

A.P.A.T.

Agenzia Per l'Ambiente e i servizi Tecnici

Dipartimento Rischio Tecnologico

Settore Innovazione

**Produzione di Idrogeno da Energia Eolica
ed Analisi delle Potenzialità di alcuni siti
italiani**

Ing. Ferzetti Fabrizio

Tutor: Ing. Giovanni Pino
Roma, Febbraio 2004

Abstract

Nel presente studio, sono stati reperiti ed analizzati i dati storici anemologici del territorio italiano allo scopo di individuare siti potenzialmente validi per l'installazione di aerogeneratori atti a produrre energia elettrica ed idrogeno per mezzo di un elettrolizzatore. Dall'analisi effettuata sui dati storici, secondo le modalità descritte di seguito, sono emersi in particolare cinque siti dotati di una valida presenza della risorsa eolica. Per ogni sito è stata redatta una tabella (vedi allegati) con la quantificazione della potenziale produzione di energia elettrica (kWh/anno) e del vettore energetico idrogeno (Nm^3/anno). L'utilizzo combinato tra aerogeneratore ed elettrolizzatore, oggetto di questa tesi, consentirebbe lo sfruttamento dell'energia elettrica ricavata dall'aerogeneratore e contemporaneamente la produzione di idrogeno, quest'ultimo utile anche a compensare la discontinuità della risorsa eolica. Una soluzione di tal tipo, data la sua completa autonomia, permetterebbe di rendere energeticamente autosufficienti anche aree remote non ancora raggiunte o difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica. Nei siti particolarmente produttivi, sarebbe possibile oltre l'utilizzo diretto dell'energia prodotta, secondo i propri fabbisogni, anche l'accumulo sotto forma di idrogeno, permettendo tra l'altro l'esportazione verso altri utilizzi tipo trasporto urbano con un ritorno economico utile ad ammortizzare le spese di impianto.

Abstract

In the present study, there was analyzed the wind historical data of the Italian territory in order to characterize the potentially of wind turbine generators suitable to produce hydrogen vector by electrolysis. From the analysis carried out on the historical data, are emerged in particular five sites for a valid presence of the wind resource. For every sites it was written up a table with the quantification of electric power production (kWh/year) and of energetic carrier hydrogen (Nm³/year). The use of a wind turbine generator and an electrolyzer, as in object of this analysis, would concur to offer a exploitation of electric power and at the same time of hydrogen's production, in particular the last one it's also useful to compensate the discontinuity of the wind resource. This sort of solution, it would concur to render autonomy the remote areas not still caught up from the electric grid. In the sites particularly productive it would be possible the direct use of electric power and the export of the hydrogen accumulated to other areas utilizing it e.g. for urban transport.

Prefazione

Nel corso dello studio, sono stati raccolti e rielaborati i dati anemologici italiani (intesi come statistiche della velocità del vento) in modo da poter individuare alcuni siti, secondo la metodologia riportata nel testo, ove sarebbe possibile non solo lo sfruttamento della risorsa eolica per la generazione di energia elettrica, ma anche per convertire la stessa in un vettore energetico polifunzionale quale l'idrogeno. Le caratteristiche di tale vettore, congiunte alle tecnologie energetiche sempre più efficienti, permetterebbero una forte riduzione dell'impatto sull'ambiente che ad oggi è destinato a creare ancora danni irreversibili se gli attuali trend di consumo di risorse non rinnovabili non verranno rivisti.

In questa tesi, è stata approntata una valutazione delle potenzialità offerte dall'uso combinato di un aerogeneratore (risorsa eolica) e di un elettrolizzatore (produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua).

Sono stati dapprima individuati dei siti italiani (5) ove la risorsa eolica ha una presenza più o meno costante nell'arco dell'anno tale da garantire livelli di produzione energetica la più alta possibile. Ad esempio il sito dell'Asinara (tabella in allegati), risultato il più promettente, sarebbe in grado di generare 8.000 kWh/anno di energia elettrica che opportunamente convertita in idrogeno per mezzo dell'elettrolisi, consentirebbe la produzione di 1.600 Nm³/anno del vettore energetico.

Per avere un'idea delle quantità di energia in gioco, si può considerare che un'autovettura ad idrogeno con fuel cell, secondo le attuali tecnologie, è in grado di percorrere 90 km con un chilogrammo di idrogeno. Ogni aerogeneratore installato nel sito in questione, sarebbe in grado di produrre

ogni anno tramite elettrolizzatore, una quantità di idrogeno sufficiente a far percorrere con tale proporzione 4.464.000 km.

Ipotizzando un chilometraggio annuo di ogni autovettura pari a 10.000 km/anno, ogni aerogeneratore installato potrebbe alimentare ben 446 autovetture (mod. Honda FCX-V4). Un campo eolico costituito da 5/6 aerogeneratori, sarebbe così più che sufficiente ad alimentare ad esempio tutte le autovetture circolanti nel centro storico di una delle principali città italiane. La produzione di idrogeno potrebbe altrimenti essere destinata con maggiore efficienza al trasporto pubblico per il quale, la ricerca ha tra l'altro già portato alla realizzazione di interessanti mezzi di trasporto collettivi (autobus).

Indice

I. Introduzione

II. L'energia eolica

L'energia eolica

Introduzione

Vento come energia

Gli aerogeneratori

Prestazioni

Valutazione del potenziale eolico

Impatto ambientale

Metodologia di studio

III. L'idrogeno

Caratteristiche e tecnologie di produzione

Introduzione

Idrogeno come fonte di energia

Vantaggi dell'idrogeno

Elettrolisi dell'acqua

Altri sistemi di produzione dell'idrogeno

Tecnologie di immagazzinamento e trasporto

Introduzione

Principali metodi di accumulo

Metodologia di studio

Energia con meno inquinamento

Idrogeno come carburante

IV. Conclusioni

Bibliografia

Allegati

Tabelle

Asinara

Cagliari - Elmas

Isola d'Elba

P.ta Raisi

Monte Argentario

Tabelle Riassuntive Produzione

I. Introduzione

Il ricorso intensivo alle fonti energetiche convenzionali, petrolio, gas, carbone ha determinato negli ultimi decenni un'aggressione all'ecosistema che sta provocando un drastico decadimento delle condizioni ambientali e un impoverimento delle risorse naturali del pianeta. Si definiscono fonti "rinnovabili" di energia tutte le fonti che, a differenza dei combustibili fossili e nucleari destinati ad esaurirsi in un tempo definito, possono essere considerate inesauribili.

Tipiche fonti di energia rinnovabile sono l'energia solare, l'energia idraulica, del vento, delle biomasse, delle onde e delle correnti, ma anche l'energia geotermica, l'energia dissipata sulle coste dalle maree e i rifiuti industriali e urbani.

Le tecnologie sviluppate per tali risorse, permettono la conversione di queste risorse in energia termica, elettrica, meccanica o chimica.

Le caratteristiche fondamentali delle fonti rinnovabili di energia che le rendono appetibili per un futuro energetico alternativo sono: la capacità di rinnovarsi e di rendersi disponibili in tempi estremamente brevi, la disponibilità continua nel caso dell'uso dell'energia solare o eolica, ad alcuni anni nel caso delle biomasse; l'inquinamento dovuto al loro utilizzo del tutto trascurabile a differenza dei combustibili fossili per i quali è noto un notevole impatto sull'ambiente.

Attualmente le risorse rinnovabili contribuiscono in misura limitata alla produzione di energia, anche se il loro peso è in continuo aumento grazie non solo al continuo sviluppo tecnologico, ma soprattutto perché molti Stati hanno attribuito a tali fonti un ruolo sempre più strategico nelle scelte di politica energetica, sia nel tentativo di ridurre la dipendenza economica e

politica dai paesi fornitori di combustibili fossili, sia per far fronte alla loro esauribilità e alle diverse emergenze ambientali.

Un ulteriore incentivo all'impiego delle fonti rinnovabili viene dalle ricadute occupazionali, soprattutto a livello locale, legate alla produzione di energia con fonti disponibili sul territorio nazionale.

La nostra attenzione è rivolta ad una fonte rinnovabile molto attuale: l'energia eolica. Questa presenta difatti delle potenzialità di crescita notevoli soprattutto dal punto di vista della resa energetica e dei costi di installazione che vanno via via scendendo con l'evoluzione delle tecnologie.

Nel corso di tale studio è stato inoltre trattato del vettore energetico idrogeno, anche esso molto discusso che per le sue caratteristiche altamente "ecologiche" riscuote un crescente interesse come "carburante" per i veicoli del *domani*. Per quest'ultimo si è ipotizzata la produzione sfruttando un elettrolizzatore alimentato da un aerogeneratore eolico. In tal modo sarebbe possibile produrre ed immagazzinare un vettore energetico totalmente "pulito" sia nella fase produttiva che di utilizzo.

Nell'ultima parte del presente elaborato, verranno ipotizzate la produzione di energia elettrica da aerogeneratore e di idrogeno con elettrolizzatore in cinque siti italiani risultati più produttivi da un indagine sulle statistiche anemologiche.

II. L'energia eolica

1. L'energia eolica

Introduzione

In questi ultimi anni, si è assistito ad una forte crescita della diffusione di impianti eolici in tutta l'Europa; secondo l'European Renewable Energies Federation (EREF) Energy Agency, la potenza eolica degli impianti connessi alla rete è passata dagli inizi degli anni 80, praticamente nulla, ad oltre 13.500 MW a fine 1999.

Un risultato importante raggiunto in 15 anni dove l'Europa riveste un ruolo importante con una crescita esponenziale di MW disponibili.

I Paesi europei maggiormente impegnati in questa crescita sono la Germania con 4.443 MW, la Danimarca con 1.761 MW e Spagna 1.225 MW seguite da Olanda e Gran Bretagna.

Vento come energia

Quando si parla di energia eolica ci si riferisce all'energia cinetica associata alle masse d'aria che si spostano al suolo da aree ad alta pressione atmosferica verso aree adiacenti di bassa pressione. L'intensità e la direzione del vento dipendono da un gran numero di fattori sia su scala locale che planetaria.

Tra queste ricordiamo i principali:

- l'irraggiamento solare (maggiore nelle zone prossime all'equatore rispetto a quelle prossime ai poli).

- conformazione della superficie terrestre (caratterizzata dall'alternarsi di oceani, terre, deserti, ghiacciai, che costituiscono zone con diverse capacità di assorbimento e scambio di calore solare).
- dal movimento di rotazione della terra (l'alternanza del giorno con la notte causa una interruzione dell'irraggiamento solare).

Altri fattori di carattere più locale sono:

- l'attrito (contrasta la corrente d'aria ed è causa di dissipazione di energia e dipende sostanzialmente della "rugosità" della superficie attraversata).
- l'orografia (intesa come configurazione irregolare della superficie terrestre, dovuta alla presenza di rilievi collinari e montagnosi, è causa di variazioni della traiettoria del vento).

E' importante anticipare che questi fattori determinano condizioni di "strato limite"¹ e di dissipazione molto diverse da luogo a luogo e fanno sì che, in un paese come l'Italia, la quantità di energia disponibile entro i primi cento metri a partire dalla superficie terrestre sia molto inferiore a quella riscontrabile nei paesi europei che si affacciano sull'oceano o si trovano molto più a nord.

L'energia eolica presenta le seguenti peculiarità:

- è molto diffusa;
- non è inquinante;
- è facilmente disponibile sotto forma meccanica e quindi facilmente trasformabile in energia elettrica.

Tuttavia la possibilità di utilizzare l'energia del vento in modo economico è fortemente limitata dai seguenti fattori:

¹ Altezza dal suolo a partire dalla quale la velocità del vento è praticamente costante.

- bassa concentrazione energetica;
- irregolarità e incostanz

Queste caratteristiche negative fanno sì che gli impianti eolici debbano avere relativamente grandi dimensioni in rapporto alla loro potenza e debbano presentare adeguata resistenza meccanica per sopportare le elevate sollecitazioni indotte da venti eccezionali di notevole intensità.

Gli aerogeneratori

Le attuali tecnologie rendono disponibili sul mercato aerogeneratori dalle diverse forme e dimensioni. Questi possono, infatti, avere una, due o tre pale di varie lunghezze e presentare l'asse di rotazione parallelo (generatore ad asse orizzontale) o verticale (generatore ad asse verticale) al suolo.

Il tipo più diffuso è l'aerogeneratore ad asse orizzontale di taglia media, alto oltre 50 metri, con due o tre pale lunghe circa 20 metri.

Questo tipo di aerogeneratore è in grado di erogare una potenza di 500-600 kW in grado cioè di coprire il fabbisogno elettrico giornaliero di circa 500 famiglie.

Si illustra di seguito la struttura generale di un aerogeneratore ad asse orizzontale fig. n. 2.

Il rotore (2) è costituito da un mozzo su cui sono fissate le pale (1) che possono ruotare ad una velocità superiore ai 200 Km/h. Le pale più utilizzate sono realizzate in fibra di vetro. I rotorì a due pale sono meno costosi e girano a velocità più elevate. Sono però più rumorosi e vibrano di più di quelli a tre pale. Tra i due la resa energetica è quasi equivalente. Sono stati realizzati anche rotorì con una sola pala, equilibrata da un contrappeso. A parità di condizioni, questi rotorì sono ancor più veloci dei

bipala, ma hanno rese energetiche leggermente inferiori. Ci sono anche rotorì con numerose pale, di solito 24, che vengono impiegati per l'azionamento diretto di macchine, come le pompe.

Sono stati messi a punto dei rotorì con pale "mobili".

Variando l'inclinazione delle pale al variare della velocità del vento tramite il sistema di imbardata (6) è possibile mantenere costante la quantità di elettricità prodotta dall'aerogeneratore.

Il sistema frenante (3) è costituito da due sistemi indipendenti di arresto delle pale: un sistema di frenaggio aerodinamico e uno meccanico. Il primo viene utilizzato per controllare la potenza dell'aerogeneratore, come freno di emergenza in caso di sopravvelocità del vento e per arrestare il rotore. Il secondo viene utilizzato per completare l'arresto del rotore e come freno di stazionamento.

La torre (7) sostiene la navicella (6) e il rotore (2), può essere a forma tubolare o a traliccio. In genere è costruita in legno, in cemento armato, in acciaio o con fibre sintetiche. La struttura dell'aerogeneratore per poter resistere alle oscillazioni ed alle vibrazioni causate dalla pressione del vento deve essere ancorata al terreno mediante fondamenta (8).

Le fondamenta molto spesso sono completamente interrate e costruite con cemento armato.

Il moltiplicatore di giri (4) serve per trasformare la rotazione lenta delle pale in una rotazione più veloce in grado di far funzionare il generatore di elettricità (5). Il generatore trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. La potenza del generatore viene indicata in chilowatt (kW).

Il funzionamento di un aerogeneratore è gestito da un sistema di controllo (9) che svolge due diverse funzioni. Gestisce, automaticamente e non, l'aerogeneratore nelle diverse operazioni di lavoro e aziona il dispositivo di

sicurezza che blocca il funzionamento dell'aerogeneratore in caso di malfunzionamento e di sovraccarico dovuto ad eccessiva velocità del vento.

La navicella (6) è una cabina in cui sono ubicati tutti i componenti di un aerogeneratore, ad eccezione, naturalmente, del rotore e del mozzo. La navicella è posizionata sulla cima della torre (7) e può girare di 180° sul proprio asse. Per assicurare sempre il massimo rendimento dell'aerogeneratore è importante mantenere un allineamento più continuo possibile tra l'asse del rotore e la direzione del vento.

Negli aerogeneratori di media e grossa taglia, l'allineamento è garantito da un servomeccanismo, detto sistema di imbardata (6), mentre nei piccoli aerogeneratori è sufficiente l'impiego di una pinna direzionale.

Nel sistema di imbardata un sensore, la banderuola, indica lo scostamento dell'asse della direzione del vento e aziona un motore che riallinea la navicella.

Prestazioni

L'energia istantanea (potenza) che viene ceduta dal vento e resa disponibile effettivamente all'asse dell'aerogeneratore è espressa dalla relazione:

$$[2] \quad P_{\text{aerog.}} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_m^3 C_p \quad [\text{W}]$$

ove ρ è la densità dell'aria, πr^2 l'area spazzata dal rotore, v_m la velocità del vento al mozzo e C_p il fattore di resa che tiene conto dei limiti teorici (imposti dalle leggi della fluidodinamica) e dei limiti costruttivi (legati alle reali soluzioni utilizzate dal rotore). Un valore medio ben approssimato per C_p , da usarsi ai fini della programmazione energetica, è quello di 0,6.

Poiché tale potenza cresce con il cubo della velocità del vento, e non è economico dimensionare i sistemi meccanici e quelli elettrici di un aerogeneratore per sfruttare anche gli alti livelli di potenza associati a condizioni di vento intenso ma poco frequente, occorre "regolare" la potenza oltre il valore limite di targa (detto anche nominale) della macchina.

Infatti, per un aerogeneratore ben progettato, l'andamento della potenza in funzione della velocità minima di inserimento (cut in) cresce fino a quella (nominale) che fornisce appunto la massima potenza consentita, e si mantiene praticamente costante fino alla velocità del vento di fuori servizio (cut off).

Nell'intervallo compreso fra le due velocità nominale e di "cut off", occorre quindi eliminare la potenza in eccesso mediante opportuni sistemi di regolazione.

La regolazione di potenza viene effettuata, principalmente, secondo due modalità opzionali che comportano soluzioni costruttive diverse:

a) la regolazione tramite "stallo", che consente l'impiego di rotor con pale fisse, è la soluzione tecnicamente più semplice. In questo caso quando il vento cresce di intensità (ed il rotore accelera) aumenta anche l'angolo del vento risultante sulle pale, determinando in tal modo un progressivo aumento della resistenza aerodinamica ed una conseguente diminuzione della "portanza" fino a provocare il distacco della vena fluida della superficie delle pale (fenomeno dello stallo) che comporta una rapida diminuzione della componente utile al movimento del rotore.

I vantaggi di questo sistema di regolazione sono la semplicità costruttiva e quindi la sua economicità.

Gli svantaggi sono rappresentati dalla minore efficienza nel catturare l'energia, dai maggiori carichi sulle pale in posizione di arresto e dalla necessità di dover impiegare un motore di lancio per l'avviamento.

b) la regolazione tramite "variazione del passo" consiste nel variare l'angolo di calettamento della pala, variando nel contempo l'angolo del vento risultante sulla pala, nell'intervallo tra velocità nominale e di "cut off", in modo da mantenere la potenza dell'aerogeneratore praticamente costante e prossima al valore nominale di progetto.

Questo tipo di regolazione consente una migliore efficienza nel catturare l'energia, riduce i carichi sulle pale a rotore fermo (pale in bandiera) e non necessita di un motore di lancio per l'avviamento. Lo svantaggio è costituito dai maggiori costi per la realizzazione dei meccanismi di attuazione del passo delle pale.

Oltre a questi due sistemi ampiamente utilizzati nei modelli commerciali è opportuno menzionare anche una soluzione innovativa basata sulla regolazione di potenza mediante movimento di imbardata.

In questo caso tale movimento permette di variare opportunamente il disallineamento dell'asse del rotore rispetto alla direzione del vento così da

ridurre la componente della velocità del vento normale al piano del rotore e consentire anche ad un aerogeneratore con pale a passo fisso un andamento della curva di potenza del tutto simile a quella di una macchina con pale a passo variabile.

Le prestazioni di un aerogeneratore sono generalmente sintetizzate mediante la "curva di potenza" (fig. n. 1) che rappresenta l'andamento della potenza resa (in ordinata) in funzione della velocità del vento (in ascissa).

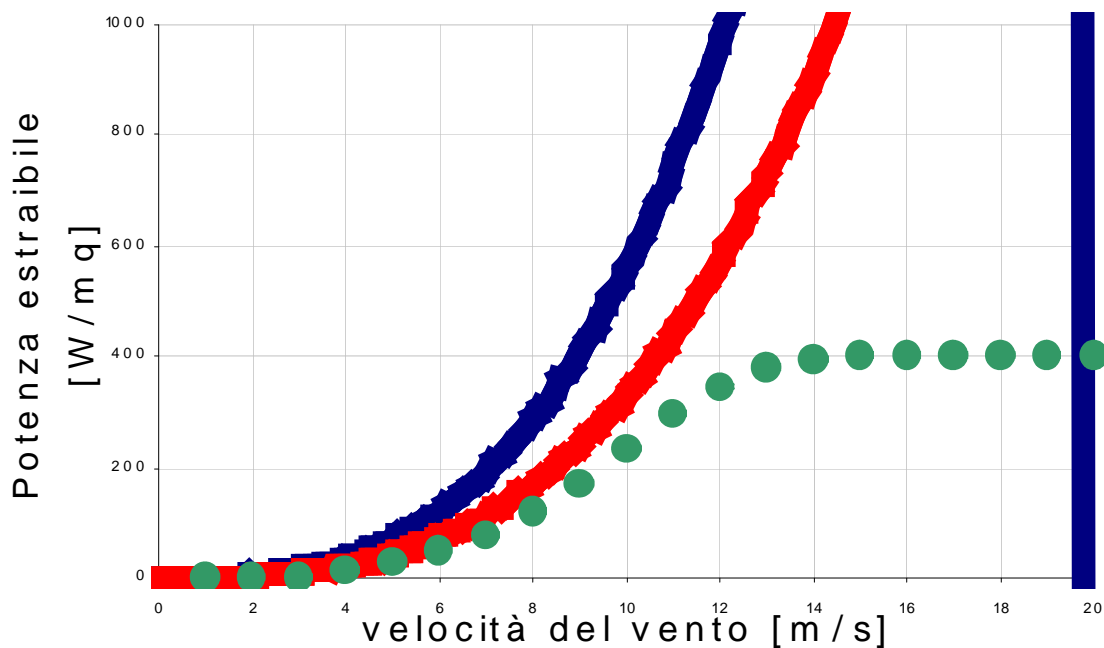


Fig. n. 1 - Potenza estraibile.

Ormai tutti i maggiori costruttori di aerogeneratori dispongono, per ogni modello commerciale, di curve "sperimentate" che forniscono gli elementi base mediante i quali, con opportuni procedimenti di calcolo e con la conoscenza dei dati anemologici del sito di riferimento, è possibile calcolare la resa energetica annua dell'aerogeneratore di interesse.

I parametri che caratterizzano la curva di potenza e quindi le prestazioni di un aerogeneratore sono numerosi e costituiscono materia per specialisti.

Di seguito vengono elencati i principali parametri di un aerogeneratore che spesso ricorrono nei cataloghi commerciali o che comunque si prestano ad una preliminare valutazione di merito e di confronto tra diversi prodotti.

Tipo di aerogeneratore: Ad asse orizzontale sopravento o sottovento.

Rotore: Numero e tipo di pala, a passo fisso o variabile, con velocità fissa o variabile, diametro, peso.

Mozzo: Rigido o di tipo oscillante.

Regolatore di potenza: Microprocessore, con adattamento automatico del carico o con attuatore idraulico del passo.

Moltiplicatore di giri: Tipo, numero di stadi, rapporto di trasmissione complessivo.

Generatore elettrico: Asincrono/sincrono, numero di fasi, tensione, potenza, frequenza.

Torre di sostegno: Tubolare/tralicciata, materiale, altezza, peso.

Altezza mozzo: Necessaria per determinare la velocità del vento utile a produrre energia e di riferimento per la curva di potenza.

Velocità di cut in, cut off, nominale, di massima resistenza: Parametri caratteristici della curva di potenza e di progetto dell'aerogeneratore.

Potenza: Nominale di progetto

Peso totale: Include pale, gondola, torre di sostegno.

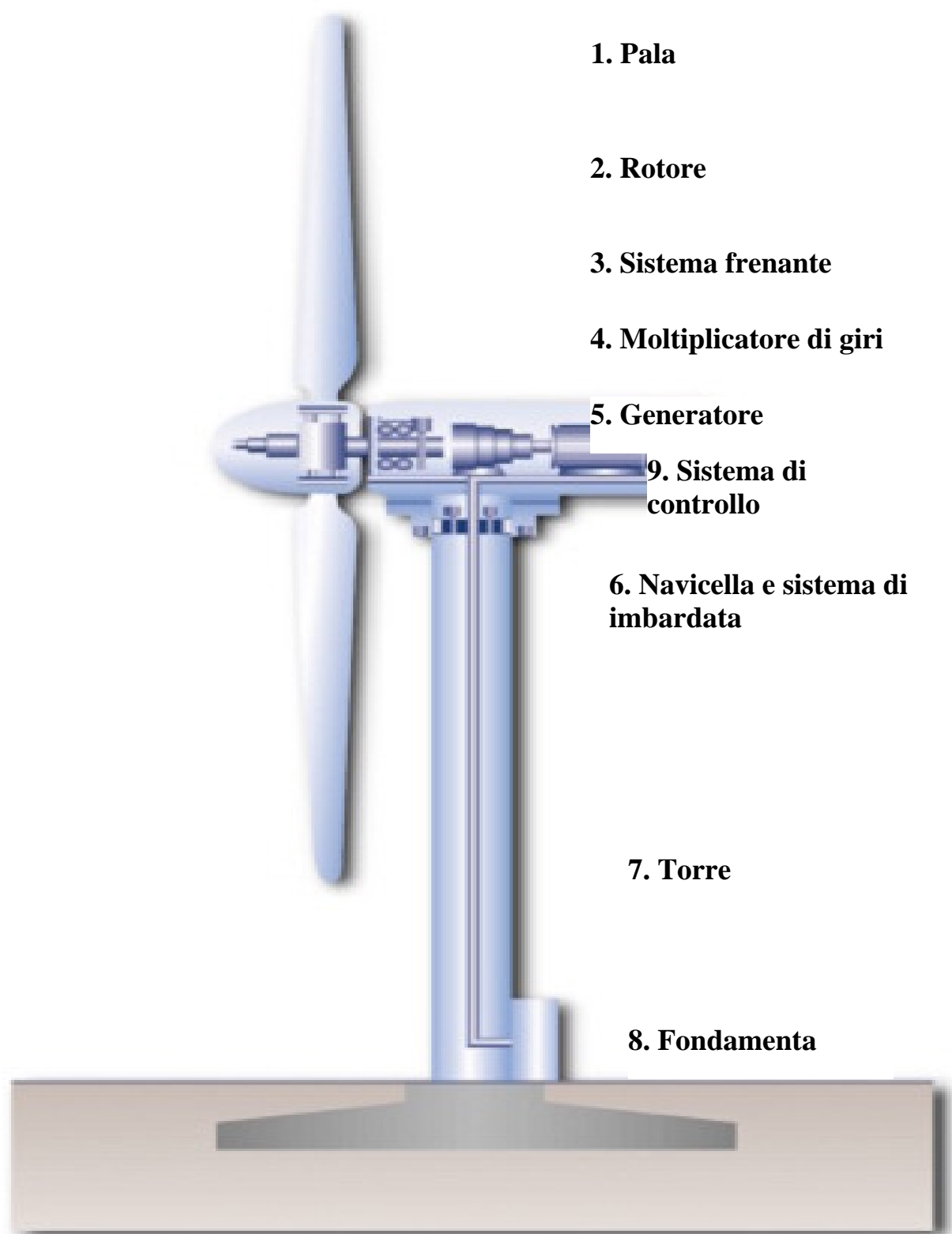
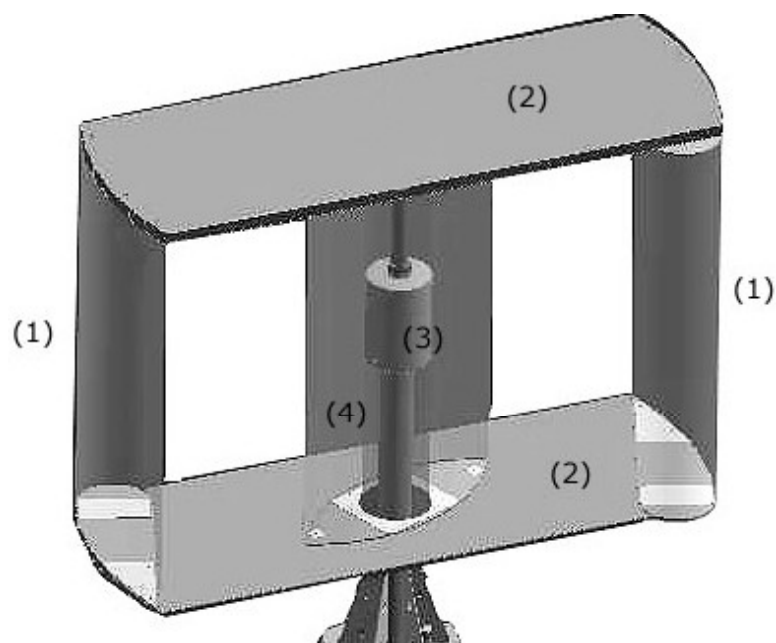


fig. n. 2

fig. n. 3 - Generatore eolico ad asse verticale.



L'impianto è costituito da:

2 x ali (1)

2 x console (2)

1 x tubo interno e generatore (3)

2 x rivestimento per il nucleo (4)

1 x Controller.

1 x Gruppo batteria

1 x GSM-Modem

Valutazione del potenziale eolico

La valutazione dell'energia eolica potenzialmente sfruttabile in una Regione è operazione difficile e complessa. La produzione di energia elettrica da impianti eolici è, infatti, fortemente influenzata dalle caratteristiche anemologiche (e quindi orografiche) locali. Inoltre, per stime tecnico-economiche di una certa affidabilità, è necessario disporre di dati anemologici rilevati per lunghi periodi (di norma non inferiori ad un anno) e con sistemi tali da consentire registrazioni sistematiche e quindi adeguate ed affidabili valutazioni statistiche del sito di interesse.

I principali dati di interesse sono:

- la distribuzione di frequenza della velocità del vento;
- la distribuzione di frequenza della direzione del vento (rosa dei venti).

Queste distribuzioni permettono di studiare i principali aspetti operativi degli aerogeneratori di assegnate caratteristiche, valutandone il tempo ed il modo di funzionamento.

La conformazione di un terreno influenza le caratteristiche (velocità e direzione) del vento. Infatti, essi dipendono, oltre che dai parametri atmosferici, anche dalla conformazione del terreno.

In generale più un terreno è rugoso, cioè presenta variazioni brusche di pendenza, boschi, edifici e montagne, più il vento incontrerà ostacoli che ridurranno la sua velocità e/o varieranno la direzione locale.

Per definire la conformazione di un terreno sono state individuate quattro classi di rugosità (tab. n. 1).

Le classi di rugosità
Classe di rugosità 0: suolo piatto come il mare, la spiaggia e le distese nevose.
Classe di rugosità 1: suolo aperto come terreni non coltivati con vegetazione bassa e aeroporti.
Classe di rugosità 2: aree agricole con rari edifici e pochi alberi.
Classe di rugosità 3: suolo rugoso in cui vi sono molte variazioni di pendenza del terreno, boschi e paesi.

tab. n. 1 – Le classi di rugosità.

In generale la posizione ideale di un aerogeneratore è in un terreno appartenente ad una bassa classe di rugosità e che presenta una pendenza compresa tra i 6 e i 16 gradi.

Il vento deve superare la velocità di almeno 5,5 metri al secondo e deve soffiare in modo costante per gran parte dell'anno. Mentre i migliori siti eolici offshore (installazione in mare aperto) sono quelli con venti che superano la velocità di 7-8 metri al secondo, che hanno bassi fondali (da 5 a 40 metri) e che sono situati ad oltre 3 chilometri dalla costa.

Impatto ambientale

I principali aspetti ambientali che incidono sulla accettabilità degli impianti eolici (aerogeneratori) sono rappresentati *dall'ingombro territoriale, dall'impatto visivo, dall'inquinamento acustico e dall'interferenza elettromagnetica* (generalmente molto circoscritta).

- *Ingombro territoriale* - La superficie interessata nel caso di una centrale eolica costituita da impianti multipli ("wind farms") è piuttosto ampia in

quanto, come si è detto, occorre distanziare gli aerogeneratori in maniera opportuna per ridurre al minimo le reciproche interferenze. Si può stimare che una centrale eolica interessi un'estensione di terreno di circa 15 - 20 ettari/MW. E' opportuno, però, sottolineare che solo l'1% di tale territorio risulta fisicamente occupato dagli impianti e dalle strade, mentre la rimanente può mantenere la destinazione originaria, essere utilizzata per il pascolo o per altre attività agricole.

- *Impatto visivo* - Si possono identificare alcuni dei principali fattori che vengono indicati come ricorrenti motivi di disturbo visivo:
 - i colori, l'altezza e la tipologia degli impianti;
 - il numero e la disposizione delle pale;
 - l'estensione della centrale eolica;
 - le modalità e la velocità di rotazione delle pale;
 - il contrasto con il paesaggio;
 - la visibilità degli impianti.

Attualmente il problema viene affrontato e analizzato con tecniche di valutazione paesaggistica che fanno ricorso a fotomontaggi, modelli in scala e simulazioni al computer.

- *Inquinamento acustico* - In Italia vige la prescrizione sui livelli di rumore previsti dal DPCM 1/3/1991 che stabilisce, in rapporto a diverse tipologie territoriali e periodi, limiti da un minimo di 40 dB(A) ad un massimo di non oltre 70 dB(A). L'attuazione del decreto è però soggetta ad adempimenti da parte dei comuni che devono delimitare il proprio territorio in riferimento alle aree definite.

Fatto salvo il rispetto dei limiti acustici territoriali stabiliti dal DPCM, esistono criteri riportati nella letteratura scientifica che fanno riferimento al concetto di

"differenziale", cioè all'aumento di rumore rispetto a quello di fondo. In base a questi criteri si possono stabilire preliminarmente le distanze minime che devono essere rispettate per singola casa/cascina, aree residenziali o di residenza turistica.

- *Interferenze elettromagnetiche* - Gli aerogeneratori possono essere fonte di interferenza elettromagnetica a causa della riflessione e della diffusione delle onde radio che investono la struttura.

Gli effetti di questo fenomeno possono essere studiati e calcolati facendo ricorso a modelli matematici predittivi che permettono di individuare, in maniera conservativa, la zona oltre la quale il rapporto tra segnale e disturbo è tale da non incidere sulla qualità del radioservizio. La misurazione degli effetti è possibile attraverso prove sperimentali. Sulla base di quanto riportato a questo proposito in letteratura sulla caratterizzazione di macchine di media taglia (200-500 kW di potenza) si ritiene che il rischio di tali disturbi possa considerarsi irrilevante per gli aerogeneratori della attuale generazione che utilizzano pale in materiale non metallico e antiriflettente.

2. Metodologia di studio

Per lo studio delle potenzialità dell'energia eolica, si è ricorsi principalmente alla letteratura divulgata dall'ENEA, dall'ENEL e dal CESI, sicuramente gli enti italiani più attivi nella ricerca del settore energia rinnovabile. Alla documentazione cartacea raccolta, si è poi aggiunta una considerevole quantità di articoli, relazioni e documenti spesso molto specifici (es. caratteristiche degli aerogeneratori) prelevati da siti web sia italiani che esteri (vedi bibliografia).

Il problema principale nel corso di tale studio è stato piuttosto, il difficile reperimento dei dati anemologici fondamentali per avanzare una stima della risorsa eolica in Italia e quindi delle potenziali produzioni di energia elettrica e di idrogeno.

I dati anemologici vengono raccolti ad intervalli regolari da stazioni meteo dislocate sul territorio nazionale tramite la misurazione della velocità e della direzione cardinale del vento a diverse quote s.l.t.. Una volta raccolti i dati di tutte le stazioni per i medesimi intervalli di tempo, è possibile elaborare delle statistiche per l'area in esame, atte ad individuare i siti più ventosi e le direzioni del vento più frequenti.

Il CESI ha concluso, in collaborazione con l'Università di Genova, la realizzazione dell'Atlante Eolico Italiano, questo intende fornire dati sulla distribuzione della risorsa eolica sul territorio italiano ed aiutare ad individuare le aree dove tali risorse possono essere interessanti per lo sfruttamento energetico. L'Atlante raccoglie in un unico volume le carte che descrivono la distribuzione sul territorio italiano dei valori stimati di velocità media annua del vento a tre quote dal suolo: 25 m., 50 m., e 70 m. (tab. n. 2 e 3 – *Allegati*).

Purtroppo al momento non è ancora possibile accedere all'opera in questione.

Dopo diversi tentativi presso altri Enti è stato possibile entrare in “possesso” delle statistiche elaborate congiuntamente dall'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica e dal Servizio Meteorologico Aeronautico Militare.

Tali statistiche sono realizzate sulla base delle osservazioni effettuate ogni tre ore dal 1951 al 1977, su 185 stazioni dell'Aeronautica Militare.

Si tratta effettivamente di dati non molto recenti (1951-1977), ma data la completezza delle informazioni ivi raccolte, risultano più che sufficienti per gli scopi prefissati da tale studio.

Per ogni stazione sono state correlate tra loro nei diversi periodi dell'anno e della giornata, le grandezze meteorologiche atte a caratterizzare la diffusione dei bassi strati dell'atmosfera. I parametri presi in considerazione per il presente studio sono: direzione, velocità, persistenza e velocità massima del vento.

In particolare, dalle tabelle relative alla persistenza della direzione del vento relativa ad ogni singola stazione, è stato possibile ricavare la frequenza (ore/anno) di una determinata intensità di vento per ogni direzione.

Dalle statistiche, sono state individuate alcune stazioni dislocate in più regioni, caratterizzate da un'alta frequenza di accadimento, relativa a venti superiori a 6 m/s: tale velocità è infatti l'intensità minima necessaria a permettere il regolare funzionamento della maggior parte degli aerogeneratori (velocità di "cut-in").

Ogni stazione meteorologica è individuata univocamente da un numero, una descrizione della località, dalle coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e dalla quota sul livello del mare.

Delle 185 stazioni rilevate, è stata fatta una selezione delle più "promettenti" ai fini dello sfruttamento della risorsa eolica.

Dato il carattere puramente teorico del presente studio, ci si è limitati a individuare i siti "dotati" di un'alta frequenza di accadimento di venti superiori ai 6 m/s..

Le statistiche prese in considerazione sono:

- *Distribuzione delle frequenze annuali della direzione e della velocità del vento;*

- *Frequenze cumulate stagionali delle persistenze delle direzioni del vento.*

Dalla prima statistica (tab. n. 2 – allegati), relativa ad ogni stazione, è stato ricavato il grafico della curva di accadimento delle sei classi di velocità del vento (vedi tabelle - allegati).

Nei grafici così ottenuti, viene messo in evidenza in colore verde, il “settore di funzionamento” dell’aerogeneratore compreso tra la velocità di “*cut-in*” (circa 6 m/s) e di “*cut-off*” (fuori servizio per valori superiori a 25 m/s).

Dall’intensità media del vento nell’anno solare, si è potuto calcolare il valore della *potenza dell’aria spazzata dal rotore* [1] e della *potenza dell’aerogeneratore* [2] utilizzando le seguenti relazioni:

$$[1] \quad P_{\text{aria}} = \frac{1}{2} \rho r^2 v_m^3 \quad [\text{W}]$$

$$[2] \quad P_{\text{aerog.}} = P_{\text{aria}} C_p$$

Con ρ densità dell’aria assunta pari a 1,225 [Kg/m³], r raggio delle pale più il rotore [m], v_m velocità media annua del vento [m/s] e C_p fattore di resa dell’aerogeneratore assunto pari a 0,593.

I valori così calcolati, sono raccolti nelle tabelle realizzate per ogni singola stazione come nelle tabelle n. ?? riportate nel capitolo ?.

Per ottenere il valore dell’*energia producibile* ovvero l’energia ottenibile a meno delle perdite fluido-dinamiche e costruttive, è necessario conoscere la quantità di ore di funzionamento con le velocità del vento che garantiscono la messa in funzione della macchina.

La conoscenza di tale parametro, risulta molto importante per la buona riuscita dell’installazione di qualsiasi impianto a generazione eolica.

Per ogni stazione considerata, è stata ricavata la media delle ore di funzionamento annuali dell'aerogeneratore ricorrendo alle statistiche relative alle *frequenze cumulate stagionali delle persistenze delle direzioni del vento*. Dalla suddetta tabella (tab. n. 3 - allegati), moltiplicando il numero di ore di persistenza rilevate per tutti gli eventi con velocità del vento superiore ai 12 nodi (circa 6 m/s, pari come visto precedentemente alla velocità di “*cut-in*”), si è giunti ad un numero indicativo di ore/anno di funzionamento dell'aerogeneratore.

Moltiplicando le ore di funzionamento (t) per la potenza erogata dall'aerogeneratore alla velocità media determinata nel sito, è stata ricavata l'*energia producibile* dall'impianto eolico [3].

$$[3] \quad \mathbf{E_{prod.} = P_{aerog.} \cdot t} \quad [\text{Wh}]$$

In particolare, per la potenza dell'aerogeneratore è stato preso a riferimento un Aerogeneratore modello Gamma 60, prodotto dalla Aeritalia del gruppo IRI-FINMECCANICA con caratteristiche costruttive e relativa curva di esercizio come in allegato.

Questa ultima è caratteristica di ogni generatore e permette di ricavare per via grafica la potenza erogata ad una determinata velocità del vento.

Viene da sé che la quantità di energia producibile non è solo funzione delle caratteristiche anemologiche del sito ma anche dalle performance dell'aerogeneratore; è chiaro dunque che a parità di condizioni e di tecnologia, un impianto di maggiori dimensioni (valore di r maggiore) otterrà delle prestazioni maggiori. Ad ogni modo un campo eolico non è mai costituito da un solo aerogeneratore ma da più elementi opportunamente disposti sull'area occupata in modo da non interferire aerodinamicamente tra loro. In questi casi l'energia totale prodotta sarà data semplicemente dalla somma dei singoli aerogeneratori.

III. L'idrogeno

1. Caratteristiche e tecnologie di produzione

Introduzione

L'idrogeno non può essere propriamente definito un fonte d'energia: la sua produzione, deriva dall'elaborazione di altre sorgenti energetiche, per cui esso viene più frequentemente definito come forma o vettore d'energia. Si tratta, quindi, di una forma di energia particolare, che negli ultimi decenni ha richiamato particolare attenzione in quanto ha sintetizzato caratteristiche particolari che consentono di coprire campi nei quali risulta meno agevole l'applicazione di altre forme d'energia.

La gamma di utilizzazione dell'idrogeno è decisamente vasta e le possibilità che si aprono sono veramente numerose.

Idrogeno come fonte d'energia

L'interesse all'idrogeno come fonte d'energia, risale ai primi anni 1970, durante la prima crisi petrolifera. Fu proprio con il verificarsi di tali condizioni, che diversi studiosi cominciarono a considerare il ruolo fondamentale che l'idrogeno avrebbe potuto giocare in campo energetico. Esso poteva essere agevolmente prodotto con l'impiego di energia elettrica, tramite elettrolisi, ed essere quindi immagazzinato e trasportato in diversi modi. La visione di un sistema energetico basato sull'idrogeno, però, era strettamente correlata, nella realtà, con la disponibilità di energia elettrica a basso costo, unico vincolo alla realizzazione di un sistema efficiente e competitivo.

Metodi per la produzione di idrogeno alternativi all'elettrolisi, erano comunque legati alla disponibilità di combustibili fossili e ciò rafforzò ancor più la

convinzione che senza la possibilità di disporre di energia elettrica poco costosa, non vi erano altre concrete possibilità di far fronte, nel breve termine, all'impellente crisi energetica. Di conseguenza, i progetti di ricerca legati all'energia dall'idrogeno furono progressivamente abbandonati.

Nel corso degli anni 1980, furono fatti notevoli passi avanti nello studio delle tecnologie relative alle risorse rinnovabili e all'efficienza energetica, tanto che la ricerca su sistemi energetici altamente efficienti basati su idrogeno e fonti rinnovabili, apparve sempre più interessante. In particolare, si intensificarono gli sforzi per lo sviluppo di tecnologie che rafforzassero il legame tra idrogeno e fonti rinnovabili, al fine di ridurre, se non eliminare del tutto, la dipendenza dai combustibili fossili tradizionali. Il raggiungimento di un sistema completamente basato sul ciclo di vita dell'idrogeno, presuppone infatti l'impiego di fonti rinnovabili per la produzione d'idrogeno da cui risulterebbe un impatto ambientale nullo dato che da tali processi di produzione residuerebbero solo ossigeno ed acqua. A tal proposito, si è mostrata molto interessante soprattutto dal punto di vista ambientale, lo sfruttamento dell'energia eolica per la produzione di idrogeno tramite elettrolizzatore. L'idrogeno così prodotto, verrebbe immagazzinato e trasportato per poi essere utilizzato nelle diverse possibili applicazioni.

Vantaggi dell'idrogeno

L'idrogeno è ormai considerato come il combustibile del futuro, le sue particolari caratteristiche infatti, ne fanno una fonte d'energia ideale.

L'idrogeno può essere prodotto, come l'elettricità, da qualsiasi fonte d'energia, comprese quelle rinnovabili: la materia prima fondamentale per la produzione dell'idrogeno è l'acqua, che è disponibile in abbondanza; l'idrogeno è una fonte completamente rinnovabile dato che il prodotto della sua utilizzazione, sia tramite combustione sia attraverso conversione elettrochimica, è acqua pura o

vapore acqueo. L'idrogeno è quindi compatibile con l'ambiente, poiché la sua produzione dall'elettricità, il suo immagazzinamento e trasporto, ed il suo utilizzo finale non producono alcun agente inquinante o qualsiasi altro effetto nocivo per l'ambiente. Esso inoltre non produce alcun gas serra, in particolare CO₂.

Esso può essere immagazzinato in forma gassosa (conveniente per l'immagazzinamento in larga scala), in forma liquida (conveniente per il trasporto aereo e terrestre) o in forma di idruri di metallo (conveniente per l'applicazione sui veicoli o per altre richieste di immagazzinamento su scala relativamente ridotta) e può essere trasportato lungo enormi distanze attraverso oleodotti o tramite navi cisterna (nella maggior parte dei casi più economicamente ed efficientemente dell'elettricità).

Un altro vantaggio dell'idrogeno è la possibilità di convertirlo in altre forme d'energia in diversi modi, per esempio tramite combustione catalitica, conversione elettrochimica, creazione di idruri, ecc..

L'idrogeno può essere combinato con benzina, metanolo, etanolo e gas naturale; aggiungendo appena il 5% di idrogeno alla miscela aria/benzina in un motore a combustione interna si possono ridurre le emissioni di ossido di azoto del 30%-40%. Un motore convertito per bruciare idrogeno puro produce solo acqua ed una minore percentuale di ossidi di azoto come gas di scarico (National Renewable Energy Laboratory, 1995).

L'idrogeno potrebbe rappresentare per il futuro la base di un sistema energetico indipendente dalle fonti di energia convenzionali. Le tecnologie chiave in tale sistema sono quelle legate alla produzione, all'immagazzinamento, al trasporto ed all'utilizzazione dell'idrogeno.

L'elettrolisi dell'acqua

Attualmente è l'unico metodo per ottenere idrogeno (e ossigeno) dall'acqua.

Consiste nell'introdurre nell'acqua un anodo e un catodo e stabilire una differenza di potenziale per separare l'idrogeno dall'ossigeno.

Gli elettrolizzatori in commercio ottengono un metro cubo di idrogeno con un alto grado di purezza utilizzando 3,7 Kw di energia elettrica con una elevata efficienza. Una interessante e quanto mai attuale applicazione di tale metodologia è rappresentata dall'accoppiamento di un generatore eolico ad uno o più elettrolizzatori. Tale processo permette la produzione un vettore energetico assolutamente *pulito*.

Come abbiamo già anticipato, l'idrogeno può essere ottenuto tramite l'elettrolisi dell'acqua (Fig. n.3). Questo processo fu applicato per la prima volta da Sir William Grove, nell'anno 1839.

L'elettrolisi richiede il passaggio di corrente elettrica attraverso l'acqua. La corrente entra nella cella elettrolitica tramite il catodo, un elettrodo caricato negativamente, attraversa l'acqua e va via attraverso l'anodo, un elettrodo caricato positivamente. L'idrogeno e l'ossigeno così separati confluiscono rispettivamente verso il catodo e verso l'anodo.

Per risolvere migliorare il rendimento della trasformazione, si prevede spesso l'applicazione dell'elettrolisi con vapore ad alta temperatura (900-1000 °C). L'alta temperatura del sistema accelera le reazioni, riduce le perdite d'energia dovute alla polarizzazione degli elettrodi ed accresce l'efficienza complessiva del sistema.

Questa tecnologia offre l'opportunità di ridurre il consumo di elettricità al 35% di quella utilizzata dagli attuali elettrolizzatori in commercio.

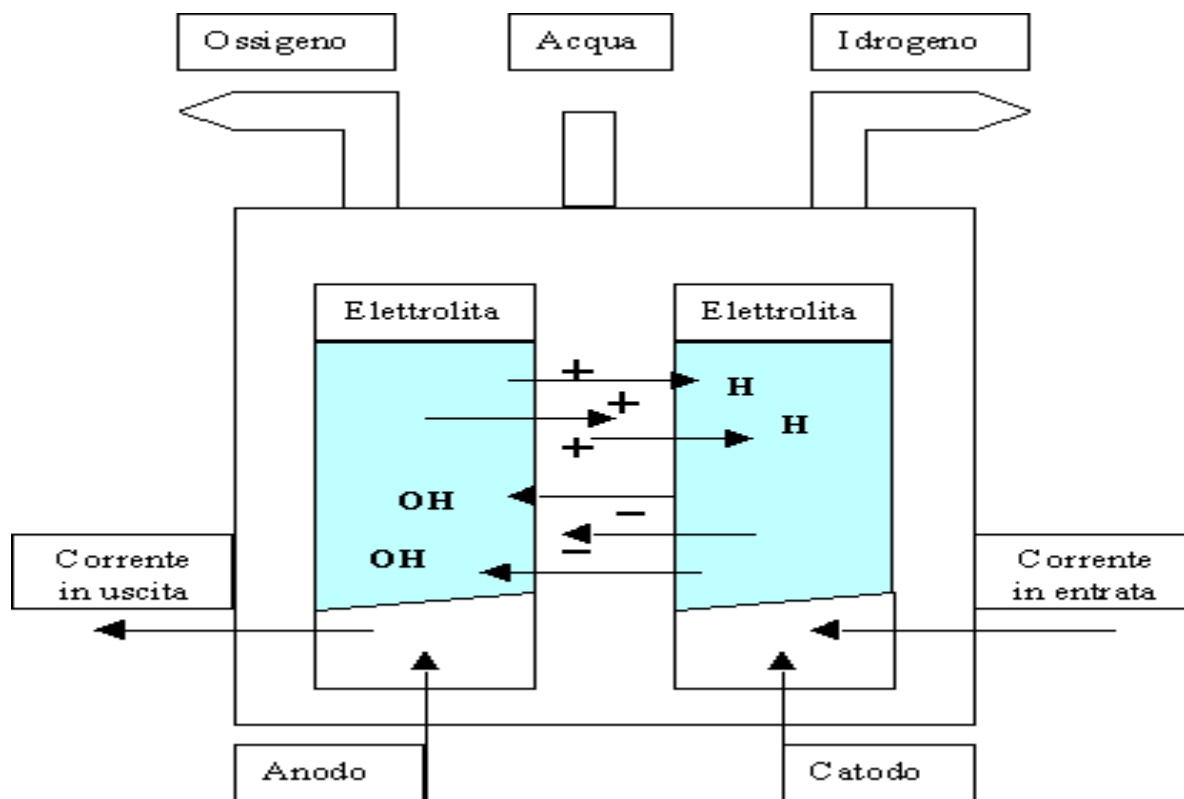


Fig. n. 3 - L'elettrolisi dell'acqua.

Questa notevole riduzione dei costi, e l'elevata efficienza di conversione stimata (circa il 90%), consentirebbe all'elettrolisi di essere competitiva anche con lo steam reforming, che richiede notevoli investimenti strutturali (Hydrogen R&D Program, 1999).

L'elettrolisi, è il procedimento che riveste il maggiore interesse e su cui la ricerca punta maggiormente.

Altri sistemi per la produzione dell'idrogeno

Steam reforming del metano (SMR)

L'idrogeno destinato all'industria chimica viene spesso prodotto tramite il processo di steam reforming (trasformazione con vapore) che si effettua, partendo da gas metano o da frazioni leggere di petrolio, con vapore d'acqua in presenza di un catalizzatore (generalmente nichel) alla temperatura di 800 °C. Il

gas risultante contiene anche monossido di carbonio che, reagendo con il vapore, si trasforma in biossido di carbonio (anidride carbonica).

Con questo sistema attualmente si produce il 48% dell' idrogeno (circa 240 miliardi di metri cubi all'anno a livello mondiale)

Sorbition Enhanced Reforming (SER)

Una evoluzione dello Steam reforming , consente di ottenere idrogeno estremamente puro con temperature di reazione particolarmente basse, per cui il processo è più economico.

Gassificazione

Con tale sistema, l'idrogeno si produce facendo reagire a 900 °C il vapor d'acqua con carbone coke e poi, a 500 °C, con un catalizzatore a base di ossidi di ferro; il gas risultante, formato da idrogeno e monossido di carbonio, era un tempo utilizzato come gas di città.

Cracking

Consiste nella rottura della molecola del metano mediante sistemi termici. Produce carbone e non CO. Non è tra i sistemi più efficienti.

Ossidazione parziale

Permette di ottenere idrogeno da idrocarburi pesanti come la nafta, è poco efficiente ed è necessario usare ossigeno puro.

Distillazione secca di biomasse

Come la gassificazione, anche la pirolisi, o distillazione secca, è un processo che per mezzo della decomposizione termica, spezza le molecole complesse delle sostanze organiche in elementi semplici, separati. Essa consiste nel

riscaldare la sostanza a 900-1000 °C, in assenza di aria, in opportuni impianti, con ottenimento di sostanze volatili e di un residuo solido.

Termoelettrolisi

Applicando l'elettrolisi su vapore ad alta temperatura (900/1000 °C) si ottiene idrogeno con circa 2,4 Kw per metro cubo. Comunque si ha una maggiore efficienza elettrolitica in rapporto direttamente proporzionale alla temperatura: a 15/20 °C per scindere l'acqua l' 83% dell'energia di reazione deve essere energia elettrica, mentre a 1000°C tale quota scende al 65%. Il vapore ad alta temperatura potrebbe essere ricavato, ad esempio, da soffiioni geotermici, da centrali termosolari a concentrazione o dal vapore residuo dell' "Amplificatore di Energia" (Reattore Rubbia).

Tecniche biochimiche

Alcuni ricercatori stanno sperimentando la produzione di idrogeno dai "rifiuti umidi" o da acque di scarico di processi alimentari tramite bioreattori anaerobici. E' una tecnologia promettente anche se allo stato sperimentale, ricercatori impegnati in vari progetti ritengono di poter arrivare a sistemi commerciali in tempi medio/brevi.

Tecniche Fotobiologiche

Consiste nell' utilizzo di energia solare abbinata a sistemi biologici, come alghe, microrganismi ingegnerizzati, rifiuti organici. In particolare, gli studi sono rivolti all'ingegneria genetica per ottimizzare la produzione di idrogeno da parte di microrganismi fotosintetici. Molto attivi in questo campo sono i laboratori dell'ENIRicerche, grazie agli studi effettuati, nel centro di San Donato Milanese, sul *Pyrococcus furiosus*, un batterio resistente a temperature elevate e, considerato molto promettente.

Tecniche Fotoelettrochimiche

Consiste nell' utilizzo di sistemi catalizzatori o semiconduttori che associati all'azione della luce solare sarebbero in grado di scindere le molecole d'acqua.

Agli inizi degli anni settanta due ricercatori giapponesi, Fujishima e Honda, hanno brevettato un procedimento di fotoelettrolisi, basato sul biossido di titanio, o rutilo, come fotoelettrodo, che ha dato inizio a numerose ricerche, non ancora sfociate nella realizzazione di un impianto.

Termolisi

Consiste nel dissociare le molecole di acqua tramite solo apporto di calore che richiede temperature molto elevate, circa 3000 °C. Sono però notevoli i problemi relativi alla gestione di temperature tanto elevate.

Fotolisi

La scissione dell'acqua si potrebbe realizzare anche per fotolisi, sfruttando cioè solamente la radiazione solare luminosa.

I ricercatori che perseguono questo metodo sono ancora lontani, anche concettualmente, dalla soluzione.

In definitiva, tutte le fonti di energia rinnovabile permettono di ottenere idrogeno, seguendo percorsi simili o alternativi, in genere la maggiore convenienza si ha laddove il percorso ha meno passaggi (Fig. n.4).

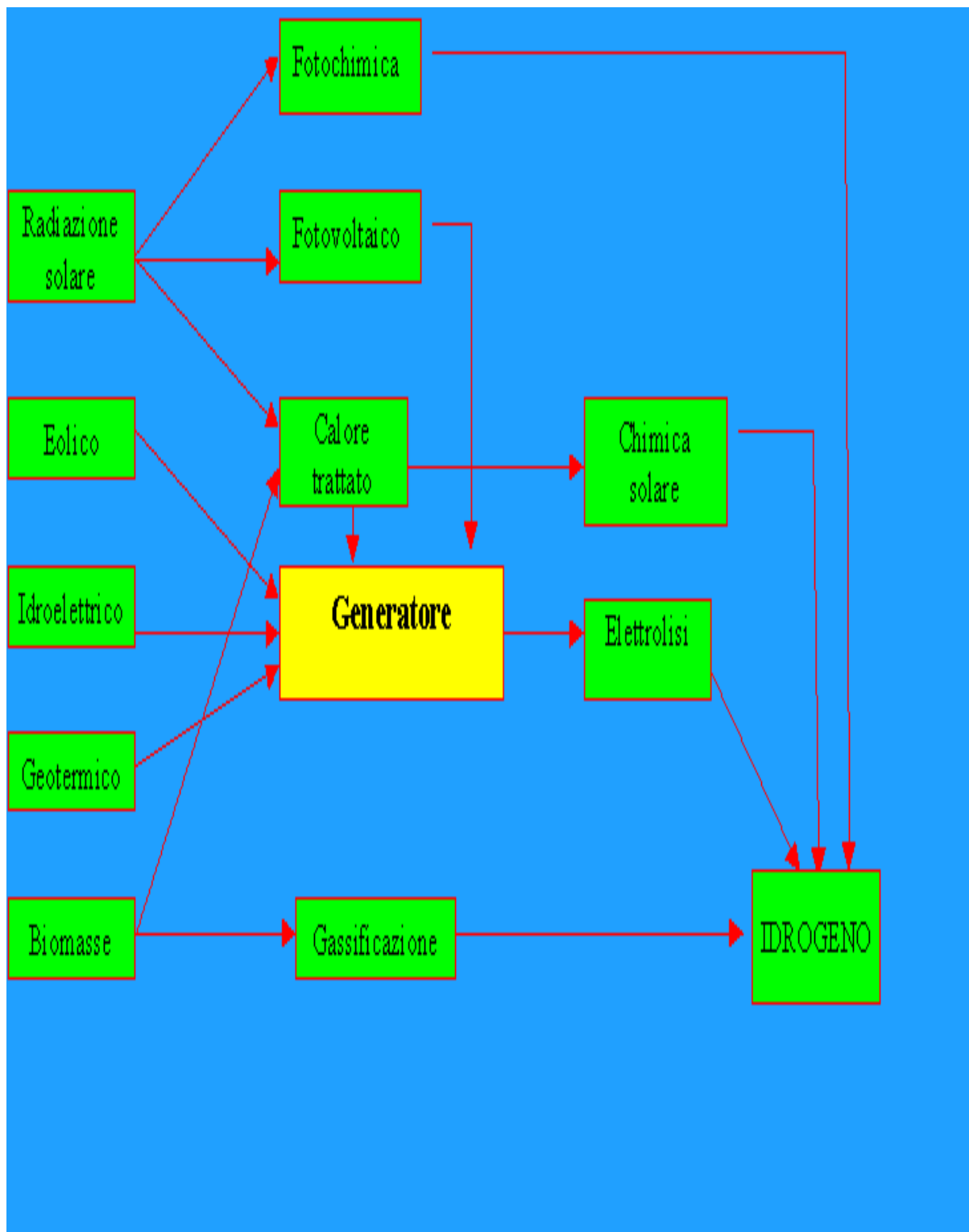


Fig. n. 4 – Produzione di Idrogeno da fonti rinnovabili

2. Tecnologie di immagazzinamento e trasporto dell'idrogeno

Introduzione

Le difficoltà riscontrabili nell'accumulo dell'idrogeno, rappresentano un grosso ostacolo alla promozione di questo carburante/vettore energetico.

Attualmente esistono diversi sistemi di accumulo dell'idrogeno, alcuni ampiamente collaudati, altri ancora in fase sperimentale.

Di seguito vengono presentati i principali metodi di accumulo.

Principali metodi di accumulo

Gas compresso

La compressione dell'idrogeno, è il sistema più semplice e più utilizzato, anche se presenta il problema dei grandi volumi che questo metodo di accumulo richiede. L'idrogeno compresso occupa un volume pari a circa tre volte quello del metano che è già di per se molto voluminoso, a confronto della benzina l'idrogeno compresso occupa 10 volte più spazio.

La compressione può avvenire tramite compressori a pistoncini assiali, radiali o alternati. I compressori assiali e radiali sono usati per i flussi maggiori. Uno dei vantaggi dei compressori assiali è che ne possono essere montati diversi su uno stesso albero ma il fatto che debbano essere installati meccanismi per la protezione dalle oscillazioni ne riduce l'efficienza al 50%. La compressione avviene in più fasi, a diverse pressioni, e può essere effettuata anche tramite l'impiego di idruri di metallo sfruttando la diversa pressione operativa delle fasi di idrogenazione e deidrogenazione. In genere essi vengono fatti agire in serie in modo che il calore rilasciato dall'uno venga utilizzato dal successivo, con un'azione a catena.

Molti sistemi di compressione utilizzano meccanismi di espansione per recuperare parte dell'energia della fase di compressione mentre negli attuali processi di liquefazione essi hanno lo scopo di aumentare l'efficienza di raffreddamento dell'idrogeno. Per grossi flussi d'idrogeno vengono impiegati i cosiddetti "turboespansori" che se completamente operativi hanno efficienza dell'85% ma risultano molto meno efficienti con carichi inferiori. I meccanismi di espansione sono anche utilizzati per modificare la pressione dell'idrogeno in base alla tecnologia di accumulo e all'applicazione finale (<http://www.eren.doe.gov>).

L'idrogeno può essere immagazzinato, come gas compresso, all'aperto, sotto terra e a bordo di veicoli. Questa tecnologia di accumulo è la più semplice in quanto le uniche attrezzature necessarie sono un compressore ed un contenitore pressurizzato.

L'idrogeno viene compresso a circa 20,7 MPa ed immagazzinato in cilindri per il gas, a pressione standard, o in contenitori sferici per quantità superiori a 15.000 Nm³. In generale l'accumulo sotto forma di gas compresso, in tubi ad alta pressione, è generalmente limitato a sistemi inferiori ai 14.000 Nm³ o ancora minori, a causa del loro costo elevato.

La maggior parte dei costi è rappresentata dal costo dell'energia impiegata per la compressione e dipendono, quindi, dalle quantità trattate e dal periodo di accumulo. La tecnologia di accumulo, ad una pressione di 20,7-55,2 MPa, è la meno costosa per il rifornimento di autoveicoli ma, purtroppo, ha una densità d'energia in rapporto al volume, molto bassa (13-3,4 MJ/l) se comparata a quella della benzina (32,4 MJ/l). Anche se quest'ultimo svantaggio può essere eliminato con l'aumento della pressione, non bisogna trascurare la questione della sicurezza. Sono stati sviluppati serbatoi con fibra rinforzata, composta (per

esempio alluminio-carbone) ma il loro costo, attualmente ancora elevato, andrebbe a gravare ulteriormente sul costo complessivo di accumulo, rendendolo ancor meno conveniente se rapportato alla densità d'energia che comunque resta esigua.

Idrogeno liquefatto

Anche questa tecnologia è ben nota e applicata, in questo caso il volume è minore rispetto al metano, ma occorre considerare che l' H_2 diventa liquido a $-253^\circ C$, costringendo a perdere dell'energia per portarlo e mantenerlo a tali temperature, inoltre il sistema non è privo di difficoltà tecniche e di conseguenti alti costi.

I processi di liquefazione utilizzano una combinazione di compressori, scambiatori di calore, motori di espansione e valvole a farfalla per ottenere il raffreddamento desiderato. Il processo di liquefazione più semplice è il ciclo Linde o ciclo di espansione Joule–Thompson. Tramite questo processo, il gas è compresso a pressione ambiente e quindi raffreddato in uno scambiatore di calore prima di passare attraverso una valvola in cui è sottoposto al processo di espansione Joule–Thompson producendo del liquido. Una volta rimosso il liquido il gas ritorna al compressore tramite lo scambiatore di calore.

Il processo Linde opera con gas, come l'azoto, che si raffreddano per espansione a temperatura ambiente. L'idrogeno al contrario, in questa fase si riscalda e per evitare ciò la sua temperatura deve essere inferiore alla sua temperatura d'inversione di 202 K. Per raggiungere tale temperatura alcuni processi raffreddano l'idrogeno con dell'azoto liquido pre-raffreddato che prima del passaggio nella valvola d'espansione, consente la riduzione della

temperatura dell'idrogeno a 78 K. L'azoto viene quindi recuperato e riciclato nel ciclo continuo di refrigerazione.

Altri sistemi, che superino gli inconvenienti legati alle basse temperature operative, sono in corso di perfezionamento (Amos, 1998).

L'idrogeno può essere liquefatto per la produzione stazionaria di energia sia per il rifornimento di veicoli. Successivamente, nella maggior parte dei casi, viene immagazzinato ad una temperatura di -253 °C. L'unico inconveniente di questo sistema è l'eventuale fuoriuscita di parte dell'idrogeno liquido ed il notevole dispendio energetico dell'intero processo. Infatti circa il 30% dell'energia dell'idrogeno è necessaria per il suo raffreddamento. Inoltre sono necessarie particolari attrezzature per il mantenimento dello stato liquido (Padrò e Putsche, 1999).

Una delle preoccupazioni maggiori legate a questo processo quindi, è quella della riduzione delle fuoriuscite di liquido. Dato che l'idrogeno è immagazzinato ad una temperatura che corrisponde al suo punto di ebollizione, qualsiasi passaggio di calore attraverso il liquido causa l'evaporazione di una parte dell'idrogeno e qualsiasi evaporazione si riflette in una perdita dell'efficienza del sistema.

L'impiego di contenitori criogenici isolati, può far fronte al problema del calore generato per conduzione, convezione ed irraggiamento. Tali contenitori sono progettati in modo da evitare qualsiasi trasmissione di calore dalla parete esterna al liquido, per cui sono tutti costituiti da un doppio rivestimento il cui interno è vuoto per impedire il passaggio di calore per conduzione o convezione. Per prevenire l'irraggiamento diretto di calore invece, tra la parete interna ed esterna del contenitore sono installati dei pannelli protettivi a bassa emissione di calore a base di plastica ed alluminio.

La maggior parte dei contenitori di idrogeno liquido hanno forma sferica perché quest'ultima ha la più bassa superficie per il trasferimento di calore per unità di volume. Inoltre, al crescere del diametro dei contenitori il volume aumenta più velocemente della superficie esterna per cui contenitori più grandi, in proporzione, provocano minori perdite per trasferimento di calore. I contenitori cilindrici, invece, sono preferibili per la loro facilità ed economicità di costruzione.

Anche se sottoposto con cautela all'irraggiamento solare, una parte dell'idrogeno può evaporare ed essere destinata ad aumentare la pressione nel contenitore o riciclata nel processo di liquefazione oppure, in alcuni casi, semplicemente liberata.

Il più grande sistema d'immagazzinamento per l'idrogeno liquido, con una capacità di 3.800 m³, è posseduto, attualmente, dalla NASA.

Riguardo questa tecnologia, il costo operativo maggiore è dovuto all'elettricità necessaria per la compressione per cui, attualmente, si stanno analizzando alcuni metodi per la riduzione della quantità di energia elettrica richiesta. Una delle possibili soluzioni, la liquefazione magnetica, è in fase di sviluppo (Veziroglu e Barbir, 1998).

Per quanto riguarda il rifornimento di veicoli, quello dell'idrogeno liquefatto potrebbe sembrare uno dei metodi più adatti. Sennonché bisogna considerare i notevoli rischi legati, solo per fare un esempio, alle perdite di carburante o ai problemi di sicurezza dovuti allo spazio ristretto a disposizione dei parcheggi. Inoltre, si stanno progettando dei serbatoi ad alta pressione leggeri ed impermeabili all'idrogeno. Lo scopo è quello di utilizzare tali serbatoi in spazi ristretti ed in particolare a bordo di veicoli. Basato sul principio fisico che i cilindri siano efficienti nel contenere la pressione interna, questi serbatoi sono costituiti da più cilindri congiunti, con un reticolato rinforzato interno. Il risultato è quindi quello di un contenitore "multi-cella" il cui numero è ottimizzato in base al volume del liquido da immagazzinare. Con questo metodo

è possibile immagazzinare il 50% di idrogeno in più rispetto all'uso di serbatoi tradizionali multipli.

Idruri metallici

Una tecnologia che in passato era considerata molto interessante ma che ha mostrato i suoi limiti nel costo della materia prima e nel peso dei sistemi, il volume di accumulo potrebbe essere paragonato a quello dei carburanti attuali, ma il peso diventa anche 10 volte maggiore.

Gli idruri di metallo sono dei composti che trattengono idrogeno nello spazio interatomico di un metallo, si formano ed agiscono attraverso due fasi: l'assorbimento ed il rilascio dell'idrogeno. L'assorbimento dell'idrogeno nello spazio interatomico (idrogenazione) è un processo esotermico che richiede raffreddamento mentre la sottrazione di idrogeno (deidrogenazione) è un processo endotermico che richiede calore.

Quando la pressione dell'idrogeno viene inizialmente aumentata l'idrogeno si dissolve nel metallo e quindi comincia a legarsi con esso. In questa fase la pressione operativa rimane costante fino al raggiungimento del 90% della capacità di immagazzinamento. Al di sopra di questo limite è necessario operare con pressioni elevate per raggiungere il 100% della capacità. La dispersione di calore durante la formazione dell'idruro devono essere continuamente rimosse per evitare che l'idruro si infiammi. Se l'idrogeno viene estratto da un altro gas, una parte di esso può essere liberata in modo che porti via gli elementi estranei che non si legano al metallo. Con la deidrogenazione invece, si spezza il legame formatosi tra il metallo e l'idrogeno e la pressione operativa aumenta all'aumentare della temperatura. Inizialmente si opera a pressione elevata e viene rilasciato idrogeno puro quindi in seguito alla rottura del legame con il metallo la pressione si stabilizza fino a ridursi drasticamente quando nell'idruro residua circa il 10% dell'idrogeno. Quest'ultima parte di gas è molto difficile da

rimuovere essendo quella più saldamente legata al metallo e quindi spesso non può essere recuperata nel normale ciclo di carico e scarico (Amos, 1998).

La temperatura e la pressione di queste reazioni dipendono dalla composizione specifica dell'idruro. Il calore di reazione può variare da 9.300 fino a 23.250 kJ/kg di idrogeno e la pressione può anche superare i 10 MPa. La temperatura di deidrogenazione a sua volta può superare i 500 °C. considerato questo vasto campo di temperatura e pressione, la costruzione di unità d'immagazzinamento presenta notevoli difficoltà. Inoltre, ogni lega ha differenti caratteristiche quali il ciclo di vita e la temperatura di reazione.

Il contenitore dell'idruro deve essere pressurizzato e contenere una area sufficientemente grande per lo scambio del calore al fine di garantire la rapidità delle fasi di carico e scarico dell'idruro per le quali è richiesta, inoltre, stabilità termica e strutturale della lega impiegata (Amos, 1998).

Anche se per la deidrogenazione è necessario calore, l'eventualità che si verifichino perdite di idrogeno non riveste particolare importanza ed è questo il motivo per cui tali tecnologie sono considerate sicure. Gli svantaggi sono, però, la pesantezza dei sistemi, la bassa densità gravimetrica dell'idrogeno (1%-7%) ed i costi generalmente elevati che non consentono ancora la realizzazione di sistemi di immagazzinamento ad idruri di metallo funzionanti commercialmente su larga scala.

I costi operativi per tali sistemi includono quelli relativi alle operazioni di raffreddamento per l'idrogenazione e riscaldamento per la deidrogenazione. L'ammontare di calore richiesto dipende dal tipo di metallo e dalle sue applicazioni. Se, per esempio, il sistema è integrato con una cella a combustibile, la quantità di calore necessaria può essere fornita dal carico di raffreddamento della cella ed avere in questo modo un costo insignificante. Così, idruri a bassa temperatura potrebbero ben integrarsi con celle PEM (Polymer Electrolyte Membrane 4) che operano a 80 °C, mentre idruri ad alta temperatura con celle del tipo SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) e MCFC (Molten

Carbonate Fuel Cell) che operano rispettivamente a 1000 °C e 650 °C. Gli altri sistemi d'immagazzinamento, invece, non hanno la possibilità di integrarsi con tali tecnologie.

Il costo totale di questi sistemi è influenzato fortemente dal costo dell'idruro di metallo e sono ulteriormente penalizzati dall'assenza di economie di scala. Queste leghe, inoltre, non hanno attualmente un largo impiego, per cui sono prodotte in quantità limitate. Una crescita della loro domanda, con conseguente carenza di materiali disponibili, avrebbe come conseguenza incrementi notevoli dei loro costi e l'impossibilità, quindi, di realizzare economie di scala.

Per il futuro, anche se si prevede un incremento del costo delle leghe impiegate, si auspica che almeno sistemi molto piccoli possano essere competitivi con altre tecnologie.

Idruri chimici

Si tratta di una tecnologia promettente con continue ed interessanti evoluzioni. In pratica l'idrogeno viene imprigionato nei legami chimici di varie molecole inorganiche: con azoto si ottiene ammoniaca, con CO₂ si ottiene metanolo, con carbonio si ottiene metilcicloesano, con borace si ottiene sodio boridruro.

Questo metodo per l'immagazzinamento dell'idrogeno, viene utilizzato principalmente per periodi d'immagazzinamento stagionali, utile ad esempio a Paesi, come il Canada, che presentano un surplus di energia idroelettrica durante l'estate ed una carenza nei mesi invernali. Il Giappone tra l'altro, sta programmando la produzione di idrogeno in Canada, sfruttando appunto l'energia idroelettrica per l'elettrolisi, per poi importarlo sotto forma di idruro e rigenerarlo per la produzione di elettricità. Lo svantaggio di tale tecnica è rappresentato dalle imponenti e costose attrezzature necessarie per il trasporto transoceanico. A tale scopo, sono state proposte numerose sostanze chimiche contenenti idrogeno, tra cui ammoniaca e metanolo la cui elevata tossicità pone però non pochi problemi.

L'uso dei sistemi chimici risulta vantaggioso poichè le infrastrutture di trasporto ed immagazzinamento sono già esistenti, la tecnologia è sfruttabile commercialmente e l'idrogeno liquido è facilmente maneggiabile (Padrò e Putsche, 1999).

In particolare, l'utilizzo del toluene, con formazione di metilcicloesano (il sistema basato su Metilcicloesano-Toluene-Idrogeno, MTI) è promettente poiché sia il toluene sia il metilcicloesano sono composti conosciuti, facilmente trasportabili e sicuri. La formazione di metilcicloesano è ottenuta mediante idrogenazione del toluene seguita da quella di deidrogenazione (che avviene a circa 500° C), con un consumo del 20% dell'energia contenuta nell'idrogeno liberato. Per il peso e l'ingombro degli impianti questa tecnica si presta, oltre che per l'accumulo stagionale, anche per l'utilizzo su mezzi pesanti (Ruberti, 2000).

Idruri chimici: Il sodio boroidruro (NaBH_4)

La tecnologia basata sul sodio boroidruro potrebbe in futuro risolvere maggiori problemi di accumulo, trasporto e distribuzione dell'idrogeno. L'idrogeno viene imprigionato nei legami chimici del boro e del sodio, formando un sale. Una soluzione acquosa composta per metà da sodio boroidruro e metà di acqua (in peso) fornisce (attraverso un catalizzatore al rutenio) idrogeno con un rapporto energetico simile, in volume, alla benzina. Una volta che l'idrogeno viene estratto dal sodio boroidruro rimane del borace, una sostanza presente nei detersivi comuni, la quale può essere riciclata nuovamente in sodio boroidruro.

L'utilizzo del NaBH_4 non è recente, la Nasa lo aveva adottato per alimentare i razzi dello shuttle, il programma fu accantonato negli anni '70 perchè il sale non reggeva le enormi temperature a cui sono sottoposte le strutture dello shuttle.

La DaimlerChrysler ha costruito un prototipo applicando la tecnologia che utilizza il sale in questione per alimentare delle fuelcell (il Natrium, su un

modello Town & Country della Chrysler). Anche la PSA-Peugeot ha costruito un prototipo con il catalizzatore al rutenio, si chiama H2O.

La Millennium cell (che produce i sistemi catalizzatori brevettati) ha realizzato diversi prototipi con la Ford ma la prima applicazione in scala sarà attuata probabilmente dall'esercito USA che sta costruendo dei generatori strategici e tattici per le necessità di energia elettrica logistica.

I problemi da superare sono:

- 1) Alto costo del sodio boroidruro, comunque il borace residuo può essere continuamente riciclato per cui il costo diventa ammortizzabile.
- 2) Messa a punto di un buon sistema di riciclaggio sodio boroidruro-borace-sodio boroidruro.
- 3) Ottimizzazione del sistema catalizzatore sia in costi che in rendimento

I problemi sono in gran parte di tipo economico, la Millennium Cell indica in 4/5 anni il tempo necessario a loro per ovviare a questi problemi e ritiene che il sistema possa avere una certa diffusione tra una decina d'anni. Probabilmente con investimenti maggiori i tempi potrebbero essere accorciati. In pratica, l'utilizzo di questo sistema risolverebbe due terzi dei problemi che ostacolano l'impiego di idrogeno, il sistema di accumulo /trasporto e il sistema di distribuzione/ utilizzo, in quanto, a differenza di tutti gli altri sistemi, non è infiammabile e neanche tossico-nocivo.

Nanotecnologie

Le nanotecnologie sembrano poter dire la loro anche a proposito di accumulo dell'idrogeno, soprattutto usando nanostrutture e nanotubi di carbonio. Tali

sistemi sono ancora in fase sperimentale ma sembrano promettenti in peso e volumi di idrogeno accumulato e anche per i relativamente bassi costi previsti.

A temperature criogeniche (70-113 K) e pressioni moderate (42-54 atm) il carbonio reso radioattivo, può assorbire, reversibilmente, 0,043-0,072 kg H₂/kg di carbonio. Il National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha recentemente raggiunto una capacità d'immagazzinamento gravimetrica del 5%-10%, a temperatura normale, usando nanotubi al carbonio.

Attualmente, sono numerosi gli studi relativi a sistemi che consentano d'immagazzinare, a temperatura normale, attraverso tali tecnologie, notevoli quantitativi d'idrogeno. Le nanostrutture al carbonio possono rappresentare la risposta tecnologica alla richiesta di un sistema che renda realizzabile il progetto di veicoli alimentati ad idrogeno.

Le due nanostrutture al carbonio che rivestono maggiore interesse sono nanotubi isolati singolarmente e nanofibre di grafite. I nanotubi al carbonio, pori allungati con diametri di dimensioni molecolari, assorbono idrogeno, con un'azione capillare a temperature non-criogene. Il NREL ha prodotto e testato dei nanotubi isolati, con tecniche di produzione ad alti rendimenti, che hanno dimostrato di poter trattenere il 5%-10% del peso dell'idrogeno, a temperatura normale. Le nanofibre alla grafite sono composte da materiali generati dalla decomposizione di miscele contenenti idrocarburi. La parte solida è formata da un insieme di nanocristalli distanziati uniformemente a 0,34-0,37 nanometri, curvati insieme dalle forze di van der Waals per formare una struttura di nanopori a parete flessibile. La Northeastern University prevede che queste strutture possano avere eccellenti capacità d'immagazzinamento.

I sistemi con nanostrutture al carbonio potrebbero essere realizzati con costi particolarmente bassi, ma la ricerca è ancora ai primi passi e non è possibile effettuare analisi precise. Attualmente, infatti, nessuno di questi sistemi può essere sfruttato commercialmente.

Microsfere cristallo

Questa tecnologia consiste nell'imprigionare idrogeno in minuscole sfere di vari tipi di cristallo, il "carburante" così ottenuto si presenta come una sabbia, alta densità di accumulo, peso relativamente basso e costi tra i più promettenti.

Le piccole sfere di cristallo, sono vuote, presentano un diametro che varia da 25 a 500 micron ed uno spessore di un solo micron, trattate e trasportate commercialmente sotto forma di polvere fluida.

L'incapsulamento dell'idrogeno è realizzato tramite il riscaldamento di un letto di microsfere vuote in un ambiente denso di idrogeno. L'idrogeno si introduce nelle sfere attraverso il sottile involucro esterno di cristallo reso permeabile dalle alte temperature alle quali avviene il processo (da 200 °C a 400 °C). Il processo si conclude quando l'idrogeno, all'interno delle sfere, raggiunge la stessa pressione esterna. A questo punto il letto viene raffreddato e l'idrogeno non incapsulato viene liberato o trattenuto per altre applicazioni. L'efficienza del processo dipende da determinate caratteristiche quali: pressione dell'idrogeno, temperatura e volume del letto, dimensioni e composizione chimica delle microsfere. Una volta raffreddate a temperatura ambiente le sfere trattengono al loro interno l'idrogeno, successivamente vengono ricoperte, immagazzinate in recipienti a bassa pressione e trasportate sotto forma di una sottile polvere. L'estrazione dell'idrogeno dalle microsfere avviene tramite il loro riscaldamento, e permette comunque di riutilizzarle per successivi incapsulamenti. Il rilascio dell'idrogeno può essere provocato anche con la rottura delle sfere, con lo svantaggio, però, di non poterle più riutilizzare. L'energia termica necessaria a questo scopo può essere fornita da un riscaldatore elettrico alimentato da una piccola cella ad idrogeno o da una batteria, ricaricate da un generatore meccanico.

E' stato dimostrato che questo metodo d'immagazzinamento, opportunamente accessoriato e modificato, può risultare pratico e conveniente per l'applicazione su veicoli. Sono state anche individuate le microsfere più idonee, per

composizione e dimensioni, a tale applicazione. Esso è inoltre più conveniente degli idruri di metallo, ha la loro stessa sicurezza e non presenta problemi in caso di esposizione all'aria.

Tale metodo, ha buone prospettive di prevalere rispetto agli altri sia per le caratteristiche tecniche sopra descritte sia per la sua competitività a livello economico

3. Metodologia di studio

L'idrogeno, ricordiamo che è molto diffuso in natura sotto forma di composti, come acqua, idrocarburi, sostanze minerali, organismi animali e vegetali. La produzione come descritto nel cap. III, consiste dunque in processi finalizzati ad estrarlo dai composti nei quali è legato all'ossigeno e al carbonio, rispettivamente nel caso dell'acqua e degli idrocarburi.

Può essere prodotto da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) o sfruttando il calore prodotto nelle centrali termoelettriche e nucleari, ma in entrambi i casi non si ottengono processi "puliti".

Un'alternativa è costituita dallo sfruttamento delle fonti rinnovabili con le quali può essere ottenuto in maniera "pulita".

Nel corso del presente studio si sono avanzate delle ipotesi di calcolo circa le quantità di idrogeno producibili sfruttando l'energia eolica ricavabile in alcuni siti italiani combinata con un elettrolizzatore.

L'elettrolisi dell'acqua, permette di ottenere idrogeno praticamente puro. Il processo di scissione delle molecole impiega, con le attuali tecnologie, mediamente 4-5 kWh di energia elettrica per ogni metro cubo di idrogeno prodotto. Sfruttando la suddetta proporzione, per ogni sito si è ricavata la capacità produttiva di un singolo aerogeneratore combinato ad un'elettrolizzatore. Risulta chiaro come i siti più ventosi come l'Asinara (ID 502 – tabella in allegati) siano più produttivi sia per quanto riguarda l'energia elettrica ricavata (8000 kWh/anno) che per la produzione di idrogeno ottenibile (1600 Nm³/anno).

Nella tabella riassuntiva (tabella riassuntiva produzione – allegati), sono messe a confronto le "potenzialità energetiche" di cinque siti italiani.

Energia con meno inquinamento

L'idrogeno si presta a essere utilizzato come combustibile nelle celle a combustibile o nei riscaldatori catalitici a bassa temperatura. In passato veniva utilizzato come gas di città. Qualsiasi idrocarburo addizionato con idrogeno migliora la combustione e il suo rendimento. La combustione dell'idrogeno non presenta particolari problemi e dà luogo a emissioni inquinanti notevolmente inferiori agli altri combustibili: l'unico prodotto inquinante è rappresentato dagli ossidi di azoto che si formano a causa della temperatura di combustione e, comunque, in misura minore rispetto ai combustibili fossili. Ovviamente, nel caso dell'idrogeno, non vi sono idrocarburi incombusti, anidride solforica (come con il gasolio) né anidride carbonica. La combustione avviene con fiamma non luminosa, con temperatura della fiamma a rapporto stechiometrico più alta che nel metano (2400 kelvin contro 2190).

In rapporto al metano, con l'idrogeno occorrono quantità volumetriche triple per ottenere lo stesso potere calorifico, ma la velocità di flusso è tre volte più alta, per cui è necessario apportare modifiche ai bruciatori a fiamma aperta. L'energia da fornire per ottenere, l'accensione dell'idrogeno in aria è notevolmente inferiore al metano, per cui esso si presta particolarmente per l'utilizzo in riscaldatori catalitici a bassa temperatura. Sia i riscaldatori catalitici sia le celle a combustibile presentano il vantaggio di non dar luogo, se non in misura ridotta, alla Formazione di ossidi di azoto (NO_x).

Un sistema già economicamente conveniente per l'accumulo di energia sotto forma di idrogeno è rappresentato dall'impiego delle centrali idroelettriche di generazione e di pompaggio, qualora non siano disponibili bacini di accumulo o nei periodi di basso consumo.

La produzione di idrogeno per mezzo di fonti rinnovabili è da considerarsi la soluzione ottimale perché né in fase di produzione né in fase di consumo si ha la formazione di molecole inquinanti.

Idrogeno come carburante

Il settore in cui più si sono maggiormente concentrate le ricerche è quello dei trasporti. Da decenni, nel trasporto aereo, si propone di utilizzare l'idrogeno, principalmente per il peso, molto inferiore al carboturbo che costituisce parte notevole del carico complessivo dei velivoli.

Nel settore del trasporto su gomma, le automobili, con i relativi problemi ambientali, rappresentano una voce rilevante del mercato dell'energia. Per questo si stanno intensificando gli studi sui veicoli che utilizzano idrogeno come combustibile e, almeno in questo campo, l'Italia è uno dei paesi leader.

Già nei primi anni settanta un ingegnere torinese, Massimiliano Longo, aveva sviluppato un sistema per utilizzare l'idrogeno per le automobili.

Nei primi anni novanta l'ENEA, in collaborazione con la Magneti Marelli e la VM Motori, presentò un FIAT Ducato alimentato a idrogeno. La BMW ha recentemente presentato un'automobile alimentata a idrogeno liquido, non come prototipo, ma come modello regolarmente in vendita; mentre la Mercedes sta sperimentando furgoni alimentati a idrogeno immagazzinato come idruro di nichel. Negli Stati Uniti e in Canada la Ballard, in collaborazione con varie case automobilistiche, ha sviluppato autobus funzionanti con celle a combustibile, utilizzati in alcune città, per esempio a Vancouver, per il trasporto pubblico.

Anche alcune delle principali industrie automobilistiche giapponesi, -Honda, Toyota, Suzuki e Mazda, hanno sviluppato, con partner pubblici e privati, autovetture a idrogeno.

Nel settore del cabotaggio, solo per citare una delle applicazioni più recenti nell'ambito del Progetto Euro Quebec, l'Ansaldo ha presentato, il 24 aprile 1996, un battello funzionante a celle a combustibile adibito al trasporto passeggeri sul Lago Maggiore.

Conclusioni

Uno dei principali ostacoli alla diffusione dell'idrogeno, è senz'altro rappresentato dai costi. Essi sono del resto inversamente proporzionali alla sua disponibilità su vasta scala, per cui esso può essere abbattuto con una sempre più ampia diffusione della tecnologia legata al suo impiego.

Attualmente la produzione dell'idrogeno non è competitiva con il prezzo dei combustibili fossili; questo è probabilmente dovuto alla scarsa valutazione delle esternalità derivanti dall'impatto dei combustibili fossili su ambiente e salute.

Se infatti venissero correttamente inglobate nei prezzi i costi indiretti che essi comportano, il prezzo dell'idrogeno risulterebbe senz'altro più vantaggioso.

Un atteggiamento di questo tipo da parte dei governi non fa altro che rinviare e ingigantire un problema sempre più grave e irreparabile (effetto serra, piogge acide, desertificazione, malattie ecc.). Dobbiamo poi considerare che il petrolio facilmente estraibile è sempre più scarso e che quello ottenibile da giacimenti meno accessibili farà lievitare i prezzi. Inoltre, lo sviluppo dei paesi in via di industrializzazione porterà a un incremento della domanda di energia e, quindi, di combustibili. Probabilmente, ancora per alcuni decenni (è stato stimato fino al 2030), i combustibili fossili rappresenteranno la fonte energetica maggiormente utilizzata, con cospicue emissioni di gas serra (CO_2 , CH_4 , SF_6 , N_2O , HFC e PFC) e altri inquinanti, seguita dall'energia idroelettrica e dal nucleare. Il ricorso alle fonti definite rinnovabili, vale a dire compatibili con la conservazione dell'ambiente e sostenibili nel tempo, si incrementerà in misura crescente soprattutto in modo da sopperire al calo di disponibilità degli idrocarburi e alla crescente richiesta di energia che si verificherà con gli attuali trend intorno agli anni 2020-2030.

Occorrerà dunque dapprima integrare e man mano sostituire del tutto le tradizionali fonti energetiche esauribili con risorse rinnovabili dal basso impatto ambientale. Se a tutto ciò, aggiungiamo l'orientamento dei paesi industrializzati,

indirizzato verso un'imposizione fiscale sui danni ambientali, anche per cercare di rispettare gli accordi di Kyoto, ecco diventare meno ipotetica una alternativa come l'idrogeno. Questo farà decollare l'utilizzo su vasta scala dell'idrogeno, considerato uno dei vettori energetici più promettenti.

La progressiva diffusione delle centrali energetiche alternative (in particolare idraulico, geotermico, eolico, fotovoltaico e biomasse), e lo sviluppo della tecnologia delle celle a combustibili, consentiranno dunque una sempre crescente attenzione del mercato nei confronti dell'idrogeno. Ai giorni nostri, l'utilizzo dell'idrogeno rappresenta già un ottimo rimedio per i trasporti urbani in tutte le grandi metropoli ove il problema della qualità dell'aria si fa sempre più pressante. In queste condizioni, l'utilizzo di mezzi provvisti di celle a combustibile, consentirebbe l'abbattimento delle emissioni inquinanti con conseguente giovamento sia per l'uomo che per l'ambiente. Non sarebbero tra l'altro più necessarie le continue e sempre più frequenti limitazioni al traffico privato (vedi targhe alterne) per rientrare nei limiti di tollerabilità della qualità dell'aria e diminuirebbero senz'altro le malattie legate alla respirazione di sostanze cancerogene. Le celle a combustibile, superati i problemi tecnici relativi alle prime applicazioni, hanno dimostrato di essere una soluzione ideale anche per la produzione di energia in città. Caratterizzate da un'alta efficienza elettrica e termica con emissioni inquinanti molto ridotte ed abbattimento dei costi si può fornire la risposta ideale ai problemi delle aree densamente abitate ma non solo. La combinazione tra un aerogeneratore e un elettrolizzatore, oggetto di questa tesi, consentirebbe lo sfruttamento dell'energia elettrica proveniente direttamente dall'aerogeneratore e contemporaneamente la produzione del vettore energetico idrogeno, utile a compensare la discontinuità della risorsa eolica. Una soluzione di tal tipo, data la sua completa autonomia, permetterebbe di rendere energeticamente autosufficienti anche aree remote non ancora raggiunte o difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica. In questa situazione, si dovrà attentamente valutare il rapporto costi/benefici per

individuare la soluzione energetica più favorevole (allaccio tradizionale alla rete elettrica, acquisto di idrogeno, uso combinato aerogeneratore/elettrolizzatore per la produzione in loco). Si pensi ad esempio ad un rifugio di alta montagna o ancora ad un complesso alberghiero non raggiunti dalla rete elettrica dove i turisti generalmente si recano per godere del contatto con la natura e giovare della qualità dell'aria. In questi casi, l'utilizzo dell'idrogeno porterà degli indiscutibili vantaggi quali: indipendenza energetica, nessun costo di allaccio e soprattutto positive ricadute sull'immagine e sull'economia della struttura alberghiera.

Altra situazione in cui è possibile ricorrere vantaggiosamente all'auto-produzione di energia pulita è individuabile nelle Isole ove la presenza della risorsa eolica (e/o solare) risulta sufficiente a produrre energia elettrica (tramite aerogeneratore) e idrogeno (tramite elettrolizzatore). Nei siti particolarmente produttivi, sarebbe poi possibile l'accumulo dell'idrogeno (caratteristica di tale vettore energetico che consente anche l'accumulo di energia) e l'esportazione verso altri utilizzi consentendo così anche un ritorno economico utile ad ammortizzare le spese di impianto.

Bibliografia

Articoli, Documenti e Libri:

- Enea – Energia Eolica – Aspetti tecnici, ambientali e socio-economici, 2000;
- Energy Options – Real economics and the solar-hydrogen system – J. O'M. Bockris, Taylor & Francis Ltd, London 1980;
- Caratteristiche diffusive dei bassi strati dell'atmosfera – Ente Nazionale per l'Energia Elettrica – Servizio Meteorologico Aeronautica Militare;
- ENEA – Piano Energetico della Regione Campania, marzo 2001;
- Amos W. A., 1998, "Cost of storing and transporting hydrogen", documento del National Renewable Energy Laboratory;
- Barbir F., 1999, "Review of hydrogen conversion technologies", articolo tratto dal sito dell'International Association for Hydrogen Energy, Stati Uniti, pagina: "Hydrogen", (<http://www.iahe.org>);
- Chiacchierini E., 1992, "Materie prime, trasformazione ed impatto ambientale", Roma, Edizioni Kappa;
- Ciborra B., 1999, "Enciclopedia delle Scienze", volume "Energia e Chimica", sezione "Energetica", Novara, Istituto geografico De Agostani;
- Coiante D., 1995, "Lo sviluppo delle fonti rinnovabili e la produzione di idrogeno come combustibile alternativo", Rapporto Tecnico ENEA;
- National Renewable Energy Laboratory, Febbraio 1995, "Hydrogen program: overview", tratto dalla pagina web del NREL;
- Ruberti E., 2000, "Idrogeno: energia per il futuro", Le Scienze;
- Unione Europea, Pubblicazione del Consiglio Generale dell'Energia, gennaio 2000, "Energy In Europe-1999 Annual Energy Review";
- Veziroglu T. N., 1998, "Hydrogen energy system: a permanent solution to global problems", articolo tratto dal sito dell'International Association for Hydrogen Energy, Stati Uniti, pagina: "Hydrogen", (<http://www.iahe.org>);

Bibliografia

- M. Burlando, A. Podestà, F. Castino, C.F. Ratto, M. Alabiso, G. Botta, M. Casanova, E. Lembo, C. Lusso, “The Italian wind Atlas”, IN-VENTO-2002, Milano, 2002;
- M. Alabiso, M. Casanova, E. Lembo, C. Lusso, T. Zucca, “Atlante eolico dell’Italia”, CESI-RdS A2/039249, novembre 2002;

Siti Web:

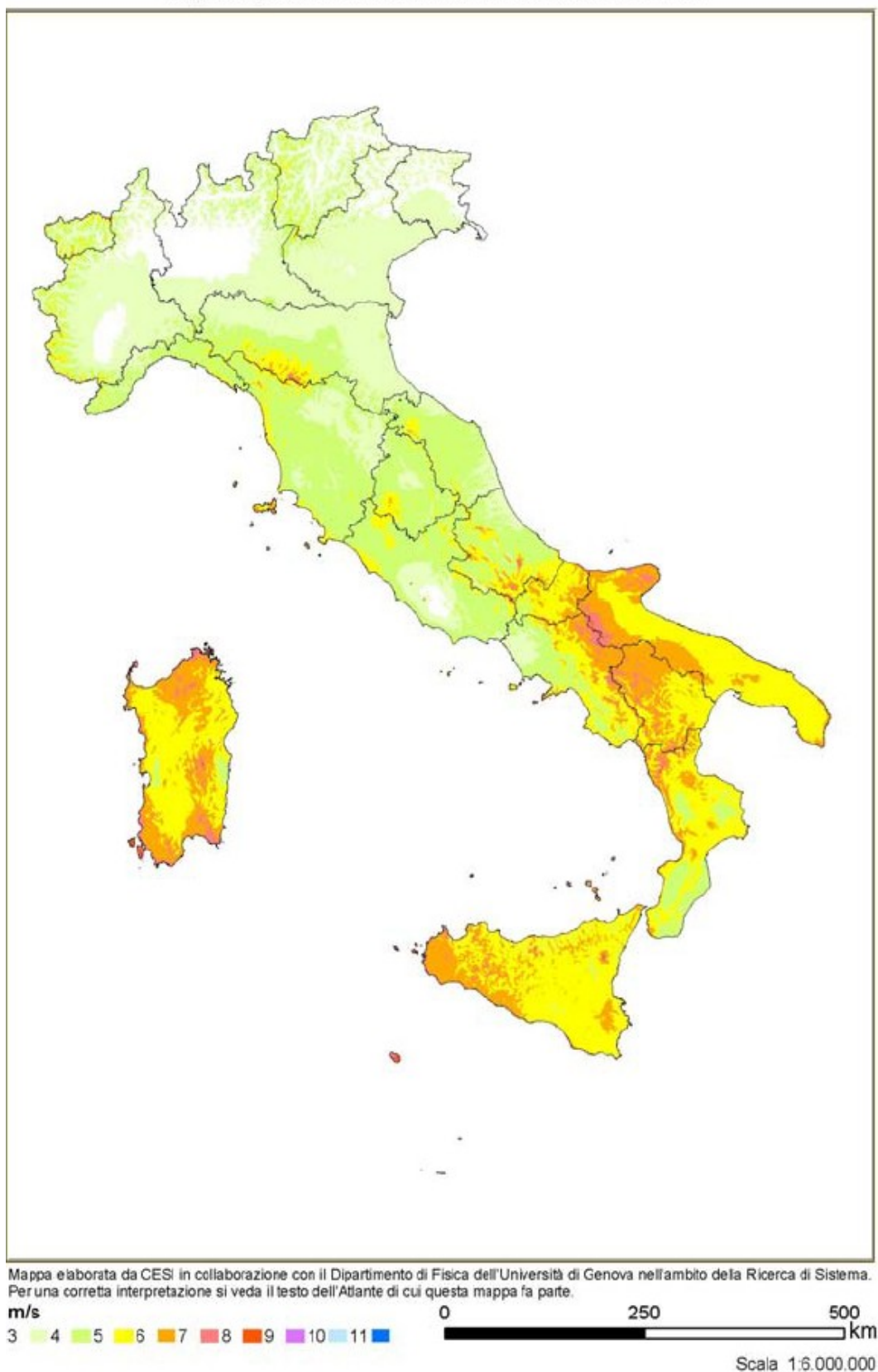
<http://www.iahe.org>

- www.enea.it
- www.enel.it
- www.cesi.it
- <http://enelgreenpower.enel.it/it/vento/index.html>
- <http://www.energia-eolica.it/index.php>
- <http://www.energoclub.it/PAGINA%20UNO.htm>
- <http://www.ewea.org/>
- <http://www.astrogeo.va.it/statisti/link.htm>
- www.ucea.it
- http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/wkshp_wind_hydro.html
- <http://www.isac.cnr.it/>
- http://www.idroenergy.it/idroenergy_ita/index.htm
- <http://www.isao.bo.cnr.it/~cimone/>
- http://www1.provincia.venezia.it/lartis/EU_citizenship/idrogeno/produzioneidrogeno.htm
- <http://www.trisaia.enea.it/pagine/link12.htm>
- <http://www.ilclima.com/statistica/italia/>
- <http://www.nerl.com>

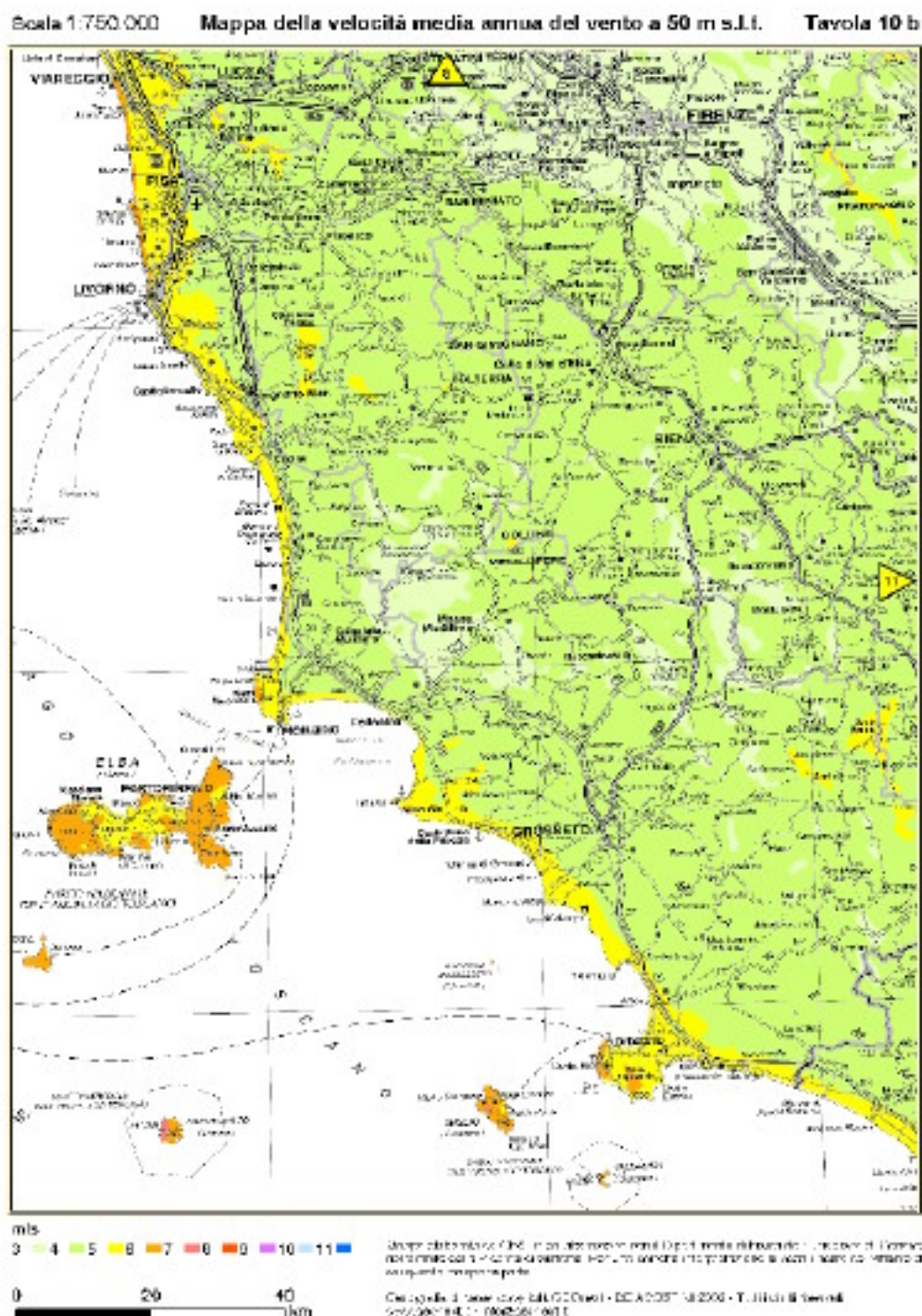
Bibliografia

- <http://www.windside.com/frames.htm>

Mapa complessiva della velocità media annua del vento a 50 m s.l.t.



Bibliografia



5 - Atlante Eolico Italiano: mappa della velocità media annua del vento a 50 m. s.l.t.. sul territorio italiano.

tab. n. 2 – Distribuzione delle frequenze mensili e annuali (velocità del vento in Kn).

- 197 - EL - I -									
ELABORAZIONE DI DATI METEOROLOGICI - COLLABORAZIONE SERVIZIO METEOROLOGICO A.M.-ENEL									
STAZIONE METEOROLOGICA A.M. 197 - ELBA - LAT. 42 44 LONG. 10 24 ALT. 396 M.									
PERIODO DI OSSERVAZIONE DAL 1/1961 AL 12/1977									
PERSISTENZE DELLA DIREZIONE DEL VENTO									
FREQUENZE CUMULATE ANNUALI (%%)									
VELOCITA' MEDIA DEL VENTO PER CIASCUNA PERSISTENZA (NODI)									
S E T T O R I									
ORE DI PERSISTENZA	0 - 1 NODI	335 - 29	NE 25 - 65	E 65 - 115	SE 115 - 155	S 155 - 205	SM 205 - 245	W 245 - 295	NW 295 - 335
3	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
6	650.11	766.70	764.38	646.96	699.62	774.67	495.77	596.97	719.85
9	713.91	591.84	602.24	432.51	480.17	582.89	242.25	415.08	462.50
12	596.81	456.85	460.87	295.45	325.48	444.51	132.39	319.21	304.78
15	479.58	352.14	338.57	218.44	213.91	338.27	68.54	236.23	169.49
18	405.12	282.78	243.20	158.01	167.33	271.18	26.29	168.68	86.76
21	340.26	236.24	185.92	106.98	131.40	18.13	8.58	16.48	9.47
24	285.61	197.95	154.56	73.65	115.10	15.44	0.00	15.83	58.99
27	245.26	152.34	136.61	61.32	92.61	15.17	8.56	24.17	10.75
30	211.75	117.45	106.31	53.27	57.88	108.75	0.00	46.29	12.13
33	164.12	87.80	63.87	44.32	17.70	15.69	0.00	20.33	8.46
MAGG. 33	157.70	70.24	68.44	34.67	40.59	71.01	0.00	21.77	4.41
		13.94	11.90	10.48	2.22	11.88	0.00	21.77	7.08
MASSIMA PERSISTENZA (ORE-NODI)	135.00	90.00	66.00	84.00	48.00	81.00	27.00	42.00	36.00
		18.80	9.32	6.32	19.94	10.41	8.56	25.29	7.08
N. OSSERV. I	8326	4385	3585	2254	3008	3577	1065	1253	2720
FREQUENZE SEMPLICI (%%)	276.17	145.45	118.25	74.10	99.71	118.65	35.33	61.56	90.22

tab. n. 4 – Caratteristiche generali dell'aerogeneratore

CARATTERISTICHE GENERALI		MOLTIPLICATORE DI GIRI	
Numero pale	2	Tipo	epicicloidale, a 2 stadi
Diametro rotore	60 m	Rapporto	1:33
Posizione rotore	sopravvento	SISTEMA DI CONTROLLO	
Altezza al mozzo	66 m	Controller e Acquisizione	
Velocità di rotazione		Dati	intelligenza distribuita
• a coppia nominale	35,5 giri/min.	Unità Centrale (supervisore)	basata su microVAX
• a potenza nominale	44,0 giri/min.	Sistema di attuazione dell'imbardata	idraulico, completamente duplicato
Angolo di cono	3°	Velocità di attuazione	
Angolo di inclinazione	6°	• normale	2°/s
Regolazione di potenza	controllo d'imbardata	• emergenza	8°/s
CARATTERISTICHE OPERATIVE		Sistema frenante	freno a disco sull'albero lento
Velocità del vento al mozzo		Dimensionamento del freno	a piena coppia
• inserimento	5 m/s	GENERATORE ELETTRICO	
• fuori servizio	27 m/s	Tipo	sincrono
• sopravvivenza (non operativo)	64 m/s	Tensione nominale	1,2 kV
Coppia nominale 380 kNm a 12,5 m/s		Potenza nominale	2 MW
Potenza nominale	1.5 MW a 13,5 m/s	Frequenza	variabile
ROTORE		Connessione a rete	tramite convertitore c.a./c.c./c.a. e trasformatore
Pale		TORRE	
Materiale	vetroresina	Tipo	tubolare
Profili	NACA 230XX	Materiale	acciaio CORTEN B
Corda		Diametro	3 m
• estremità	1,06 m	Altezza da terra	61,6 m
• massima	3,82 m		
Mozzo			
Tipo	oscillante		
Materiale	acciaio		
Diametro	2,54 m		

tab. n. 5 – Caratteristiche di funzionamento dell'aerogeneratore

- 197 - C1 - 2 -
 ELABORAZIONE DI DATI METEOROLOGICI - COLLABORAZIONE SERVIZIO METEOROLOGICO A.M.-ENEL
 STAZIONE METEOROLOGICA A.M. 197 - ELBA - LAT. 42 44 LONG. 10 24 ALT. 396 M.

PERIODO DI OSSERVAZIONE DAL 1/1961 AL 12/1977

CLASSI DI STABILITA'
 DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE MENSILI E ANNUALI (%)

CLASSI STABIL.	MESE												INTERO PERIODO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	0.0	2.39	20.69	45.19	87.88	103.48	107.74	103.72	36.23	24.54	0.0	0.0	44.77
B	32.29	38.28	48.28	40.28	130.30	140.44	168.41	128.52	54.87	54.19	32.93	23.45	74.65
C	36.75	39.47	29.56	41.26	71.72	82.37	94.14	51.86	36.23	33.74	26.95	29.31	47.86
D	338.53	412.68	372.41	575.25	224.24	162.62	160.04	225.48	350.93	265.85	351.30	372.80	300.28
E	132.52	117.22	97.54	78.59	86.87	97.15	95.19	105.98	93.17	105.32	122.75	125.44	104.18
F+G	201.56	194.98	198.03	168.96	222.22	244.98	268.83	261.56	227.74	315.95	237.52	225.09	230.65
NEBBIA	258.35	194.98	233.50	250.49	176.77	168.95	105.65	122.89	200.83	200.41	228.54	223.92	197.60
TOTALE	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00	1100.00
N. OSS.	898	836	1015	1018	990	947	956	887	966	978	1002	853	11346

Asinara

dal 1/1951 al
12/1975

Distruzione delle frequenze annuali

Alt. 115 m.

ID 502

				8_12	13_23	24_99
				0,225	0,292	0,187
				10	18	38

[Frame10]



Velocità media Vento =

20,755682 Kn

38,439523 Km/h

10,677645 m/s

Kn

Km/h

m/s

				3,00	5,56	1,54
				6	11,11	3,09
				10	18,52	5,14
				18	33,34	9,26
				38	70,38	19,55

8000 kWh/anno

Parametri calcolo:

Fattore di resa 0,593

Raggio = 30 m.

Denistà aria= 1,225

800 kW

(Aerog. con Pot.za nominale di 1500 kW a 13,5 m/s)

10 ore/g

1600 Nm³/anno

Cagliari Elmas

dal 1/1951 al 12/1977

Distruzione delle frequenze annuali

Alt.4 m.

ID 560

8_12

0,224

10

13_23

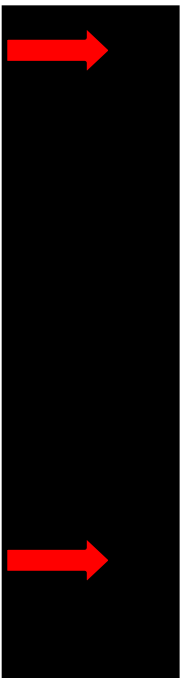
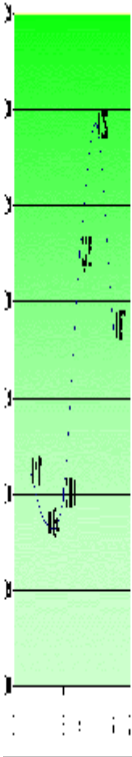
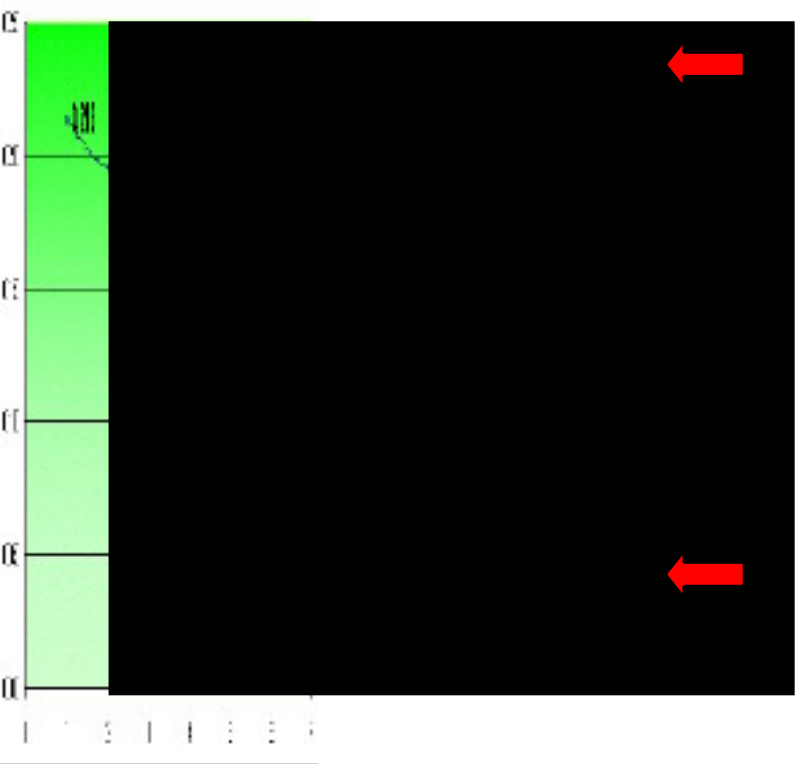
0,149

18

24_99

0,073

32



Velocità media Vento =

16,273543 Kn

30,138601 Km/h

8,3718336 m/s

Kn

Km/h

m/s

3,00

6

10

18

38

5,56

11,11

18,52

33,34

70,38

1,54

3,09

5,14

9,26

19,55

5300 kWh/anno

Parametri calcolo:

Fattore di resa 0,593

Raggio = 30 m.

Denistà aria= 1,225

500 kW

(Aerog. con Pot.za nominale di 1500 kW a 13,5 m/s)

Allegati

10,6 ore/g

1060 Nm³/anno

Elba

dal 1/1961 al 12/1977

Distruzione delle frequenze annuali

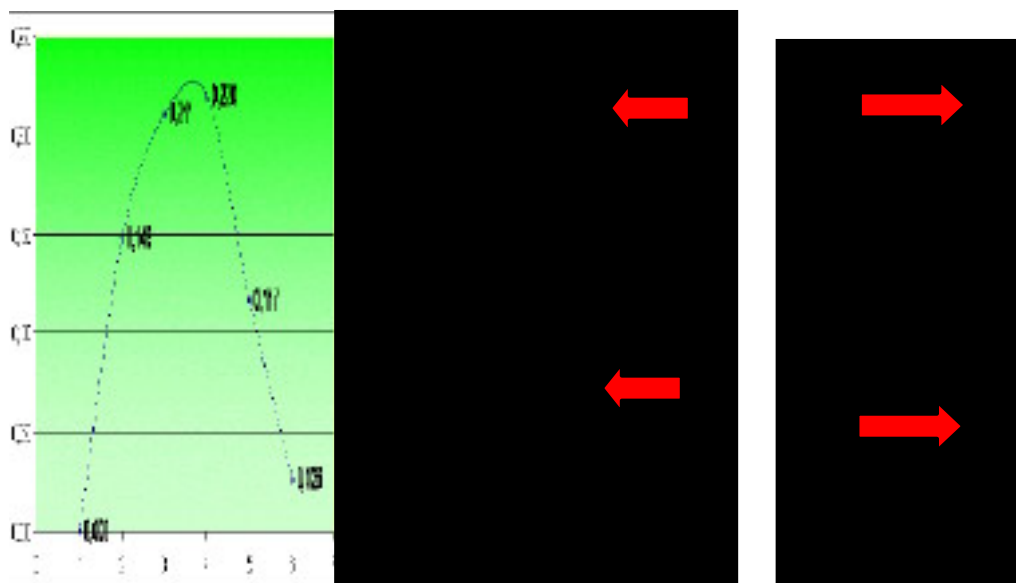
Alt.396

m.

ID 197

				8_12	13_23	24_99
				0,220	0,117	0,026
				10	18	38

[Frame12]



Velocità media Vento =

14,584022 Kn

27,009609 Km/h

7,5026691 m/s

Kn

Km/h

m/s

				3,00	5,56	1,54
				6	11,11	3,09
				10	18,52	5,14
				18	33,34	9,26
				38	70,38	19,55

2280 kWh/anno

Parametri calcolo:

Fattore di resa 0,593

Raggio = 30 m.

Denistà aria= 1,225

300 kW

(Aerog. con Pot.za nominale di 1500 kW a 13,5 m/s)

7,6 ore/g

456 Nm³/anno

Palermo Punta Raisi

dal 1/1960 al 12/1977

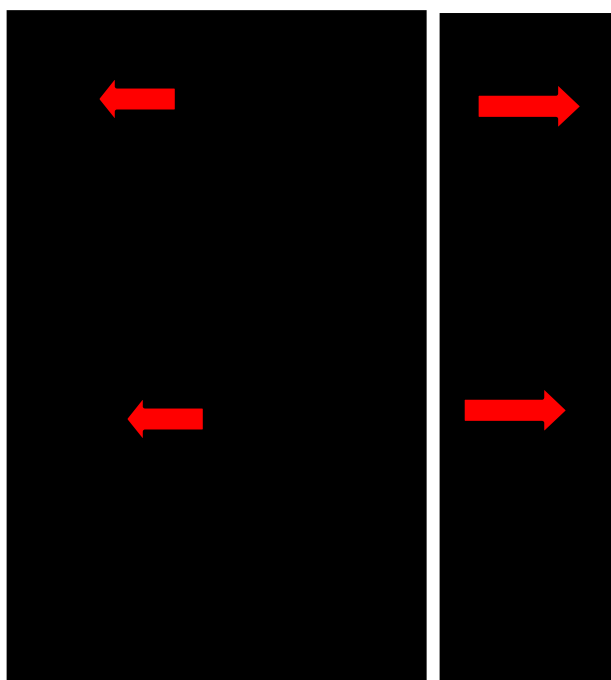
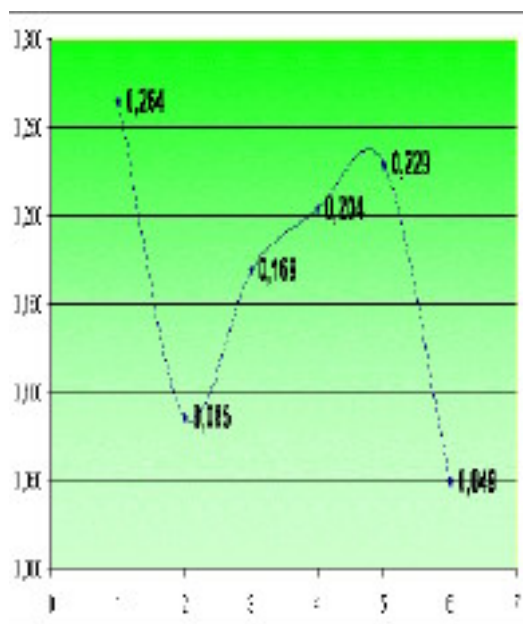
Distribuzione delle frequenze annuali

Alt. 405

ID 405

	8_12	13_23	24_99
	0,204	0,229	0,049
	10	18	38

[Frame13]



Velocità media Vento =

16,647303 Kn

30,830805 Km/h

8,5641125 m/s

Kn

Km/h

m/s

	3,00	5,56	1,54
	6	11,11	3,09
	10	18,52	5,14
	18	33,34	9,26
	38	70,38	19,55

4720 kWh/anno

Parametri calcolo:

Fattore di resa 0,593

Raggio = 30 m.

Densità aria= 1,225

400 kW

11,8 ore/g

(Aerog. con Pot.za nominale di 1500 kW a 13,5 m/s)

944 Nm³/anno

Monte Argentario

dal 1/1961 al 12/1977

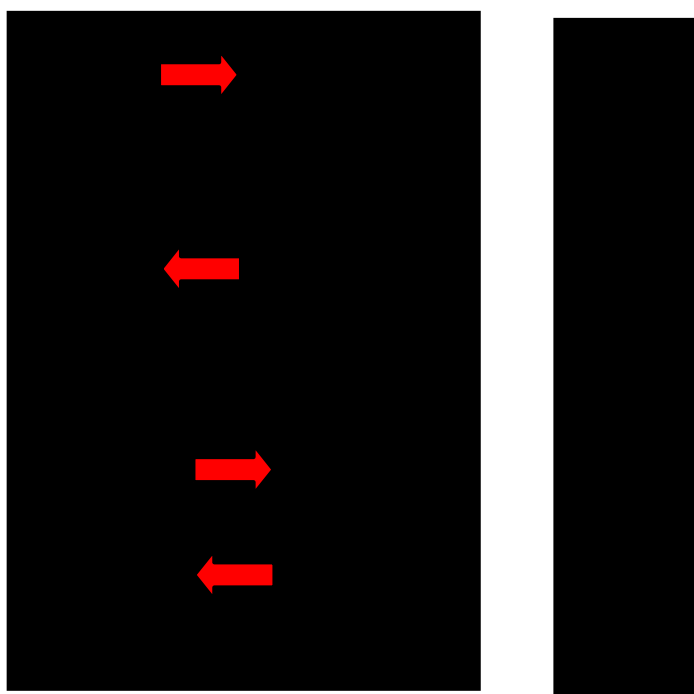
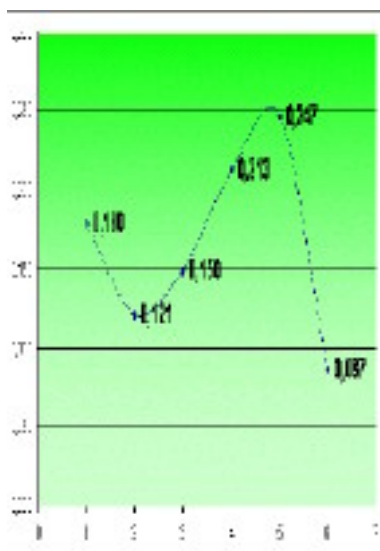
Distribuzione delle frequenze annuali

Alt. 631 m.

ID 168

		8_12	13_23	24_99
		0,213	0,247	0,087
		10	18	38

[Frame14]



Velocità media Vento =

18,065814 Kn
33,457887 Km/h

Kn Km/h m/s

		9,2938574 m/s	3,00	5,56	1,54
			6	11,11	3,09
			10	18,52	5,14
			18	33,34	9,26
			38	70,38	19,55

5900 kWh/anno

Parametri calcolo:

Fattore di resa 0,593
Raggio = 30 m.
Densità aria= 1,225

500 kW
11,8 ore/g

(Aerog. con Pot.za nominale di 1500 kW a 13,5 m/s)

1180 Nm³/anno

Tabelle riassuntive Produzione

Sito	ID	Pot.(vm) kW	Vm	Ore funz.	En.Prod.	Nm ² H ₂ /anno
		800			8000	1600
		500			5300	1060
		300			2280	456
		400			4720	944
		500			5900	1416

[Fram
e16

