto remota anche in caso di incendio.

In merito a questa problematica il *Brookhaven National Laboratory* presso il *National Photovoltaic Environmental Health and Safety Assistance Center*, ha effettuato test per valutare il rischio in merito all'insorgenza di un incendio, riscontrando che il CdTe cominciava a fondere e volatilizzare in modo graduale già ad 800°C di temperatura.

Il rilascio riscontrato è stato minimo, appena dello 0.6% ma non avviene emissione in atmosfera perché, come già accennato, il CdTe rimane intrappolato all'interno della protezione di vetro della struttura fotovoltaica.

Va inoltre sottolineato che durante un incendio le sostanze che vengono liberate in atmosfera sono molto più dannose della sostanza volatile che deriva dalla fusione del CdTe, soprattutto in quantità estremamente maggiori.

Oltre alla possibilità di una dispersione per volatilizzazione, altri test scartano l'ipotesi di contaminazione di falde idriche in seguito a dilavamento<sup>7</sup>, per cui si può affermare che è possibile smaltire i moduli in CdTe come normali rifiuti solidi urbani: è per questo motivo che la normativa che regola in Italia lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici (ovvero il D.l. 151/2005), assimila questi ai rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche<sup>8</sup>.

#### 3.4.4 Riciclo

Un particolare da sottolineare è che gli impianti che di fatti riciclano i moduli fotovoltaici sono davvero pochi, i più importanti sono rappresentati dalla statunitense *First Solar* [40] e la tedesca *Deutsche Solar AG*: quest'ultima nel 2003 ha ultimato un impianto pilota di riciclaggio in grado di recuperare completamente l'alluminio ed il 90% del Silicio e del vetro dei pannelli.

L'utilità del riciclo dei pannelli si riscontra inoltre nel risparmio dei costi di produzione futuri, per cui il tempo necessario affinché i moduli generino una quantità di energia pari a quella spesa per produrli sarà ridotto di un terzo rispetto a quello attuale.

Sempre parlando di riciclo di pannelli, nel 2007 è nata la *PV Cycle*, la quale si occupa dello sviluppo di soluzioni per il riciclo di pannelli fotovoltaici in Europa, il cui peso attuale è stimato attorno alle 3500 tonnellate: a questa associazione hanno aderito le industrie di 31 Paesi Europei e l'obiettivo sarebbe quello di recuperare dal 65% al 85% del materiale utilizzato fin'ora.

---

<sup>7</sup>per valutare la contaminazione di falde idriche in seguito a dilavamento, i moduli con CdTe sono stati immersi in soluzione ed il monitoraggio dei metalli disciolti non ha mostrato cambiamenti quantitativi rilevanti

<sup>8</sup>I dati riportati derivano da studi sperimentali effettuati su pannelli fotovoltaici [47] [48]



## Capitolo 4

# Efficienze energetiche a confronto

In questo capitolo stimiamo le efficienze energetiche delle tre tecnologie approfondite in questa tesi: centrale biogas, centrale a olio combustibile e fotovoltaico con accumulazione ad idrogeno. Per efficienza energetica intendiamo l'efficienza di conversione dell'energia solare in energia elettrica. Anche le centrali a biogas e biomassa sono sostanzialmente dei convertitori di energia solare in energia elettrica. Infatti l'apporto più significativo di energia fornita all'impianto di produzione è sicuramente l'energia solare che serve per la crescita delle piantagioni dalle quali si ricava il combustibile per la centrale.

Queste tecnologie convertono energia solare in energia elettrica attraverso due fasi: la prima converte energia solare in materia organica per mezzo della fotosintesi, la seconda è una fase di trasformazione della pianta in combustibile.

Il fotovoltaico invece converte direttamente energia solare in energia elettrica. Il fatto che la conversione in questo caso sia diretta dovrebbe suggerire la possibilità di avere un'efficienza maggiore rispetto alle tecnologie della biomassa. Il modello di fotovoltaico qui considerato si compone però di un accumulatore all'idrogeno e questo incide con una parziale diminuzione dell'efficienza, in quanto stiamo introducendo un passaggio intermedio.

Presentiamo nelle sezioni che seguono le valutazioni delle efficienze per ciascuna tecnologia e le confrontiamo fra di loro. Per evidenziare il confronto fra le tre tecnologie e per mantenere coerenza con le valutazioni fatte nei capitoli precedenti prendiamo come riferimento centrali che producano nell'arco della giornata media una energia integrata di 24 MWh, dimensionate quindi per soddisfare il fabbisogno di una comunità che richiede la stessa quantità di energia nell'arco del giorno.

## 4.1 Energia solare

Per valutare le efficienze di conversione dobbiamo anzitutto conoscere l'energia solare fornita al sistema di produzione. Per quanto riguarda il sistema fotovoltaico l'energia solare da considerare sarà quella di tutto l'anno, mentre per gli impianti a biomassa considereremo sia l'energia solare integrata nell'anno sia quella integrata nel corso dei mesi estivi durante i quali si sviluppano le piantagioni.

Analogamente a quanto studiato nel capitolo sul fotovoltaico, prendiamo in considerazione l'andamento della radiazione visibile media nell'arco dell'anno valutando gli andamenti mensili medi. Quindi ogni mese sarà caratterizzato da un andamento giornaliero della radiazione visibile media ottenuto dalla media degli andamenti giornalieri di quel mese per gli anni dal 2005 al 2009. Riportiamo in Fig.4.1 l'andamento caratteristico della radiazione visibile media incidente su una superficie orizzontale di  $1 m^2$  ottenuto dai dati Dexter []. Dai dati utilizzati per lo studio

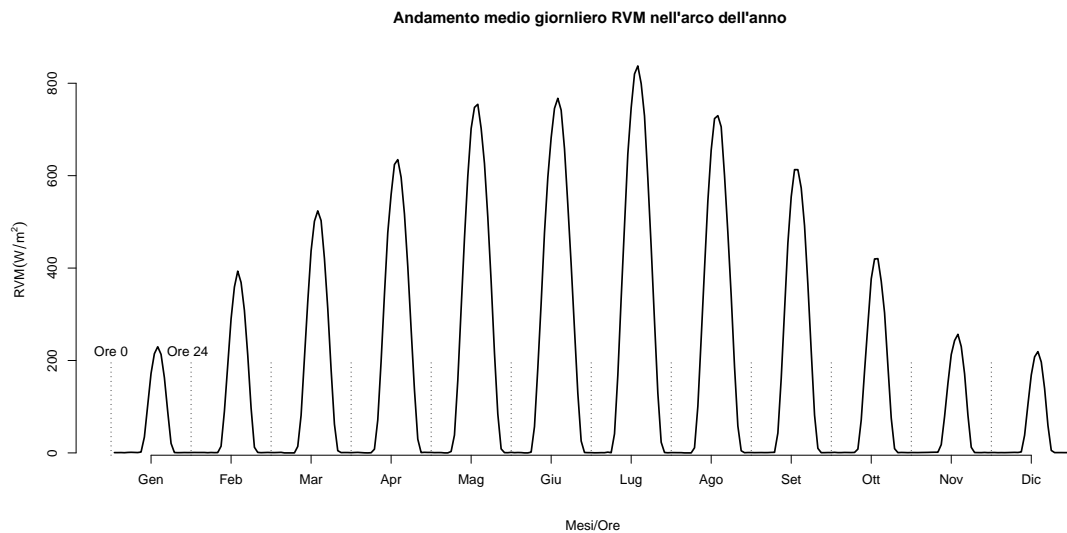


Figura 4.1: Andamento medio giornaliero e variazione mensile della radiazione visibile media per  $m^2$  su Ferrara.

dell'andamento medio della RVM su Ferrara possiamo stimare l'energia solare totale che incide su una superficie di  $1 m^2$  nell'arco di un intero anno ( $E_{anno}^{sole}$ ) e nell'arco dei mesi estivi ( $E_{estate}^{sole}$ )<sup>1</sup>, intesi da Giugno a Settembre<sup>2</sup>:

$$E_{anno}^{sole} = 1430 kWh/m^2 \quad (4.1)$$

$$E_{estate}^{sole} = 720 kWh/m^2 \quad (4.2)$$

<sup>1</sup>Avendo utilizzato valori riferiti al giorno medio per ogni mese, il calcolo è stato eseguito considerando tutti mesi dell'anno di 30 giorni.

<sup>2</sup>Sono stati considerati i quattro mesi estivi che possono essere più significativi per la crescita delle piantagioni.

I valori qui riportati sono consistenti con i calcoli eseguiti con il servizio Atlante Solare Italiano di Enea [50], i quali riportano rispettivamente  $1428 \text{ kWh/m}^2$  e  $680 \text{ kWh/m}^2$ . Conoscendo l'energia solare per unità di superficie siamo in grado di calcolare l'energia solare fornita agli impianti di produzione energetica.

## 4.2 Efficienze di conversione dell'energia solare

Per il calcolo e il confronto delle efficienze fra le tre tecnologie in esame, prendiamo in considerazione una centrale a biogas e una a olio vegetale entrambe da 1 MW di potenza. Ai fini della valutazione del fabbisogno di terreni, considerare questa potenza è consistente con il fatto che stiamo ipotizzando un fabbisogno energetico di 24 MWh giornalieri, che può essere soddisfatto da una potenza costante di 1 MW. È ovvio che una centrale da 1 MW non può praticamente soddisfare una comunità da 24 MWh giornalieri, in quanto vi sono dei picchi di potenza richiesta che la centrale non potrebbe soddisfare. Ma è anche chiaro che se considerassimo una centrale con potenza maggiore, questa non lavorerebbe tutto il giorno a regime, di conseguenza il fabbisogno di combustibile non sarebbe quello realmente previsto per la potenza di regime. È quindi ragionevole<sup>3</sup> ipotizzare un fabbisogno di combustibile equivalente a quello di una centrale da 1 MW di potenza.

Dal Cap.2 abbiamo le estensioni dei terreni coltivabili che servono per soddisfare il fabbisogno di una centrale a biogas e di una a olio combustibile da 1 MW, che sono rispettivamente:

$$S_{biogas} = 420ha \quad (4.3)$$

$$S_{olio} = 1063ha \quad (4.4)$$

Le rispettive efficienze di conversione, considerando solamente l'energia solare estiva, risultano:

$$\epsilon_{biogas}^{sole/estate} = \frac{E_{biogas}^{el/anno}}{E_{biogas}^{sole/estate}} = \frac{E_{fab}}{E_{estate}^{sole} \cdot S_{biogas}} = \frac{8640MWh}{720kWh/m^2 \cdot 420ha} = 0.29\% \quad (4.5)$$

$$\epsilon_{olio}^{sole/estate} = \frac{E_{olio}^{el/anno}}{E_{olio}^{sole/estate}} = \frac{E_{fab}}{E_{estate}^{sole} \cdot S_{olio}} = \frac{8640MWh}{720kWh/m^2 \cdot 1063ha} = 0.11\% \quad (4.6)$$

Queste sono le efficienze reali di conversione, ma è ragionevole considerare un'efficienza effettiva valutando l'energia solare che incide sui terreni nell'arco di tutto l'anno, in quanto comunque durante l'inverno il terreno non è utilizzato, ma prenotato per la stagione adatta. Le rispettive

<sup>3</sup>Per il teorema del valor medio, l'integrale del valor medio nel giorno è uguale all'integrale del fabbisogno nel giorno.

efficienze in questo caso risultano:

$$\epsilon_{biogas}^{sole/anno} = \frac{E_{biogas}^{el/anno}}{E_{biogas}^{sole/anno}} = \frac{E_{fab}}{E_{anno}^{sole} \cdot S_{biogas}} = \frac{8640MWh}{1430kWh/m^2 \cdot 420ha} = 0.14\% \quad (4.7)$$

$$\epsilon_{olio}^{sole/anno} = \frac{E_{olio}^{el/anno}}{E_{olio}^{sole/anno}} = \frac{E_{fab}}{E_{anno}^{sole} \cdot S_{olio}} = \frac{8640MWh}{1430kWh/m^2 \cdot 1063ha} = 0.057\% \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Per quanto riguarda invece l'efficienza dell'impianto fotovoltaico con accumulo di idrogeno utilizziamo la superficie pari a circa 15 ha, come calcolata nel Cap.3, la quale si riferisce ad un impianto dimensionato per soddisfare il fabbisogno di 24 MWh giornalieri. Considerando quindi gli andamenti annuali otteniamo la seguente efficienza:

$$\epsilon_{fotoH}^{sole} = \frac{E_{fotoH}^{el/anno}}{E_{fotoH}^{sole/anno}} = \frac{E_{fab}}{E_{anno}^{sole} \cdot S_{fotoH}} = \frac{8640MWh}{1430kWh/m^2 \cdot 15ha} = 4.2\%^4 \quad (4.10)$$

Riassumiamo le stime di efficienza nella Tab.4.1 e in Fig.4.2 .

Impianto	$\epsilon_{effettiva}$	$\epsilon_{reale}$
Fotovoltaico	4.2%	4.2%
Biogas	0.14%	0.29%
Olio	0.057%	0.11%

Tabella 4.1: Efficienze di conversione dell'energia solare in energia elettrica per le tecnologie a fotovoltaico+idrogeno, centrale a biogas e centrale a olio vegetale. Per le centrali a biomassa sono state calcolate due efficienze: una reale che considera la reale energia solare impiegata per la crescita delle piantagioni; una effettiva che considera l'energia solare nell'arco di un intero anno.

### 4.3 Confronto delle efficienze di riconversione solare

Confrontiamo, per maggiore chiarezza, in Fig4.2 le stime di efficienza reale ed effettiva determinate nel paragrafo precedente. Le stime di efficienza reale di riconversione dell'energia solare mostrano che una tecnologia a fotovoltaico con accumulo di energia è circa 14 volte più efficiente di una centrale a biogas e circa 38 volte più efficiente di una centrale a olio vegetale, mentre la centrale a biogas è circa 3 volte più efficiente di una centrale a olio vegetale. Siccome è comunque ragionevole considerare il fatto che i terreni adibiti alla coltivazione delle piantagioni per il fabbisogno per le centrali a biomassa sono pur sempre impegnato durante tutto l'anno, sembra opportuno considerare come contributo all'energia solare anche la quantità che incide sui terreni nei periodo invernali o di non utilizzo. In base a queste valutazioni notiamo che il fotovoltaico risulta più efficiente di una centrale a biomassa e di un a olio vegetale rispettivamente di un fattore pari a circa 30 e 74.

<sup>4</sup>Valutazioni preliminari delle incertezze ottenute valutando i singoli anni dal 2005 al 2009 mostrano intervalli di variazione dell'ordine del 1% - 2%



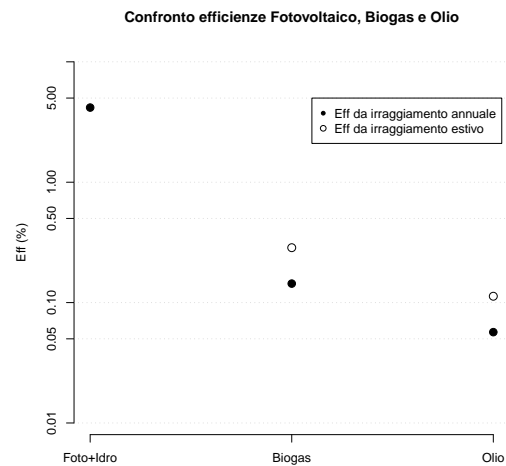


Figura 4.2: Efficienze effettive da irraggiamento annuale (cerchio pieno) per fotovoltaico con accumulazione di idrogeno, biomassa e olio vegetale. Efficienze reali, solo per biomassa e olio, da irraggiamento estivo (cerchio vuoto).

Le stime indicano in ogni caso una prevalenza della tecnologia a fotovoltaico. Vogliamo porre l'attenzione su due osservazioni in merito alle stime valutate e ai risultati ottenuti.

I risultati qui ottenuti devono essere considerati come delle stime e non come delle previsioni precise, quindi le imprecisioni con le quali sono state determinate possono anche essere dell'ordine del 20%-30%. È però opportuno notare che le considerazioni fatte per la tecnologia che ha mostrato i migliori risultati, il fotovoltaico, sono del tutto conservative per diverse ragioni. Anzitutto abbiamo scelto un valore di efficienza delle celle fotovoltaiche decisamente inferiore ai valori medi dei prodotti commerciali di alto livello e in secondo luogo abbiamo considerato una superficie di fotovoltaico orizzontale, che decisamente incide a diminuire la produzione di energia. Si potrebbe quindi anche affermare che i valori ottenuti per il fotovoltaico non solo sono conservativi, ma potrebbero con buona probabilità essere stati sottostimati.

Vogliamo inoltre sottolineare che per le centrali a biomassa abbiamo considerato nel calcolo dell'efficienza tutta l'energia elettrica prodotta, senza sottrarre la parte che serve a far funzionare la centrale stessa, che possiamo identificarlo come un autoconsumo della centrale stessa. Questo farebbe diminuire l'efficienza di conversione. Nell'efficienza del sistema fotovoltaico accoppiato ad un accumulatore di idrogeno, l'efficienza di elettrolizzazione tiene in considerazione anche l'energia necessaria per la pressurizzazione minima dell'idrogeno. Anche per il fotovoltaico non abbiamo considerato l'autocomsumo, che riteniamo comunque essere decisamente inferiore a quello di una centrale termica.

Un ulteriore dettaglio da mettere in evidenza è il fatto che le efficienze sono state valutate

per la conversione di energia solare in energia elettrica. Dai progetti e descrizioni delle centrali a biomassa si evidenzia che non si utilizza solo l'energia elettrica prodotta, ma anche parte dell'energia termica prodotta dal funzionamento degli impianti viene recuperata e riutilizzata come riscaldamento o altro. In ogni caso, questo contributo di energia prodotta andrebbe ad aumentare l'efficienza della conversione di energia solare in energia utile. È opportuno però notare che un recupero del calore dovuto ai processi si può applicare anche negli impianti a fotovoltaico. In commercio esistono già pannelli fotovoltaici/termici che utilizzano un sistema di raffreddamento per una doppia funzione: anzitutto si recupera calore raffreddando le celle fotovoltaiche e lo si può utilizzare come riscaldamento e in secondo luogo l'abbassamento della temperatura delle celle si ripercuote in un incremento dell'efficienza di conversione. Quindi un sistema fotovoltaico accoppiato alla produzione di acqua calda, non solo permette di ottenere anche energia termica, ma allo stesso tempo incrementa la produzione di energia elettrica grazie all'incremento di efficienza.

Negli studi svolti in questa tesi comunque non abbiamo considerato questo contributo all'energia utile in nessuna delle tecnologie adottate.

Queste considerazioni dovrebbero essere sufficienti per esprimere un giudizio positivo a favore del fotovoltaico, rispetto alle altre tecnologie. Inoltre devono essere prese in considerazione per rendere queste stime potenzialmente migliorabili con studi e analisi più approfonditi.

## Capitolo 5

# Conclusioni

Gli studi svolti in questa tesi mostrano come le valutazioni degli aspetti positivi e negativi delle tre tecnologie (centrale a biogas, centrale a biodiesel e fotovoltaico), individuino il fotovoltaico come il migliore candidato per diversi aspetti. Tra questi i principali sono un impatto ambientale pressoché nullo e l'assenza dell'impiego di fertilizzanti, i quali comporterebbero l'immissione in atmosfera di prodotti azotati. Inoltre è stato dimostrato che, benché la problematica dell'albedo possa essere un'obiezione plausibile, l'installazione dei pannelli non comporta un significativo peggioramento della situazione presente.

Anche confrontando le tre alternative dal punto di vista delle efficienze emerge che il fotovoltaico è più efficiente di una centrale a biomassa di un fattore di circa 30: questo valore sale fino ad un fattore pari a 74 se il confronto viene fatto con una centrale a biodiesel. Sempre da un raffronto è emersa la convenienza anche in fatto di terreni occupati, decisamente inferiori per il fotovoltaico.

Le stime ottenute da questo lavoro dovrebbero incentivare futuri studi più approfonditi e dettagliati che necessitano di conoscenze e di esperti in diversi campi, dall'agricoltura alle più moderne tecnologie per la produzione di energia.

Quello che si nota è che le variabili sono molte e, benché il fotovoltaico emerga come il migliore rispetto alle altre alternative considerate, bisognerebbe sempre valutare il contesto ambientale in cui si decide di operare una scelta. In base alle caratteristiche di un territorio si potrebbe pensare di operare una scelta piuttosto che un'altra, in modo tale da non apportare eccessivi cambiamenti alla fisionomia stessa del territorio o modificare le attività ad esso connesse precedentemente.







# Bibliografia

- [1] Energia per l'astronave Terra  
di Nicola Armaroli e Vincenzo Balzani
- [2] Sito ufficiale dell'IPCC, il gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico.  
<http://www.ipcc.ch/>
- [3] Legge 24 dicembre 2007, n.244. Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (legge finanziaria 2008).
- [4] Decreto legislativo n 79 del 16 marzo 1999, che costituisce il recepimento della direttiva comunitaria 96/92/CE del Parlamento e del Consiglio Europeo del 19 dicembre 1996. Si tratta del decreto che ha introdotto in Italia la liberalizzazione del settore elettrico.
- [5] Energia da biomasse, piccoli impianti nascono. Roberto Faben, Agricoltura dicembre 2006
- [6] Produzione di energia da biomasse. Possibilità per produzioni agricole marginali, residui agricoli e industriali, rifiuti.  
studio di Mirko Morini e Michele Pinelli, Dipartimento di Ingegneria Università degli studi di Ferrara.
- [7] La produzione di energia da combustibili di origine rinnovabili.  
studio di Mirko Morini. Gruppo di Ricerca di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente, Dipartimento di Ingegneria Università degli studi di Ferrara.
- [8] Energia da biomasse, piccoli impianti nascono. di Roberto Faben
- [9] Olio vegetale puro. Produzione ed uso come biocarburante in agricoltura. Associazione Italiana Energie Agroforestali, Camera di Commercio di Padova.
- [10] Bondeno ed agroenergia: opportunità a confronto. Finbieticola Bondeno: Le oleaginose e l'energia. di Mario Guidi, Presidente Finbieticola Bondeno.
- [11] Sito internet con informazioni generali inerenti alla biomassa.  
<http://www.biomasseuropa.com>
- [12] Prontuario dei consumi di carburante per l'impiego agevolato in agricoltura.  
<http://www.enama.it>

- [13] Conversione energetica di biomasse agricole. Roberto Bettocchi e Mirko Morini  
<http://www.energiaspiegata.it>
- [14] Sito internet dedicato alla biomassa. <http://www.biomassaeuropa.com>
- [15] La tassa europea sulla CO<sub>2</sub> per promuovere soluzioni energetiche alternative.  
<http://www.ecoblog.it>
- [16] Sito ufficiale dello Scripps Institution of Oceanography, uno dei piú importanti centri di studio e ricerca per l'oceano. <http://www.sio.ucsd.edu/Research/>
- [17] Effects of past, present, and future ocean carbon dioxide concentrations on the growth and survival of larval shellfish. Stephanie C. Talmage And, Christopher J. Gobler.
- [18] Sito internet collegato alla costruzione della centrale di Bondeno.  
<http://www.renewenergy.it/>
- [19] Sito ufficiale della Schamack Biogas. <http://www.schmack-biogas.com>
- [20] Schamack Biogas presenta il piú grande impianto biogas in Italia. <http://www.petrovilla.it>
- [21] Centrale ad olio di palma, anche l'associazione dei consumatori dice no. Bondeno: presa di posizione ufficiale: illustrati gli svantaggi della scelta. <http://www.estense.it>
- [22] Coldiretti: ridurre le accise su biodiesel. Evitare i fai da te illegali e contribuire a contenere l'inquinamento. <http://www.coldiretti.it>
- [23] Procedure per l'assegnazione del carburante per l'impiego agevolato in agricoltura. Enama. Ente Nazionale per la Meccanizzazione Agricola. <http://www.enama.it>
- [24] Approximate Fuel Consumption Chart. Diesel Service and supply inc.
- [25] Vivere su una nuova Terra. Limiti per un pianeta sano. Le Scienze, aprile 2010.
- [26] Soluzioni per le sfide ambientali. Le proposte di alcuni esperti per tenere sotto controllo i processi ambientali. Le Scienze, aprile 2010.
- [27] Sconfiggere il mito della crescita. Le Scienze, aprile 2010.
- [28] La crescita zero é davvero necessaria? Le Scienze, aprile 2010.
- [29] Le vere lacune dei modelli climatici. Le Scienze, aprile 2010.
- [30] Risolvere il problema dell'azoto. Le Scienze, giugno 2010.
- [31] Sito ufficiale della National Institutes of Health, una delle piú importanti agenzie di ricerca medica nel territorio americano. <http://www.nih.gov/>
- [32] Raschiare il fondo del barile. Le Scienze, aprile 2010.



- [33] Sito ufficiale di Terna, ente che si occupa della gestione ed elaborazione dei dati inerenti all'energia elettrica in Italia. In particolare sono stati consultati i dati inerenti ai carichi, consumi e produzione. <http://www.Terna.it>
- [34] Studio sperimentale di celle fotovoltaiche. Una proposta didattica sviluppata nel progetto IRDIS. Giacomo Torzo.
- [35] An introduction to fuel cells and hydrogen technology. Brian Cook
- [36] Photovoltaic technologies: the benefits of diversity. PhotoVoltaic, technology platform.
- [37] Idrogeno, energia dal futuro. Enea
- [38] Making the photovoltaic industry bouble gree. Lyfe cycle of crystalline silicon modules.
- [39] Associazione per il riciclo del fotovoltaico. <http://www.pvcycle.org>
- [40] Sito dell'azienda americana che gestisce l'impianto pilota per il riciclo di pannelli fotovoltaici. <http://www.firstsolar.com>
- [41] Fuel Cell Handbook. EGandG Technical Service, Inc.
- [42] European Photovoltaic Tecnology Platform. <http://www.eupvplatform.org>
- [43] Photovoltaic Tecnologies: the benefit of diversity. Wim Sinke, Chairman of the European Photovoltaic Tehnology Platform.
- [44] Impianto sperimentale per la produzione di energia elettrica fotovoltaica con sistema di accumulo di idrogeno Domenico Casadei, Gabriele Grandi, Claudio Rossi, Mario Paolone. Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna. <http://www.die.ing.unibo.it/pers/grandi/papers/Energia2005.pdf>
- [45] Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics, Nemet Gregory F., Environmental science e technology 2009. Environemental Science and Tecnology, ACS publication.
- [46] Pannelli fotovoltaici e inquinamento termico. Francesco Aliprandi, marzo 2010
- [47] Telloruro di Cadmio: Eldorado del fotovoltaico o insidia ambientale? Giovanni Palmisano, Vincenzo Augugliaro, Rosaria Ciriminna, Vittorio Loddo, Mario Pagliaro Polo fotovoltaico della Sicilia
- [48] Fotovoltaico sostenibile: il riciclo dei pannelli Giovanni Palmisano, Polo Solare Organico della Regione Lazio
- [49] ARPA Emilia Romagna, Osservazioni e Dati, Servizio Dexter:  
<http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioniedati/dexter>  
<http://dexter-smr.arpa.emr.it/Dexter/Login>

- [50] ENEA Fonti Rinnovabili, Atlante Italiano della Radiazione Solare:  
<http://www.solaritaly.enea.it/>

# Elenco delle figure

1.1	Aumento della CO <sub>2</sub> in atmosfera . . . . .	4
3.1	Andamento giornaliero medio RVM . . . . .	26
3.2	Fabbisogno energetico e confronto con fotovoltaico . . . . .	28
3.3	Fabbisogno energetico e fotovoltaico giornalieri, variazione annuale . . . . .	29
3.4	Andamenti giornalieri, variazione mensile, fotovoltaico e fabbisogno. . . . .	31
4.1	Andamento giornaliero, variazione mensile, RVM. . . . .	38
4.2	Efficienze di conversione Fotovoltaico, Biogas e Olio vegetale. . . . .	41



# Elenco delle tabelle

2.1	Resa . . . . .	17
2.2	Terreni occupati . . . . .	17
4.1	Efficienze energetiche fotovoltaico, biogas e olio vegetale . . . . .	40