

F. RAPETTI, S. VITTORINI (*)

L'UTILIZZAZIONE DEL VENTO A LIVORNO COME FONTE ENERGETICA INTEGRATIVA

Riassunto — Solo dopo il recente e continuo aumento del prezzo del petrolio e nella prospettiva di un rapido esaurimento delle scorte di questo minerale, l'attenzione di alcuni economisti e tecnici si è rivolta allo sfruttamento dell'energia eolica, se non altro come fonte energetica integrativa.

In questo contesto sono stati analizzati i dati del vento della stazione anemometrica dell'Accademia Navale di Livorno, per il periodo 1976-1980, ed è stata calcolata l'energia teorica del vento, espressa in kWh/m²/anno, in funzione del cubo della velocità media annua del vento. Si è stimato, in base a dati sperimentali, che l'energia eolica è maggiore sui Monti livornesi che non a livello del mare.

Usando formule note, è stata calcolata l'energia elettrica eolica ricavabile da aerogeneratori aventi rotori di diverso diametro e si è stimato che è possibile installare sui monti livornesi un numero di aerogeneratori, aventi una data potenza, capaci di produrre una quantità di energia elettrica sufficiente a soddisfare i bisogni energetici di almeno 125.000 abitanti.

Summary — *Wind as an Additional Source of Energy; a study about Livorno.* It is only the recent upsurge of oil prices and future prospects of the drying up of oil wells that has drawn our attention to aeolian energy, at least as an additional source of energy.

Data obtained from wind station of Accademia Navale of Leghorn, for the period 1976-1980, are analyzed and the theoretical wind energy, expressed in kWh/m²/year, is calculated for the cubic annual velocity of wind. For mountain locality round the town of Leghorn a greater energy is estimated.

Using well known formulas, an attempt is then made to calculate the anemometric energy that can be given off by wind engines with rotors of different diameters; lastly an estimate is made of the number of wind generators, of a given power, needed to supply an annual quantity of electric power sufficient for 125000 townsmen.

Key words — Aeolic energy, Tuscany.

(*) Istituto di Scienze Geografiche dell'Università di Pisa.

PREMESSA

Nell'ambito delle ricerche di nuove fonti energetiche alternative al petrolio, l'interesse per lo sfruttamento dell'energia eolica è aumentato considerevolmente in questi ultimi anni, com'è confermato dal recente impegno in questo campo che numerosi paesi europei ed extraeuropei hanno assunto, sia come mole di ricerche applicative svolte, sia come volume di capitali impiegati. Per citare qualche caso concreto è sufficiente ricordare il progetto dell'ERDA, svolto in collaborazione con la NASA, per la costruzione di un megageneratore eolico della potenza nominale di 2,5 MW, per il quale, a suo tempo, furono stanziati dieci milioni di dollari, oppure l'iniziativa del Ministero delle Ricerche e della Tecnologia della Germania Federale che ha commissionato alla MAN la realizzazione di un motore eolico della potenza di 2-3 MW. Infine si ricorda anche l'iniziativa per la costruzione di un aeromotore della potenza nominale di 3,7 MW, assunta dal Ministero dell'Energia britannico, che ha stanziato allo scopo due milioni di sterline (dati 1977).

Anche in Italia, sia pure in ritardo rispetto agli altri paesi ad elevato sviluppo industriale, sono in atto ricerche e realizzazioni promosse principalmente dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, dal Centro Ricerche FIAT e dall'ENEL. Nell'ambito del progetto VELE (vento per l'elettricità) infatti, condotto dall'ENEL, in collaborazione con l'industria nazionale, si prevede la realizzazione in Sardegna di una centrale di circa 500 kW, costituita da una selva di aerogeneratori della potenza unitaria di 50 kW, e lo studio e la realizzazione di un aeromotore dell'ordine di 1-3 MW di potenza.

Non è tuttavia da sottovalutare l'attività di promozione svolta in questo campo da alcune regioni, provincie e comuni italiani; ricordiamo ad esempio che in Abruzzo l'iniziativa di sfruttare il vento come fonte di energia è partita dall'Amministrazione Comunale dell'Aquila. Infatti, con il contributo di tale Amministrazione, verranno sperimentati sul Gran Sasso impianti progettati dal C.N.R., dall'Università dell'Aquila e da alcuni gruppi privati.

La regione italiana infatti, contrariamente a quanto viene spesso ritenuto, è interessata in tutto il corso dell'anno dai venti della circolazione generale e da vigorose brezze locali che determinano, in numerosissimi luoghi, condizioni favorevoli allo sfruttamento

dell'energia eolica. Sui Monti livornesi tali condizioni sono presenti in maniera non trascurabile poiché tali rilievi sono battuti da venti di velocità e di frequenza notoriamente elevate ed inoltre, essendo privi di vegetazione d'alto fusto, di colture e di insediamenti, bene si prestano all'installazione di aerogeneratori anche di notevoli dimensioni.

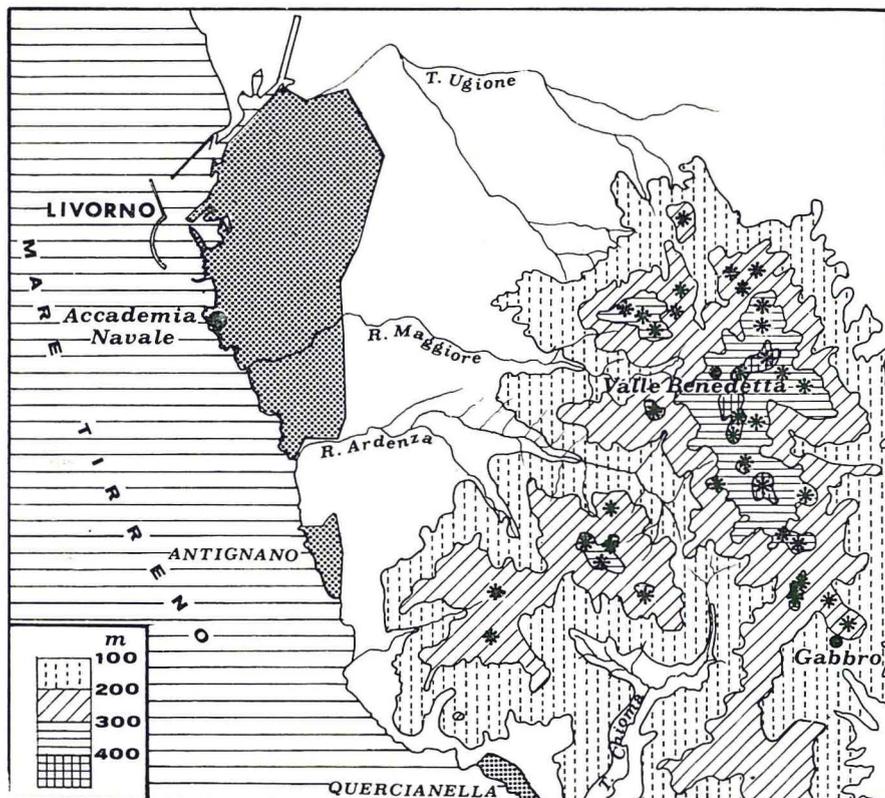


Fig. 1 - I Monti livornesi con l'indicazione di alcuni siti idonei all'installazione di aerogeneratori (asterischi).

Scopo del presente studio è quello di eseguire una stima della energia potenziale ricavabile dal vento in alcuni siti dei Monti livornesi e di calcolare l'energia elettrica producibile da un determinato numero di aerogeneratori aventi il rotore di diverso diametro.

Andamento del vento a Livorno dal 1857 ad oggi

Purtroppo non sono stati mai raccolti dati anemometrici relativi ai Monti livornesi, per cui la nostra ricerca si basa sulle osservazioni registrate dall'Osservatorio Meteorologico Comunale e da quelle dell'Osservatore Meteorologico dell'Accademia Navale.

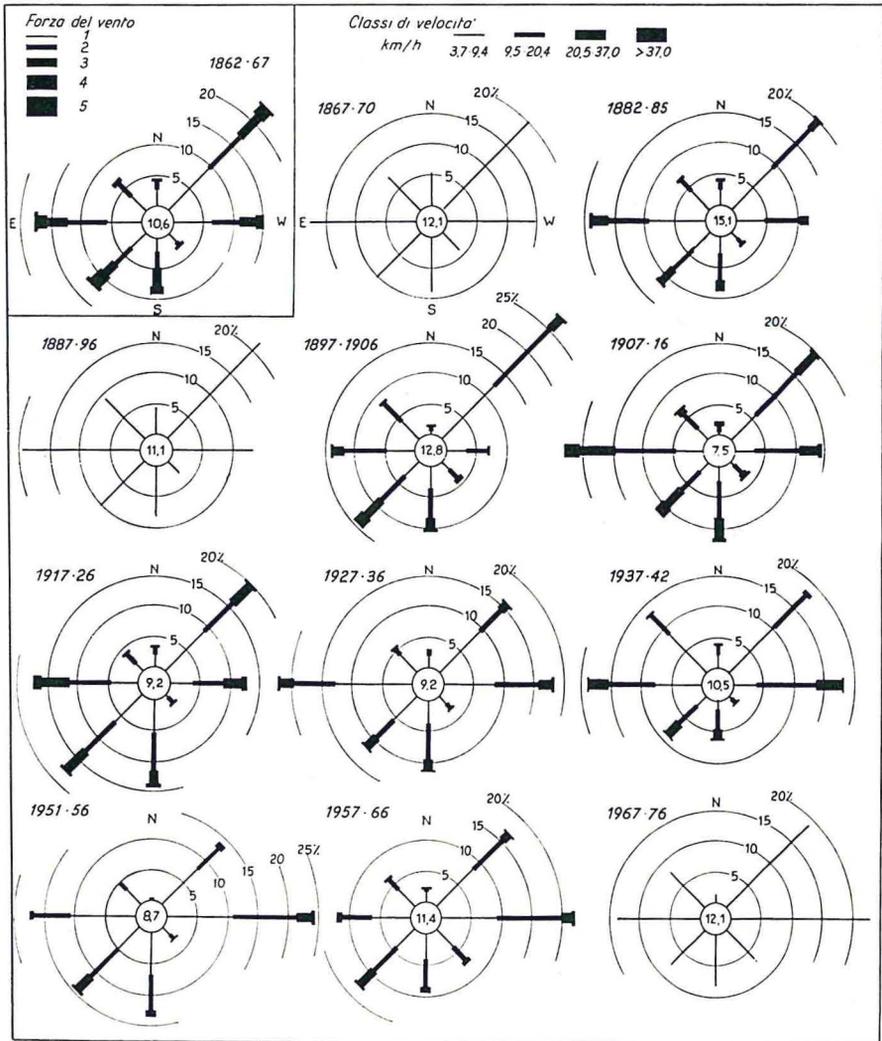


Fig. 2 - Distribuzione media annua, per decenni, dei venti a Livorno, per classi di velocità (in percentuale); i valori segnati al centro si riferiscono alle calme. Qualche diagramma indica solo la frequenza dei venti poiché, per il periodo relativo, mancavano i dati della velocità.

L'Osservatorio Meteorologico di Livorno ha iniziato i suoi rilievi nel 1856, raccogliendo una serie preziosa quasi ininterrotta di dati meteorologici, tra cui quelli del vento. Recentemente tali dati sono stati elaborati (MEINI, MUCCI e VITTORINI, 1980) e in questa sede riportiamo succintamente alcuni dei risultati a cui si è giunti.

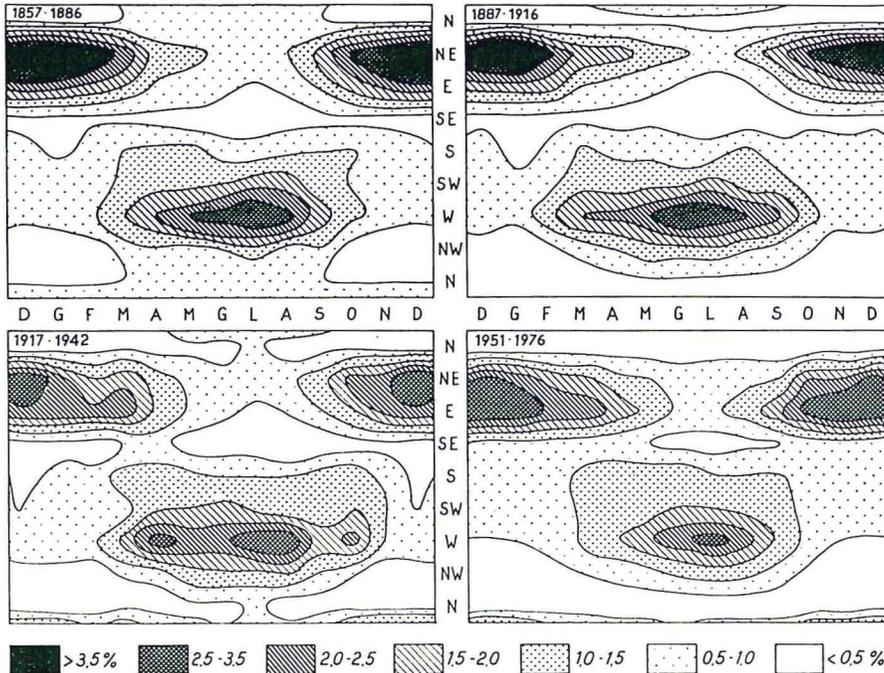


Fig. 3 - Il regime dei venti a Livorno. Il periodo considerato (1857-1976) è stato suddiviso in quattro trentenni per mettere meglio in evidenza le variazioni che si sono verificate.

A Livorno, dall'inizio delle osservazioni fino agli anni '20, il vento regnante è risultato essere il NE; da quell'epoca in poi ha preso sempre maggiore consistenza il vento da E, che fino al '76 è stato il vento regnante (Fig. 2). Nei 120 anni presi in considerazione i venti più veloci sono risultati quelli del III quadrante, pur essendosi verificato, nel corso del periodo, uno scambio di ruolo, per quanto riguarda la dominanza tra l'W e il SW; attualmente il vento dominante è chiaramente il SW, così co-

me risulta anche da una precedente ricerca (RAPETTI e VITTORINI, 1974). Pure per quanto riguarda il regime dei venti si è registrata una certa variabilità. Infatti la caratteristica principale del regime del vento a Livorno è consistita, fino agli anni '20, dalla netta distinzione tra i venti del I quadrante, spiranti nel semestre freddo, e quelli del III quadrante propri del semestre caldo. Negli anni seguenti la polarizzazione stagionale si è andata progressivamente attenuando; oggi infatti si osserva una sensibile riduzione percentuale dei venti del III quadrante i quali spirano solo nei mesi centrali del semestre caldo (Fig. 3).

La forza del vento

Per sviluppare questo paragrafo abbiamo utilizzato i dati anemometrici dell'Osservatorio dell'Accademia Navale di Livorno, relativi al quinquennio 1976-'80; periodo non lungo, ma sufficiente ad offrire un quadro indicativo della ventosità della zona. I risultati della tabella 1 e la fig. 4 si riferiscono all'elaborazione di un campione di tre osservazioni giornaliere (ore 8.00, 14.00 e 19.00) del quinquennio considerato.

TAB. 1 - Valori medi mensili ed annui della velocità media normale del vento (V_m), della velocità massima (V_{max}), espresse in m/s, e delle calme (¹).

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
V_m	6,1	7,7	6,0	6,8	5,2	5,2	4,7	6,0	5,1	4,7	7,6	6,0	5,9
V_{max}	26,4	28,9	28,9	25,0	18,1	19,4	27,8	21,9	21,1	19,4	30,0	25,0	24,3
Calme ($V < 3$ m/s)	17,9	22,5	22,6	26,9	35,9	33,3	33,0	28,4	30,7	27,6	22,7	18,9	26,7

Il regime annuo della velocità è caratterizzato da due massimi, di cui quello principale si verifica a febbraio (7,7 m/s) e il secondario a novembre (7,6 m/s); analogamente si verificano due minimi di pari valore (4,7 m/s) di cui uno a luglio e l'altro a ottobre. In linea di massima i venti più veloci si registrano nel semestre freddo, da novembre ad aprile, quando la velocità media è di 6,7 m/s; quella dei venti del semestre caldo è invece di 5,1 m/s. Analizzando la velocità del vento nel corso della giornata risulta che il minimo si verifica alle ore 8.00 e il massimo alle ore 14.00.

La velocità alle ore 19.00 è mediamente compresa fra queste due. Tuttavia vi sono alcuni mesi dell'anno in cui la velocità massima si registra alle ore 19.00, come ad esempio a novembre e a marzo. Per completare questa analisi si fa notare che la velocità media massima, nell'ambito del giorno medio, è di 8,5 m/s e si verifica alle ore 14.00 del mese di febbraio; la minima si registra invece alle ore 8.00 di settembre, con 3,9 m/s.

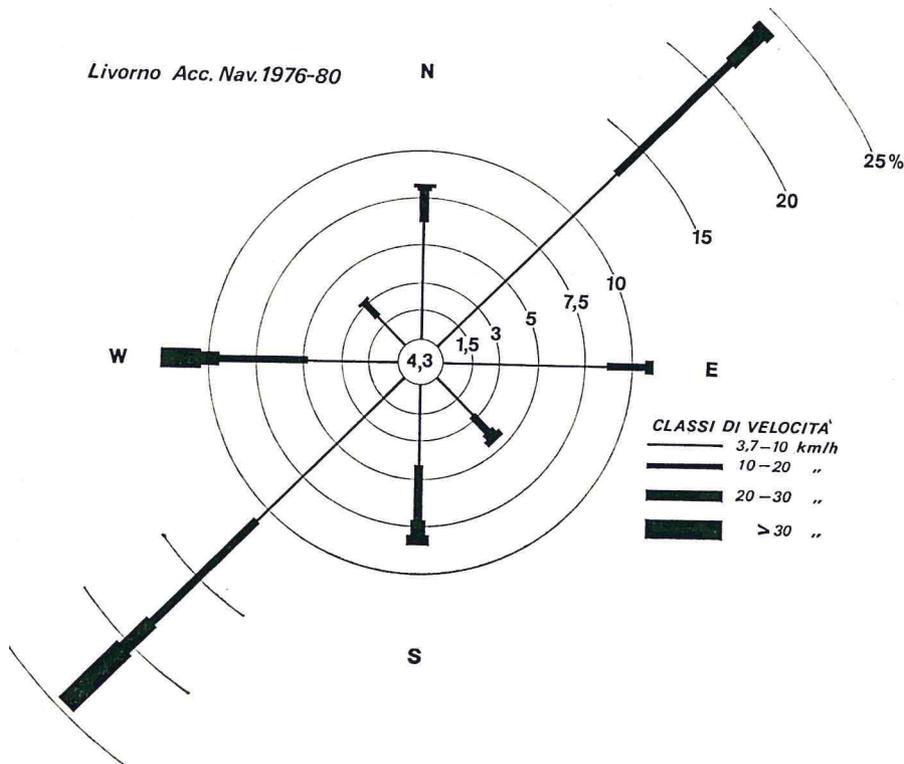


Fig. 4 - Distribuzione annua del vento, per classi di velocità (in percento). I valori segnati al centro si riferiscono alle calme.

Per quanto riguarda le calme (¹⁾), dalla tabella 1 risulta che mediamente a Livorno si registra il 26,7% di calme di vento sul

(¹) In questo paragrafo le calme non vengono stimate secondo il criterio in uso nella climatologia, in cui si considerano calme i venti con velocità minore a due nodi, pari a circa 1 m/s. Le calme da noi considerate si riferiscono invece a venti con velocità inferiore a 3 m/s, velocità che, in genere, viene considerata la minima necessaria per ottenere da un aerogeneratore una quantità di energia apprezzabile.

totale delle osservazioni anemometriche annuali, con massimi da maggio a luglio (35,9; 33,3; 33,0%) e minimi a dicembre e gennaio (rispettivamente 18,9 e 17,9% delle frequenze).

Energia del vento

L'energia cinetica del vento è esprimibile con la relazione $E = 1/2 m v^2$, dove m è la massa dell'aria, e v è la velocità, mentre la potenza del moto dell'atmosfera è notoriamente uguale all'energia nell'unità di tempo. Infatti se con $A v$ indichiamo il volume d'aria passante attraverso la superficie A nell'unità di tempo e con ρ la densità dell'aria, si ottiene che la potenza è esprimibile con la relazione:

$$P = 1/2 \rho A v v^2 = 1/2 \rho A v^3 \quad [1]$$

che è proporzionale al cubo della velocità del vento. Nelle condizioni naturali tuttavia il flusso dell'aria ha velocità variabile, per cui la potenza di un aeromotore è proporzionale al cubo della « velocità media cubica » (e non al cubo della velocità media normale) che si ottiene dalla seguente espressione ricavata da uno studio condotto dall'Ufficio Ricerche FIAT, in collaborazione con il C.N.R., nell'ambito del Progetto Finalizzato « Energetica »:

$$v_{mc} = \frac{1}{T} \int_0^T v^3 dt \quad [2]$$

In ogni caso non esiste una relazione matematica diretta che esprima l'energia producibile dal vento partendo dalle « velocità medie ».

A questo proposito, alcuni ricercatori francesi hanno messo a punto un'utile relazione empirica che consente di determinare in modo speditivo la potenzialità eolica di un sito conoscendo soltanto la velocità media annua del vento:

$$E = 6,5 v_m^3 \quad [3]$$

dove l'energia E risulta espressa in kWh per ogni m^2 di superficie esposta normalmente al vento e per anno e la velocità del vento v in m/s.

In un lavoro precedente anche noi abbiamo utilizzato tale relazione per stimare l'energia eolica potenziale in 143 stazioni anemometriche italiane del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica (RAPETTI e VITTORINI, 1979), trovando una buona concordanza tra i valori calcolati e quelli che risultano dal già citato rapporto FIAT.

Per Livorno, tenendo conto che la velocità media annua del vento (computando solo le velocità superiori a 3 m/s) è di 5,9 m/s, il valore che risulta risolvendo la relazione [3] è pari a 980 kWh/m²/anno. Tale valore non è molto elevato, ma si inserisce tuttavia tra quelli delle prime 37 stazioni anemometriche italiane sulle 143 considerate.

Possibilità di sfruttamento del vento sui Monti livornesi

I Monti livornesi sono interessati da una ventosità superiore a quella di Livorno, com'è confermato dai risultati di alcuni rilievi anemometrici effettuati sui monti della città, in località Valle Benedetta, messi a confronto con i dati del vento rilevati all'Accademia Navale alla stessa ora ⁽²⁾. Infatti, nella tabella 2, in cui sono

TAB. 2 - Confronto fra le velocità del vento (m/s) registrate all'Accademia Navale e alla Valle Benedetta.

Tipi di vento	Accademia Navale		Valle Benedetta		
	al suolo	a 20 m	al suolo	a 7 m	a 10 m
Brezza di mare	7,8	5,2	2,7	4,3	5,0
Libeccio	9,8	10,0	7,8	12,7	14,5
Levante	3,5	4,2	4,2	6,2	7,1

riportati tre casi che si riferiscono a tre situazioni tipiche di vento, si può osservare che, eccetto il caso delle brezze di mare, in cui non esistono grosse differenze tra i dati registrati nelle due stazioni ⁽³⁾, durante il Libeccio si nota invece una velocità del vento sensibilmente maggiore alla Valle Benedetta. Però la differenza più accentuata fra i due siti si osserva con i venti di terra (I e II qua-

⁽²⁾ E' opportuno precisare che i dati dell'Accademia Navale si riferiscono ad un anemografo posto a circa 20 m dal suolo.

⁽³⁾ Ciò può attribuirsi al fatto che le brezze hanno un basso gradiente altimetrico della velocità che diminuisce con l'altitudine e si annulla intorno agli 800 m.

drante), che soffiano molto più veloci sui rilievi che circondano Livorno e giungono invece smorzati al mare. Di questo bisogna tener conto perché la frequenza dei venti di terra a Livorno è circa la metà di quelli di mare e dunque la velocità media annua del vento è sicuramente maggiore sui Monti livornesi, così come risulta superiore il gradiente altimetrico della velocità del vento, come si può notare dalla tab. 2 e dalla fig. 5.

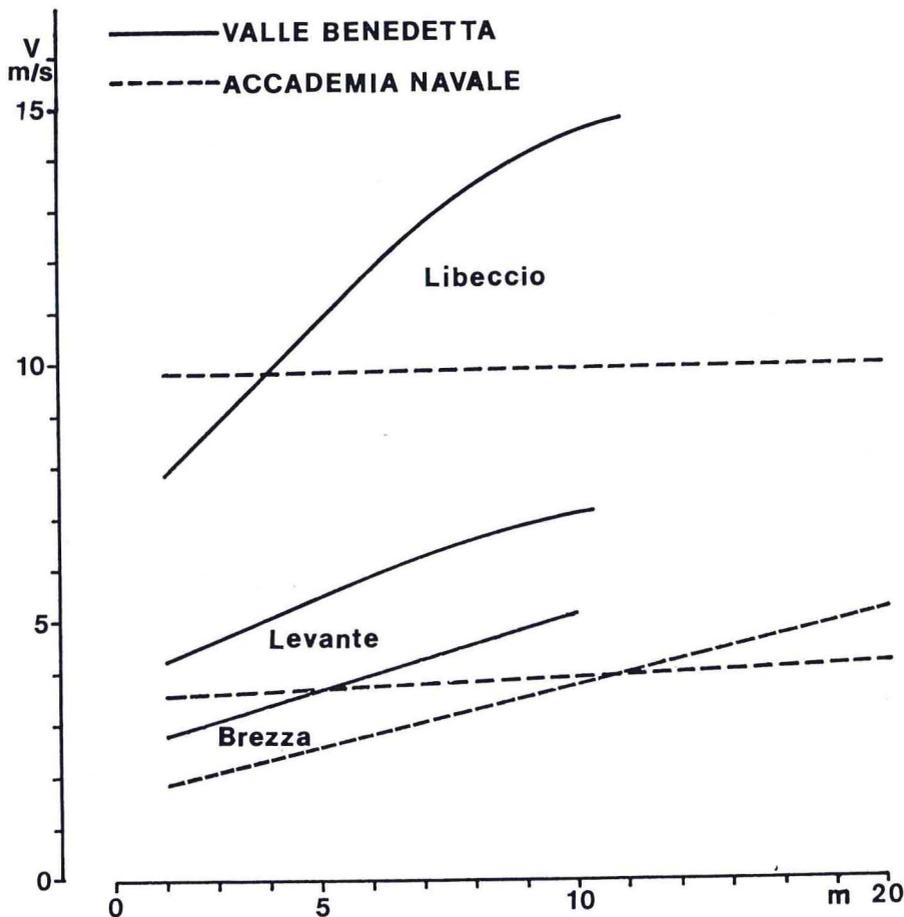


Fig. 5 - Andamento del gradiente altimetrico della velocità del vento in tre situazioni tipiche (brezza, Levante e Libeccio) all'Accademia Navale e alla Valle Benedetta. Sulle ordinate è indicata la velocità del vento; sulle ascisse l'altezza dal suolo alla quale sono state eseguite le misure.

*Ipotesi sulla quantità di energia anemometrica ricavabile:
alcuni casi pratici*

E' noto che la potenza massima che teoricamente si può ottenere da un aeromotore avente il rotore di diametro D , investito da una corrente d'aria animata da una velocità v si può esprimere con la relazione (BETZ, 1926):

$$P_{\max} = 0,000285 \cdot v^3 \cdot D^2 \quad (\text{kW}) \quad [4]$$

In pratica però la potenza utile è sempre minore di quella massima a causa del rendimento complessivo della macchina, che varia tra 0,44 e 0,65 della potenza massima.

Per determinare l'energia annua ricavabile da aeromotori aventi il rotore di un determinato diametro, si utilizza la relazione (VEZZANI, 1950):

$$E = \frac{d \cdot P_u \cdot 9,8}{3,6 \cdot 10^5} \quad (\text{kWh/anno}) \quad [5]$$

in cui $P_u = 0,02 : D^2 : v^3$ (potenza utile dell'aerogeneratore); d = durata in secondi del vento per ogni classe di velocità in un anno. Applicando la relazione [5] per ciascuna classe di velocità e sommando si ottiene l'energia elettrica teorica annua producibile da un aerogeneratore avente il rotore di diametro D . Per effettuare la stima dell'energia ottenibile da un aerogeneratore abbiamo suddiviso le osservazioni anemometriche medie annue in cinque classi utili di velocità, comprese fra 3 e 25 m/s, scartando da un lato i venti troppo deboli e dall'altro quelli con velocità troppo alta per la stabilità della macchina (*).

TAB. 3 - Quantità teorica di energia anemoelettrica, espressa in kWh/anno, ottenibile da aerogeneratori aventi rotori di diverso diametro, nel campo di velocità del vento compreso fra 3 e 25 m/s.

Energia	Diametro del rotore			
	10 m	20 m	30 m	50 m
kWh/anno	88.451	354.983	798.712	2.210.594

(* In effetti però ciascun aerogeneratore, in relazione alle caratteristiche costruttive, ha una curva propria di massimo coefficiente di potenza per un determi-

Mentre la tab. 3 indica l'energia elettrica teorica producibile da ogni singolo aerogeneratore, è opportuno stimare l'energia che si potrebbe produrre collocando un conveniente numero di macchine sulle sommità più rilevanti dei Monti livornesi. La Fig. 1 indica alcune di queste località, senza escludere che, ad un esame più accurato, se ne possono individuare numerose altre. Da un sommario esame risultano idonei almeno 37 siti, come ad esempio Poggio dei Tre Molini (il toponimo indica appunto che un tempo quivi erano installati tre molini a vento), Montemaggiore, Poggio alle Fate, ecc., la cui altitudine oscilla tra i 270 e i 450 m s.m.

Nella ipotesi di installare un solo aerogeneratore per ciascuno di questi 37 siti, si può stimare l'energia elettrica teorica globalmente producibile, come risulta dalla tab. 4, in cui sono considerati i casi di aerogeneratori con rotore da 10, 20, 30 e 50 m di diametro.

TAB. 4 - Quantità teorica di energia anemoelettrica, espressa in kWh/anno, ottenibile con 37 aerogeneratori; alcuni casi con rotori di diverso diametro.

Energia	Diametro del rotore			
	10 m	20 m	30 m	50 m
kWh/anno	3.272.687	13.134.371	29.552.344	81.791.978

Si tratta, come si può osservare, di rilevanti quantità di energia elettrica, facendo notare, nei limiti di validità del campione di osservazioni anemometriche assunto per quest'indagine, che le quantità riportate sono quelle ottenibili nelle 4257 ore in media all'anno (il 49% delle ore annue) in cui il vento raggiunge una velocità « utile ».

Com'è noto, una delle principali obiezioni che si avanzano nei riguardi della praticità e della convenienza dello sfruttamento dell'energia eolica riguarda l'incostanza del vento. Tuttavia la tecnologia moderna è in grado di rimediare a tale inconveniente in vari

nato valore della velocità del vento, mentre per valori maggiori o minori della velocità il coefficiente di potenza cala più o meno rapidamente. Per questo motivo si progettano aerogeneratori di caratteristiche tali da potersi adattare alle varie condizioni anemometriche che sono diverse da un luogo all'altro.

modi; uno di questi consiste nell'immettere direttamente nella rete di distribuzione l'energia elettrica prodotta. In altri casi si può utilizzare l'elettricità per l'elettrolisi dell'acqua onde ottenere idrogeno che, come si sa, è un ottimo combustibile.

Considerazioni finali

Nell'ultimo paragrafo è stata stimata l'energia teorica producibile da 37 aerogeneratori installati in varie località dei Monti livornesi. Tuttavia, come si è ripetuto più volte, le stime sono state fatte sulla base dei dati anemometrici dell'Accademia Navale; le valutazioni precedenti pertanto risultano in difetto, dato che sui Monti livornesi il vento è mediamente più veloce. A nostro parere la velocità del vento in questi luoghi dovrebbe essere di circa 1,3 volte superiore a quella registrata all'Accademia Navale, cui corrisponderebbe un incremento di energia di circa il doppio, essendo questa proporzionale al cubo della velocità del vento. Sempre secondo le nostre osservazioni anche la durata del vento « utile » è superiore ed in specie quella dei venti di terra. Inoltre aggiungiamo anche che il gradiente altimetrico della velocità del vento sui Monti livornesi è di gran lunga più elevato di quello al livello del mare, come si può osservare dalla figura 3.

Dall'analisi svolta emergono le seguenti considerazioni:

a) l'energia elettrica teorica producibile con i 37 aeromotori aventi il rotore di 50 m di diametro, che ammonterebbe, come abbiamo visto, a circa 82.000.000 di kWh/anno, stimando un consumo pro capite di 650 kWh/anno, valore medio per la Toscana (ISTAT, 1978), sarebbe sufficiente a soddisfare i bisogni domestici di elettricità di circa 126.000 persone;

b) anche se, allo stato attuale della tecnologia e della produzione, l'uso di aerogeneratori può sembrare antieconomico, bisogna tener conto del fatto che il prezzo mondiale del petrolio aumenta a ritmi sempre crescenti e che la disponibilità di questo combustibile sul mercato internazionale, nei prossimi anni, è destinato a ridursi in modo considerevole.

Pertanto, se investire capitali nel settore dell'energia eolica richiede oggi un po' di coraggio ed il superamento della concezione consumistica nel campo dello sfruttamento delle risorse del nostro Pianeta e dei preconcetti assai diffusi sulle fonti energetiche « dol-

ci », in un prossimo futuro la scelta del vento come fonte integrativa di energia potrebbe rivelarsi invece adeguata alle diverse condizioni che si verranno a determinare nel campo dell'approvvigionamento energetico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BETZ A. (1926) - Windenergie und ihre Ausnutzung in Windmülen. Gottinga.
- CAILLEUX A. (1965) - L'énergie éolienne en France et dans le monde. *Ann. Géogr.*, **74**, 257-270.
- CENTRO RICERCHE FIAT, PROGETTO FINALIZZATO ENERGETICA C.N.R. - Rapporto dell'attività FIAT sui generatori eolici (1976-1977). Dattiloscritto non pubblicato.
- ISTITUTO CENTRALE DI STATISTICA (1978) - Annuario Statistico Italiano. Roma.
- ELECTRICITÉ DE FRANCE (1953) - Determination de l'énergie du vent en de nombreux points du territoire de la France. *Ann. Sci. Univ. de Besançon, Ser. Climatologie*, **69**, 20-23.
- MEINI L., MUCCI G., VITTORINI S. (1979) - Ricerche meteomarine sul litorale toscano: 120 anni di osservazioni meteorologiche a Livorno (1857-1976). *Boll. Soc. Geogr. Ital.*, Ser. X, **8**, 449-474.
- NERLI N. (1977) - Corso di macchine, Vol. II. Editrice Tecnico Scientifica, Pisa, 75-105.
- RAPETTI E., VITTORINI S. (1974) - Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del delta dell'Arno. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem.*, Ser. A, **81**, 25-88.
- RAPETTI E., VITTORINI S. (1979) - Il vento come fonte di energia integrativa in Italia. *Riv. Geogr. Ital.*, **86**, 480-502.
- SECTOROW W.R. (1934) - Il primo impianto elettrico trifase aerodinamico a Balaklaw. *L'Elettrotecnica*, **21**, 538-542.
- SERRA A., BARCA S., SOLLAI A., PIRAS G. F. (1979) - Individuazione di aree atte all'inse-diamento di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili (eolica e solare) nell'isola di Sardegna. *Atti Conv. di Meteorol. Appenninica*, Reggio Emilia, in corso di stampa.
- VEZZANI R. (1950) - Un impianto aereolettrico pilota di media potenza con accumulo idrico di pompaggio. *L'Elettrotecnica*, **37**, 398-419.

(ms. pres. il 16 dicembre 1980; ult. bozze il 19 marzo 1981)