



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

hic sunt futura

DIPARTIMENTO POLITECNICO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE

Panorama energetico italiano: guidare una transizione sostenibile

LAUREANDO

Matteo Garbo

Matricola 142841

RELATORE

Prof. Savino Stefano

ANNO ACCADEMICO
2021/2022

*To my parents
and friends*

Indice

1	Introduzione	1
2	Fonti energetiche	3
2.1	Fonti rinnovabili	3
2.1.1	Irraggiamento solare	3
2.1.2	Vento	6
2.1.3	Biomasse	6
2.1.4	Maree	7
2.1.5	Correnti marine	9
2.1.6	Precipitazioni	10
2.2	Fonti non rinnovabili	11
2.2.1	Gas naturale	11
2.2.2	Carbone	13
2.2.3	Petrolio	14
3	Impianti	17
3.1	Impianto fotovoltaico	17
3.1.1	Effetto fotovoltaico	17
3.1.2	Cella solare	18
3.1.3	Pannello fotovoltaico	19
	Bibliografia	21
	Ringraziamenti	23



Introduzione

2

Fonti energetiche

Parlando di fonti energetiche si fa una prima suddivisione di esse in fonti rinnovabili e non rinnovabili, per ciascuna verranno elencati e vari tipo di impianti usati per sfruttarla e trasformarla in energia.

2.1 FONTI RINNOVABILI

Sono considerate fonti rinnovabili tutte quelle provenienti da:

- Irraggiamento solare
- Vento
- Biomasse
- Maree
- Correnti marine
- Precipitazioni

2.1.1 IRRAGGIAMENTO SOLARE

La radiazione solare è l'energia emessa dal sole, generata a partire da reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel sole producendo radiazioni elettromagnetiche a diversa frequenza e lunghezza d'onda le quali trasportano l'energia solare.

La radiazione solare che raggiunge il livello più alto dell'atmosfera terrestre è mediamente $1367 \frac{W}{m^2}$ chiamata costante solare (S).

S rappresenta la quantità di energia trasmessa ad un disco di diametro uguale a quello terrestre posto tangenzialmente al livello più alto dell'atmosfera.

In buona approssimazione considerando[5]:

- fenomeni di riflessione dati dalle nuvole
- fenomeni di riflessione dati dalle polveri presenti in atmosfera
- fenomeni di interazione chimica con i gas presenti in atmosfera
- fenomeni di scattering

A causa dei fenomeni elencati sopra, le radiazioni solari che arrivano al suolo presentano quindi due componenti:

- diretta, cioè la componente che raggiunge il suolo senza venir in alcun modo perturbata e quindi con la stessa direzione del sole
- diffusa, costituita dalla componente che raggiunge il suolo dopo essere stata dispersa, assorbita ed eventualmente re-irraggiata

La presenza di due componenti risulta di fondamentale importanza durante il processo di captazione e quindi va tenuta in considerazione durante la scelta della tipologia di impianto da installare, argomento che verrà trattato nel capitolo successivo. L'industria statunitense in collaborazione con l'ASTM¹ ha definito tre standard:

1. AM0
2. AM1.5-f
3. AM1-37°

Prima di andare a spiegare questi tre standard è importante definire un valore m tale da rispettare la seguente proporzione matematica $m = \frac{1}{\cos z}$ come si evince nella figura sottostante:

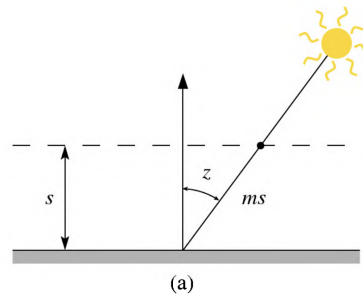


Figure 2.1: Percorso delle radiazioni solari

Il primo standard fa riferimento all'irradianza nel livello più alto dell'atmosfera, gli altri invece all'irradianza che giunge al suolo dopo un percorso di lunghezza $m = 1,5$ in un'atmosfera limpida, dove per limpida si considera una visibilità di 23 km. La seconda fa nello specifico riferimento ad una superficie A_n ortogonale ai raggi solari, la seconda fa riferimento ad una superficie A_i rivolta a sud ed inclinata di un'angolo $\beta = 37^\circ$ rispetto al piano orizzontale, nell'ipotesi di un coefficiente di riflessione $\rho_s = 0,2$.

¹American Society for Testing and Materials

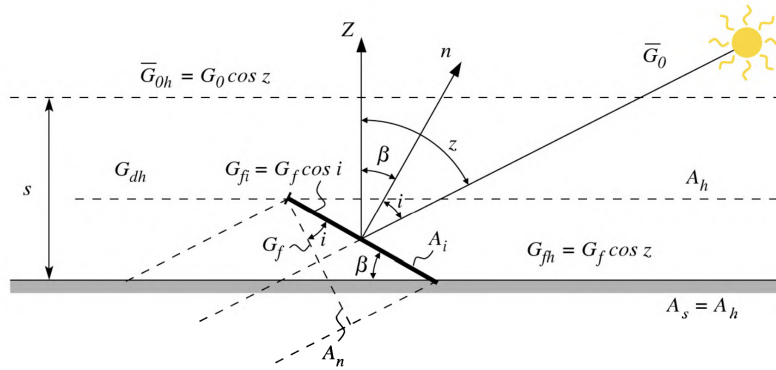


Figure 2.2: Rappresentazione superfici standard AM1.5-f AM1-37°

L'energia trasportata dalle radiazioni solari possiamo dividerla sostanzialmente in due componenti:

- **Componente visibile:** quella con lunghezza d'onda $[\lambda]$ tra i 400 ed i 700 nm
- **Componenti ad energia minoritaria:**
 - **ultravioletti** λ tra i 100 ed i 400nm
 - **infrarossi** λ tra i 700nm ed 1mm

Successivamente questa ulteriore suddivisione ci sarà utile per spiegare alcune tecnologie che in grado di lavorare sulle singole componenti.

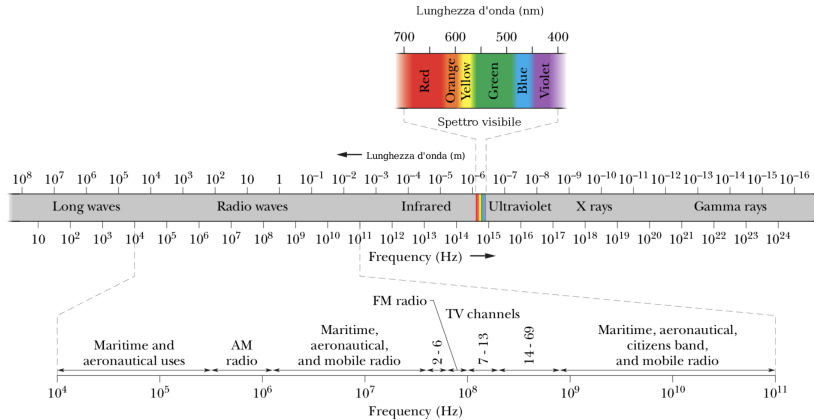


Figure 2.3: Radiazione solare

2.1.2 VENTO

Quello che comunemente viene chiamato vento è il movimento di una massa d'aria da una regione ad alta pressione ad una a bassa pressione.

Quando si parla di vento ci sono diversi aspetti da considerare quali:

- Velocità
- Densità della massa d'aria
- Contenuto energetico

Per contenuto energetico si intende l'energia cinetica che l'aria ha in movimento:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (Avt\rho) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (Avt\rho) \cdot v^2$$

Possiamo notare come l'energia cinetica che la massa d'aria considerata possiede dipende da tutti i parametri sopra elencati, capire il modo in cui essi partecipano al bilancio energetico ci permetterà nei capitoli successivi di comprendere il funzionamento degli impianti eolici.

2.1.3 BIOMASSE

Per biomasse intendiamo tutta quella serie di prodotti organici usati per produrre calore ed elettricità in specifici impianti appositamente progettate.

Sono classificabili in base al fatto che vengano o meno prodotte per generare energia elettrica[6]:

- Biomasse primarie
- Biomasse secondarie

Nella prima categoria inseriamo tutto il materiale organico prodotto con lo specifico scopo energetico mentre nella seconda vengono inserite tutti i prodotti organici che sono il risultato di scarti residenziali ed industriali.

Una volta specificato tutto ciò che è considerabile biomassa andiamo ad elencare le tecniche utilizzate per sfruttare l'energia potenziale contenuta in esse[1]:

- **Conversione termica** in questa tipologia si procede tramite un riscaldamento della biomassa per produrre combustibili in vario stato. In questa categoria sono a loro volta inserite tre tecniche che vanno a loro volta a generare combustibili in diverso stato:
 - **Torrefazione:** processo che prevede il riscaldamento della biomassa ad una temperatura compresa tra i 200 ed i 300°C in un ambiente quasi privo di ossigeno, dalla biomassa vengono rimosse le componenti a contenuto energetico più basso. Il 30% viene quindi convertito in gas mentre la restante parte rimane sotto forma di bricchetti solidi o pellet mantenendo però circa l'85% dell'energia originaria della biomassa[9].
 - **Pirolisi:** processo che comporta un riscaldamento dei materiali organici ad una temperatura tra i 400 ed i 500°C in quasi assenza di ossigeno. Da questo processo vengono generate sostanze quali: bio-oli, carbone, metano ed idrogeno. Partendo dal bio-olio e tramite un successivo processo di idrotrattamento a temperatura e pressione elevata si possono produrre biocarburanti[2].
 - **Gassificazione:** processo anch'esso che prevede un riscaldamento delle biomasse ad una temperatura compresa tra gli 800 ed i 900°C questa volta però inserendo in modo controllato ossigeno e/o vapore acqueo con l'obiettivo di produrre "syngas" il quale potrà poi essere usato per scopi energetici.[1]

- **Conversione chimica** questa categoria comprende una serie di processi chimici che hanno lo scopo di trasformare le biomasse in una forma più facile da trasportare ed immagazzinare.

Molti di essi sono simili al processo per produrre “syngas” spiegato nel punto precedente, un’esempio è un processo chiamato “transesterificazione” nel quale una sostanza organica viene fatta reagire con dell’alcool per produrre biocarburanti.[1]

- **Conversione biologica** in questa sezione sono inseriti tutti quei processi che sfruttano microrganismi per un processo di conversione, tra questi cito: digestione anaerobica, fermentazione e compostaggio.

Lo scopo è quello di trasformare la biomassa in sostanze quali bioetanolo o biogas.

2.1.4 MAREE

Le maree sono il naturale cambiamento del livello del mare causato da una combinazione di effetti gravitazionali della luna, del sole e legati alla rotazione terrestre.

Il cambiamento di marea attraversa due stati fondamentali, quando il livello smette di diminuire raggiungendo un minimo locale ci troviamo in uno stato chiamato bassa marea, viceversa quando smette di crescere raggiunge uno stato di massimo locale parliamo di alta marea.

Sono presenti, in prima approssimazione, due componenti fondamentali le quali poi avranno anch’esse delle componenti specifiche chiamati costituenti:

Semi-diurna			
Costituente	Periodo(h)	Velocità(°/h)	Ampiezza(cm)
M2	12.421	28.984	58
S2	12	30	13.7
N2	12.658	28.439	12.3

Diurna			
Costituente	Periodo(h)	Velocità(°/h)	Ampiezza(cm)
K1	23.934	15.041	36.8
O1	25.819	13.943	23.0
P1	24.066	14.958	11.6

I dati riportati nelle tabelle soprastanti ci indicano le componenti principali riferite ad una determinata posizione geografica presa come esempio, sono state riportate solamente le principali in quanto tramite esse è possibile ottenere una buona approssimazione sull’andamento della marea².

²Dati ricavati dal sito del National Oceanic and Atmospheric Administration della città di San Francisco

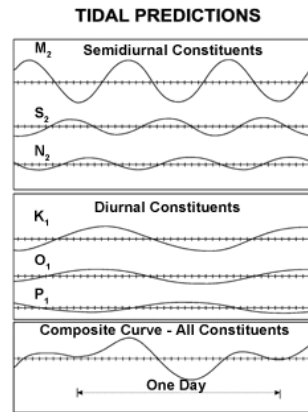


Figure 2.4: Curva ottenuta dai costituenti

Si nota come la curva ottenuta sia la somma delle componenti, essa rappresenta l'andamento della marea dato dalle componenti principali e più rilevanti.

Ci sono inoltre fattori influenzano l'andamento delle maree che non dipendono solamente dai puri dati numerici sopra indicati correlati all'orario od alla stagione in cui ci si trova ma anche dalla realtà in cui ci si trova geografica si trova.

Il livello del mare nelle coste francesi mediterranee ad esempio oscilla meno di quanto avviene sulle coste francesi che danno sull'oceano in quanto la presenza di stretti non permette all'acqua di mantenere un'andamento di discesa/salita lineare ma lo altera. Da qui la difficoltà maggiore di riuscire a creare un modello predittivo affidabile per realtà particolare quali la città di Venezia a esempio.

2.1.5 CORRENTI MARINE

Con corrente marina intendiamo una massa d'acqua in movimento rispetto a quella che la circonda e che può avere una differente densità, salinità o temperatura.

Gli effetti principali che provocano la formazione di queste correnti sono:[7]

- Effetto di Coriolis
- Differenza di temperatura
- Differenza di salinità
- Rottura del moto ondoso
- "Cabbeling"

Si parla di "Cabbeling" quando abbiamo due masse d'acqua denominate con A e B le quali andando a mescolarsi formeranno una nuova massa d'acqua che ha una densità superiore a quella di A e B

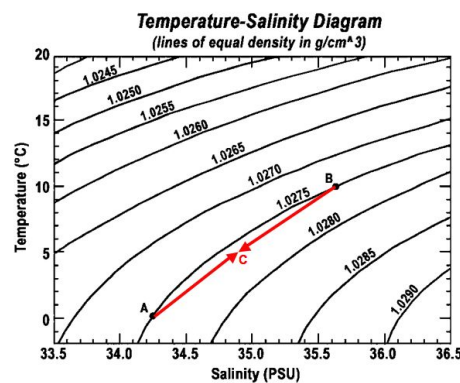


Figure 2.5: Diagramma Temperatura salinità ed effetto "Cabbeling"

La dinamica che descrive le varie correnti parte da una divisione dell'oceano in tre livelli:

- **Strato misto:** è uno stato superficiale le cui proprietà fisiche variano nel tempo e le cui correnti sono generate dagli strati inferiori
- **Oceano superiore:** sopra la linea termoclina
- **Oceano profondo:** sotto la linea termoclina

Con linea termoclina identifichiamo un livello nella quale avviene un'importante rimescolamento dell'acqua e nel quale c'è quindi una più veloce variazione di temperatura, un'esempio si può vedere nel grafico riportato sotto:

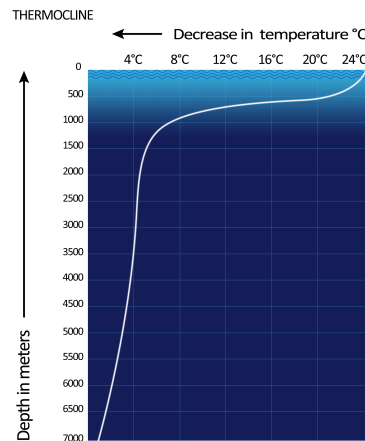


Figure 2.6: Variazione di temperatura in funzione della profondità

Tutte le correnti oceaniche di superficie sono solitamente guidate da correnti ventose, venti che sono influenzati in gran parte dall'effetto di Coriolis sopra citato.

Le correnti più profonde sono mosse da un fenomeno chiamato: "Circolazione termoalina". Esso è a sua volta correlato a fenomeni fisici legati alla variazione di densità e di temperatura, i principali agenti che provocano una variazione di temperatura o densità sono il calore proveniente da livelli superiori e la differenza di densità provocata da grandi flussi d'acqua dolce provenienti sempre da i livelli superiori.

2.1.6 PRECIPITAZIONI

Le precipitazioni sono un fenomeno atmosferico che porta il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera, una volta condensato, a cadere per l'effetto della gravità.

L'aria contiene vapore acqueo e la sua quantità varia molto da zona a zona e quindi non è comunemente inserita negli elementi che compongono l'aria.

Per esprimerne il quantitativo contenuto in atmosfera si usano diversi metodi:

- Rapporto volumetrico: $(\frac{\text{volume d'acqua}}{\text{volume d'aria}})$
- Umidità specifica: rapporto in massa tra quantità di vapore e quantità di aria $(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ aria}})$
- Mixing ratio: rapporto tra la quantità di vapore acqueo e quella d'aria secca $(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ aria secca}})$
- Umidità assoluta: densità di vapore acqueo $(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{m^3 \text{ aria}})$
- Umidità relativa: rapporto tra la pressione parziale di acqua e la pressione di saturazione dell'acqua ad una determinata temperatura $(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^s})\%$

L'incontro di masse d'aria aventi temperature diverse porterà quella a temperatura maggiore a salire generando una zona a bassa pressione, salendo la temperatura della massa calda e la pressione inizieranno a scendere fino a far incontrare al vapore condizioni che gli permette di condensare e quindi di cadere a terra generando fenomeni di rovesci.

2.2 FONTI NON RINNOVABILI

Sono considerate non fonti rinnovabili:

- Gas naturale
- Carbone
- Petrolio
- Uranio

Ad esclusione dell'uranio, per ciascuna verrà fatto un breve excursus sulla formazione, sul potere calorifero che è in grado di offrire anche in relazione al suo prezzo di mercato. Verranno riportati i prezzi presi da un noto sito governativo già citato in precedenza presi tutti nello stesso periodo e opportunamente convertiti in unità per renderli paragonabili.

Parlando di prezzi è importante precisare come i prezzi indicati siano puramente indicativi e relativi ad un determinato mercato e non tengano conto di voci di costo importanti quali: gli impianti necessari a trasportarli e la importante differenza strutturale e quindi di costo degli impianti di generazione.

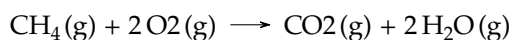
2.2.1 GAS NATURALE

Quando si parla di gas naturale si indica una miscela di più gas:

- Metano (CH_4)
- Etano (C_2H_6)
- Propano (C_3H_8)
- Butano (C_4H_{10})
- Anidride carbonica (CO_2)
- Azoto (N_2)
- Ossigeno (O_2)
- Gas nobili(tracce)

Si può subito notare come il gas naturale non contenga solo idrocarburi ma contenga anche altri gas i quali vanno considerati sia durante il bilancio energetico che durante il trattamento degli inquinanti.

In prima analisi possiamo immaginare una combustione ideale di metano:



Per il calcolo dell'energia sprigionata dalla reazione useremo la legge di Hess la quale conoscendo tramite apposite tabelle i ΔH di formazione dei vari componenti ci permette di conoscere quella dell'intera reazione.

$$\Delta H_{rz} = \Delta H_{f,CO_2}(T) + 2\Delta H_{f,H_2O}(T) - \Delta H_{f,CH_4}(T) - \Delta H_{f,O_2}(T)$$

Sostituendo i valori ottenuti sperimentalmente e poi tabulati³ otteniamo:

$$\Delta H_{rz} = -803070 \frac{Kj}{Kmol}$$

A questo punto possiamo ottenere il potere energetico di un Kg di metano:

$$\frac{\Delta H_{rz}}{PM_{CH_4}} = \frac{-803070}{16.042} = -50060 \frac{Kj}{Kg} \sim -35.83 \frac{MJ}{Nm^3}^4$$

³<https://cccbdb.nist.gov/xp1.asp?prop=1>

⁴Metro cubo normale(1atm e 0°C)

Parlando di combustibili è importante citare due caratteristiche cioè:

- Potere calorifero inferiore(LHV)
- Potere calorifero superiore(HHV)

Il primo non tiene conto del calore latente di vaporizzazione dell'acqua generata durante la combustione mentre il secondo ne tiene conto.

E' importante esprimere entrambi i valori in quando nei moderni impianti si è in grado di utilizzare anche il delta energetico tra il limite superiore ed inferiore andando quindi a sfruttare meglio le risorse ed ad aumentare i rendimenti.

Quello calcolato in precedenza avendo nella reazione l'acqua in uscita in forma gassosa corrisponde al LHV, per calcolare l'HHV bisogna tenere in considerazione la quantità di energia che va sottratta a al vapore per farlo condensare:

$$\Delta H = 2 \cdot -44010 = -88020 \frac{Kj}{Kmol} \Rightarrow \frac{-88020}{18.016} \left[\frac{\Delta H}{PM_{H_2O}} \right] = -4886 \frac{Kj}{Kg}$$

Sommando il valore ottenuto a quello precedentemente calcolato possiamo trovare l'HHV:

$$HHV = \Delta H_{rz} + \Delta H_{cond} = -803070 + (-88020) = -891090 \frac{Kj}{Kmol} \sim -55547 \frac{Kj}{Kmol} \sim -39.76 \frac{MJ}{Nm^3}$$

Tutti i segni negativi sono dovuti al fatto che la reazione presa in considerazione sia esoergonica. L'energia liberata che sarà sotto forma di energia termica potrà poi essere opportunamente trasformata o direttamente utilizzata.

Il prezzo riportato per il gas naturale in questo caso è in $\frac{\$}{millionBTU}$ ed equivale a 6,60\$ che riportandolo in unità del S.I. equivale a $0,0062 \frac{\$}{MJ}$.

2.2.2 CARBONE

Sono presenti diverse tipologie di carbone, i quali si differenziano inizialmente per fossili e non fossili.

Tra i carboni fossili troviamo:

- Torba
- Lignite
- Litantrace
- Antracite

Si differenziano per una crescente percentuale di carbonio e per la diminuzione progressiva dell'umidità contenuta.

Per andare a proporre un bilancio energetico come per il gas naturale è stato anche qui necessario fare delle semplificazioni, il tutto è iniziato con un'analisi su quale fosse il carbone fossile maggiormente utilizzato negli anni per capire quale convenisse prendere in esame:[4]

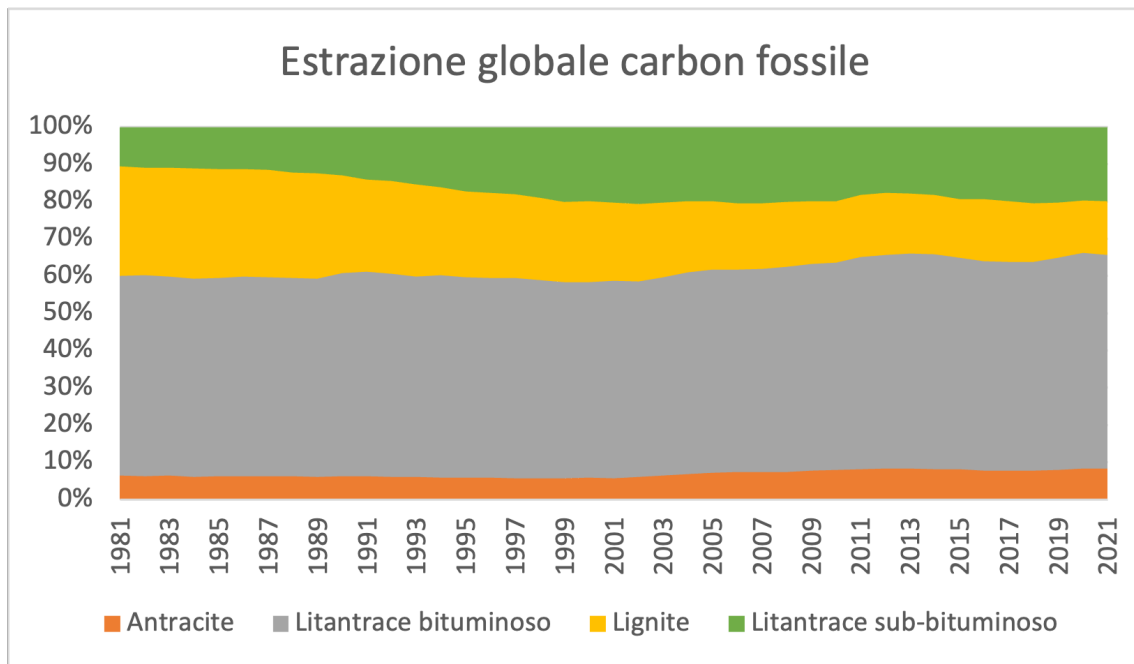


Figure 2.7: Grafico rappresentate la quantità di carbone estratta globalmente negli ultimi 40 anni

Prenderemo quindi il litantrace bituminoso il quale è il più largamente estratto e consumato, risulta che abbia la seguente composizione in peso:[8]

- Carbonio(84.4%)
- Ossigeno(6.7%)
- Idrogeno(5.4%)
- Azoto(1.7%)
- Zolfo(1.8%)

Si noti come in questo caso vi è un contenuto anche di altre sostanze oltre ad idrogeno e carbonio tra le quali si evidenzia lo zolfo la cui presenza porta a dei residui di combustione altamente impattanti a livello ambientale.

Data la formazione chimica più complessa andare a portare una grossa semplificazione come fatto in precedenza riporterebbe un dato totalmente falsato e poco significativo; per questo motivo sarà riportato il valore contenuto in alcune tabelle che si attesta attorno ai $20 \frac{KJ}{Kg}$ valore che spesso, data la formazione chimica del carbone che può variare di molto da giacimento a giacimento, viene calcolato sperimentalmente.

Il prezzo riportato in questo caso è in $\frac{\$}{shortton}$ una "short ton" equivale a 2000lb quindi a circa 907kg, tenendo conto del potere calorifero riportato in precedenza si arriva ad un valore finale di circa $0,01 \frac{\$}{MJ}$.

2.2.3 PETROLIO

Il petrolio una volta estratto deve subire diverse lavorazioni prima di poter venir usato per produrre energia, il processo che porta il petrolio ad essere frazionato è quello della distillazione. Il processo di lavorazione del petrolio si compone di diverse fasi le quali avvengono in sequenza sui diversi componenti estratti per andare a sfruttare al massimo la materia prima.

La componente che per questa sezione ci interessa è quella degli oli combustibili i quali sono oli pesanti utilizzati prevalentemente per la produzione di energia in centrali termoelettriche e per il settore navale sempre come combustibile. Anche in questo caso il problema dell'utilizzo di queste sostanze come combustibile è l'alto tenore di zolfo che contengono il quale una volta avvenuta la combustione andrà a combinarsi con l'ossigeno e l'idrogeno contenuti in atmosfera andando a generare acido solforico e acido nitrico provocando i fenomeni comunemente chiamati piogge acide.

Da un barile di petrolio⁵ si ricavano circa 45 galloni di prodotti raffinati con la suddivisione indicata nella tabella sottostante[3]:

Prodotto	Quantità[gal]	%
Finished motor gasoline	20,08	45,07%
Distillate fuel oil	12,47	27,99%
Kerosene-type jet fuel	3,53	7,92%
Petroleum coke	2,06	4,62%
Still gas	1,72	3,86%
Hydrocarbon gas liquids	1,68	3,77%
Asphalt and road oil	0,92	2,07%
Residual fuel oil	0,59	1,32%
Naptha for feedstocks	0,46	1,03%
Lubricants	0,46	1,03%
Other oils for feedstocks	0,25	0,56%
Miscellaneous products	0,21	0,47%
Special naphthas	0,08	0,18%
Finished aviation gasoline	0,04	0,09%
TOTALE	44,55	

Per ogni barile di petrolio grezzo dopo la raffinazione rimangono quindi 0,59 galloni di olio combustibile che è il prodotto che ci interessa per questa sezione. Facendo riferimento anche in

⁵42 galloni statunitensi ~159 litri

questo caso a dati tabulati troviamo che il potere calorifico dell'olio combustibile è di $41,022 \frac{MJ}{kg}$ /, dopo le opportune conversioni otteniamo un valore di $0,00017 \frac{\$}{MJ}$. Non sono neanche in questo caso stati inseriti i costi di estrazione, trasporto e successiva raffinazione.

3

Impianti

Nel capitolo precedente sono state elencate e brevemente introdotte le varie fonti energetiche che abbiamo a disposizione, sarà obbiettivo di questo capitolo elencare ed illustrare il funzionamento degli impianti utilizzabili per convertire le varie fonti energetiche in energia elettrica la quale sarà poi immessa nella rete elettrica.

3.1 IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Un'impianto fotovoltaico è un'impianto elettrico formato da più moduli fotovoltaici i quali, sfruttando l'energia solare, producono energia elettrica mediante appunto l'effetto fotovoltaico. Si all'interno di un'impianto fotovoltaico possiamo identificare alcuni elementi chiave e fondamentali quali:

- Cavi, diodi e magnetotermici
- Inverter

I primi elementi sono fondamentali per la connessione e la sicurezza dell'impianto mentre il secondo è necessario per la conversione DC-AC per poi poter immettere in rete l'energia elettrica che si produce.

Per illustrare il funzionamento di un'impianto è importante prima capire il funzionamento dell'effetto fotovoltaico.

3.1.1 EFFETTO FOTOVOLTAICO

Durante lo studio delle onde elettromagnetiche si notò come una radiazione elettromagnetica che investe un materiale possa, in certe condizioni, cedere energia agli elettroni più esterni degli atomi del materiale stesso. Se l'energia risulta sufficiente l'elettrone risulta libero di staccarsi dall'atomo di origine e di allontanarsi.

Questo fenomeno però non può essere sfruttato in tutti i materiali in quanto negli isolanti il gap tra la banda di conduzione e la banda di valenza, chiamato band gap, è troppo elevato per poter essere eguagliato dall'energia del fotone incidente, per i materiali conduttori invece vi

è una continua creazione e distruzione di coppie elettrone-lacune, l'energia necessaria per la creazione di esse viene fornita direttamente dalla variazione di temperatura.

Quando invece un fascio luminoso investe un semiconduttore si verifica il passaggio in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un uguale numero di lacune che passa in banda di valenza.

Per generare un flusso di elettroni è necessario creare un campo elettrico all'interno della cella, per tale scopo si sfrutta il drogaggio. Il drogaggio consiste nell'inserire atomi diversi dal silicio all'interno di alcune zone del semiconduttore per ottenere due zone, la prima con eccesso di lacune (zona p) la seconda con eccesso di elettroni (zona n).

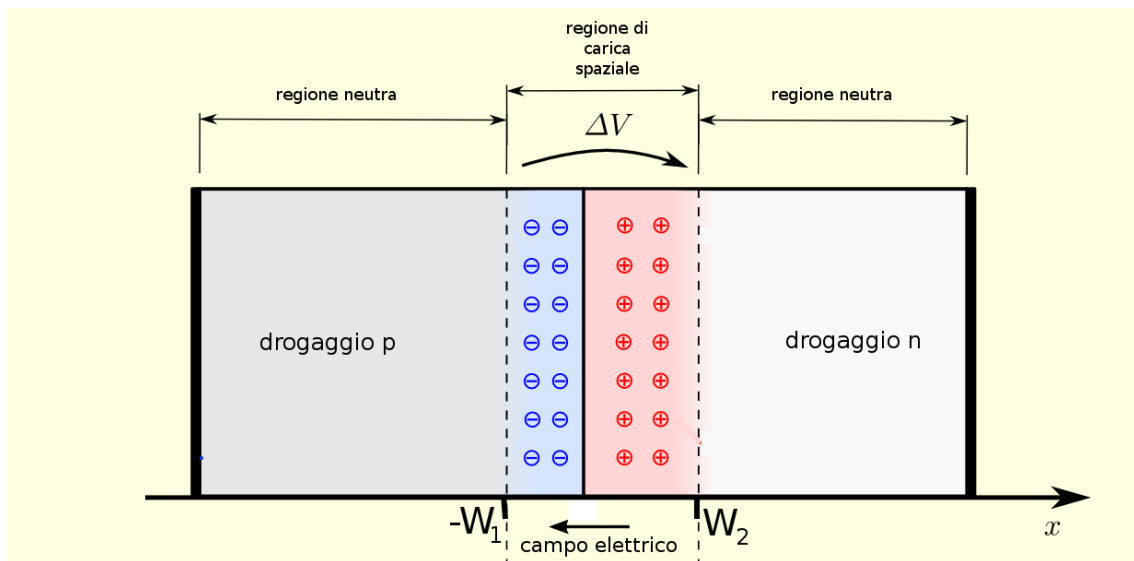


Figure 3.1: Rappresentazione di semiconduttore con drogaggio p-n

Si formano quindi due zone, la prima con una prevalenza di elettroni liberi e la seconda con lacune le quali provocano una carenza di elettroni andandosi a creare un campo elettrico che si estende a cavallo della regione di svuotamento. Grazie al fenomeno illustrato in precedenza se si illumina la giunzione dalla parte n vengono a crearsi delle copie elettrone-lacune in entrambe le zone, il campo elettrico presente a causa del drogaggio fa sì che gli elettroni in eccesso si dividano e li spinge in direzioni opposte, una volta oltrepassata la regione di svuotamento non possono quindi più tornare indietro a causa della presenza del campo elettrico.

Procedendo quindi con una connessione esterna si otterrà un circuito chiuso nel quale il flusso di elettroni parte dallo strato n, a potenziale maggiore, per dirigersi nello strato p, a potenziale minore fin tanto che la cella rimane esposta ai raggi solari.

3.1.2 CELLA SOLARE

Una cella solare è un dispositivo elettrico a stato solido il quale tramite l'effetto fotovoltaico permette di convertire l'energia trasportata dalla luce solare in elettricità tramite l'effetto illustrato nella sezione precedente.

La maggior parte delle celle fotovoltaiche prodotte, se esposte al sole, producono una tensione di circa 0.6V, è quindi necessario metterle in serie per ottenere tensioni più alte. Collegando le celle in serie però non si ha il controllo sulle singole celle in quanto la stessa corrente attraversa

tutte le celle, quelle poste in ombra quindi finiscono per fare da strozzatura per tutto il sistema andando a scaldarsi e potenzialmente a danneggiarsi.

E' quindi visibile l'importanza di posizionare correttamente i pannelli fotovoltaici in modo che vi siano me zone d'ombra e per meno periodi possibili.

3.1.3 PANNELLO FOTOVOLTAICO

Struttura

Un pannello fotovoltaico è formato da un'insieme di celle opportunamente collegate tramite una griglia metallica che è presente sulla superficie del modulo in modo da formare sia collegamenti in serie che in parallelo. Una volta collegate le celle si procede con l'assemblaggio del modulo ponendo sopra la superficie posteriore, realizzata con un materiale isolante con scarsa dilatazione termica, uno strato di acetato di vinile(EVA), si pone quindi lo strato di celle solare opportunamente collegate per poi porre un'ulteriore strato di EVA ed il vetro temperato a protezione dell'intero modulo.

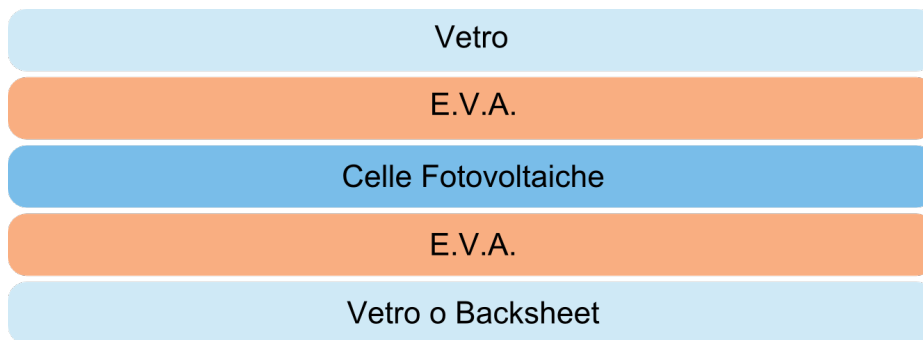


Figure 3.2: Schema di composizione di un modulo fotovoltaico

Una volta assemblato si procede con un processo di pressofusione atto a trasformare l'EVA in un collante inerte, si collega la griglia ad una morsettiere che viene posta sul retro e si chiude il modulo in un frame di alluminio che faciliterà l'installazione e l'orientamento.

Tecnologie realizzative

Dei molti semiconduttori utilizzabili per la produzione dei moduli fotovoltaici il più comunemente usato è il silicio, esso si ottiene in wafer che successivamente vengono uniti tra loro a formare un modulo.

Esistono diverse tipologie costruttive delle celle, tra le più comuni troviamo:

- **Silicio monocristallino:** ogni cella è realizzata a partire da un wafer formato da un monocristallo opportunamente drogato. Sono tendenzialmente costose perchè risulta difficile formare ampie superfici senza sprecare materiale o spazio però permettono di raggiungere un'efficienza dell'ordine del 18-21%.
- **Silicio policristallino:** in questo caso la cella è formata da un policristallo, quindi non strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati. Il costo in questo caso data la peggior qualità del silicio usato risulta più basso a favore di una maggior facilità di taglio e lavorazione. L'efficienza raggiungibile con questa tipologia di silicio però è più bassa del caso precedente e si attesta nell'ordine del 15-17%.

- **Silicio amorfo:** questa tipologia di celle hanno un'efficienza più bassa ($\sim 8\%$) ma risultano molto più economici da produrre rispetto ad i precedenti. Il silicio amorfo ha un bandgap più ampio dei precedenti (circa un 55% in più) il che favorisce l'assorbimento della parte visibile dello spettro solare ma risulta meno efficiente nell'elaborare la parte infrarossa.

Prestazioni ed efficienza

Le prestazioni offerte dal singolo modulo dipendono da diversi fattori, in prima approssimazione si può calcolare la potenza che un pannello è in grado di esprimere con la seguente formula:

$$P = \eta I_0 S \sin(\alpha)$$

Dove con I_0 considero l'irradianza perpendicolare alla superficie, con S la superficie del modulo, mentre α è l'angolo che il modulo ha con il sole, η invece è un fattore di rendimento.

In conclusione possiamo osservare come i parametri fisici che influenzano la produzione di un pannello solare possano essere sintetizzati in:

- Irraggiamento a cui il pannello è esposto
- Angolo con la quale in modulo è orientato
- Qualità produttiva del modulo
- Tipologia di silicio usato

Si nota anche qui l'importanza di collocare il pannello in una regione che abbiamo una buona copertura da parte del sole ed in una superficie correttamente orientata.

Nel caso di installazioni su tetti questi due parametri rendono o meno un determinato tetto idoneo all'installazione, nel caso si installino in campi fotovoltaici invece l'angolo di installazione viene scelto in fase costruttiva quindi ideale per il luogo in cui è collocato.

Come visto in precedenza l'angolo con cui la luce solare colpisce la terra dipende sia dal luogo geografico che dal periodo dell'anno preso in esame, vi sarà quindi un'efficienza diversa da periodo data dall'inclinazione del modulo oltre che dalle condizioni climatiche.

Il singolo modulo in condizioni normali lavora in un range di tensione a vuoto (V_{OC}) tra 40 ed i 50 Volt ed una corrente di cortocircuito (I_{sc}) tra i 9 ed i 12 Ampere.

Un'altro fattore importante che influenza negativamente il rendimento di un pannello fotovoltaico è la temperatura, infatti la temperatura della giunzione p-n va ad influenzare sia (V_{OC}) che (I_{sc}) andando quindi ad alterare anche la potenza massima (P_{Max}) che il modulo è in grado di offrire.

Per quantificare l'impatto della temperatura sul pannello ogni produttore fornisce tre valori tre espressi in $\frac{\%}{^\circ C}$:

1. Coefficiente di temperatura di (P_{Max})
2. Coefficiente di temperatura di (V_{OC})
3. Coefficiente di temperatura di (I_{sc})

Dati sperimentali

Prendendo un modulo come esempio possiamo vedere

Bibliografia

- [1] U.S. Energy Information Administration. "Biomass and the environment". In: 2022.
- [2] U.S. Energy Information Administration. "Biomass explained". In: 2021.
- [3] U.S. Energy Information Administration. "Petroleum Supply Annual". In: 2022.
- [4] EIA. *International energy statistics*. 2021. URL: <https://www.eia.gov/international/data/world>.
- [5] Stefano Savino Gianni Comini. "La captazione dell'energia solare". In: 2013.
- [6] IRENIA. "Global bioenergy supply and demand projections – a working paper for REmap 2030." In: 2014, p. 5.
- [7] National Oceanic and Atmospheric Administration. "What is a current?" In: 2021.
- [8] William Reid. "Chemical Engineers' Handbook". In: 1973. Chap. 9.
- [9] Michael Wild. "Torrefied biomass: The perfect CO₂ neutral coal substitute is maturing". In: 2015, p. 72.

Ringraziamenti