

Esperienza 7

Energia eolica

Obiettivi - Comprendere il significato e l'origine dell'energia eolica.

Concetti - Leggi di Bernoulli; flusso.

Materiali e Strumenti - ...

7.1 Cenni teorici

Per poter capire meglio il processo di generazione di energia da parte del vento, bisogna fare qualche considerazione. Supponiamo di avere un tubo di flusso all'interno del quale vi è una pala eolica (o rotore), come mostrato in Figura 7.1. Applicando l'equazione di Bernoulli in due sezioni del tubo di flusso in assenza del rotore e considerando l'aria come un fluido ideale, si ha

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2, \quad (7.1)$$

dove p_1 , v_1 e h_1 sono rispettivamente la pressione, la velocità e l'altezza del fluido in corrispondenza della sezione davanti al rotore; p_2 , v_2 e h_2 sono rispettivamente la pressione, la velocità e l'altezza del fluido in corrispondenza della sezione alle spalle del rotore; $\rho = m/V$ è la densità dell'aria¹ e g è l'accelerazione di gravità. In presenza del rotore, parte dell'energia cinetica del vento viene estratta dal rotore. Indicando con $\kappa = K/V$ l'energia cinetica per unità di volume che si può estrarre dal flusso di aria, l'equazione di Bernoulli, Eq. (7.1), diviene

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 + \kappa. \quad (7.2)$$

¹La densità dell'aria alla pressione atmosferica e alla temperatura di 20°C è $\rho \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ (la densità dell'acqua è $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$).

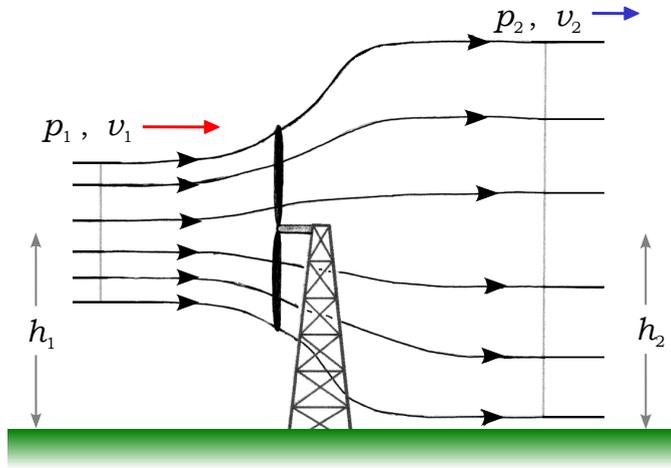


Figura 7.1: Tubo di flusso dell'aria che incide sulle pale del rotore; $v_1 > v_2$.

Poiché $p_1 = p_2 = p_0$ (p_0 è la pressione atmosferica) e $h_1 = h_2$, l'Eq. (7.2) può essere quindi semplificata, ottenendo l'energia per unità di volume che si può estrarre dal flusso di aria

$$\kappa = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \frac{m}{V} (v_1^2 - v_2^2). \quad (7.3)$$

In presenza del rotore, parte dell'energia cinetica del vento viene estratta dal rotore e convertita successivamente in energia elettrica. La potenza P estratta dal rotore è data dal prodotto dell'energia cinetica per unità di volume κ e il volume di aria che attraversa il rotore nell'unità di tempo Sv , cioè il prodotto della velocità dell'aria v in corrispondenza del rotore e la sezione S del tubo di flusso di diametro uguale alle dimensioni della pala eolica (sezione spazzata dal rotore). Quindi, si ha

$$P = \kappa Sv = \frac{1}{2} \rho Sv (v_1^2 - v_2^2) \quad (7.4)$$

dove ρSv è la massa di aria che attraversa il rotore nell'unità di tempo.

Per trovare il valore di v , calcoliamo la potenza meccanica fornita al rotore come $P = Fv$, dove v è la velocità del vento in corrispondenza del rotore ed F è la forza che il flusso di aria esercita sul rotore. La forza F è uguale alla variazione della quantità di moto per unità di tempo della massa di aria che attraversa il rotore

$$F = \frac{d}{dt} [m(v_1 - v_2)]; \quad (7.5)$$

inoltre, considerando che $v_1 - v_2$ è costante nel tempo, si ha

$$F = \frac{d}{dt}[m(v_1 - v_2)] = (v_1 - v_2) \frac{dm}{dt}. \quad (7.6)$$

Quindi, la potenza risulta essere

$$P = Fv = \frac{dm}{dt}(v_1 - v_2)v = \rho Sv(v_1 - v_2)v = \rho Sv^2(v_1 - v_2), \quad (7.7)$$

dove abbiamo posto $dm/dt = \rho Sv$.

Uguagliando le due equazioni per la potenza, Eq. (7.4) ed Eq. (7.7), si ottiene

$$\frac{1}{2}\rho Sv(v_1^2 - v_2^2) = \rho Sv^2(v_1 - v_2) \quad (7.8)$$

e quindi semplificando si ha $v = (v_1 + v_2)/2$.

Da questa analisi si ottiene che la velocità dell'aria in corrispondenza del rotore è sempre il valore medio tra la velocità dell'aria incidente e quella dell'aria in uscita. Questo risultato è noto come *legge di Betz*. Da calcoli più complessi, risulta che si ha il massimo trasferimento di energia dall'aria al rotore quando $v_2 = v_1/3$. Pertanto, la potenza che si può estrarre dal vento risulta essere la seguente

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho Sv_1^3 = \frac{16}{27} P_{max} \approx 0.59 P_{max}, \quad (7.9)$$

dove abbiamo considerato che la massima potenza del vento sia data da

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho Sv_1^3. \quad (7.10)$$

Questo risultato nasce dal fatto che l'aria dopo aver attraversato il rotore non può avere velocità nulla, in quanto si deve mantenere un flusso di aria costante; la condizione ottimale si ottiene per $v_2 = v_1/3$. Di conseguenza, l'energia cinetica del vento non può essere completamente ceduta al rotore, ma una parte rimane al vento per potersi allontanare dal rotore stesso. Questo è un limite teorico che non può essere superato².

Le moderne pale eoliche iniziano a funzionare quando la velocità del vento è di circa 15 km/h, raggiungono il massimo rendimento per velocità che vanno da 40 a 50 km/h e si fermano quando il vento raggiunge la velocità di circa 100 km/h. Per esempio, se consideriamo un vento di velocità $v_1 = 12$ m/s (43.2 km/h) e un rotore con pale di lunghezza $l = 5$ m, tali da avere una sezione $S = \pi l^2 = 3.14 \times 5^2 = 78.5$ m², avremo una potenza massima

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho Sv_1^3 = 0.5 \times 1.2 \times 78.5 \times 12^3 \approx 80 \text{ kW} \quad (7.11)$$

²Maggiori informazioni si possono trovare sul sito della Danish Wind Industry Association (DWIA) - <http://www.windpower.org>

e quindi una potenza estratta $P = 0.59P_{max} \approx 50 \text{ kW}$.

Finora abbiamo considerato la potenza che il rotore può teoricamente convertire. Tuttavia, nella trasformazione da potenza meccanica in potenza elettrica occorre inoltre considerare le perdite per effetti aerodinamici nel rotore e quelle nella trasmissione del movimento agli ingranaggi fino all'albero dell'alternatore. Infine, la trasformazione in energia elettrica da parte dell'alternatore ha pure un suo rendimento. Tutti questi effetti possono essere inglobati in un solo parametro η , detto *efficienza media* dell'aerogeneratore, definito come:

$$\eta = P_e/P_{max} , \quad (7.12)$$

dove P_e è la potenza elettrica in uscita dall'aerogeneratore e P_{max} è la potenza del vento che incide sul rotore data dall'Eq. (7.10).

Per i moderni aerogeneratori ad asse orizzontale η è circa $0.24 - 0.28$.

$$P_e \approx \eta P_{max} . \quad (7.13)$$

7.2 Attività, misure e calcoli

In laboratorio eseguiremo per simulare il processo di trasformazione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica. A tale scopo, useremo un apparato, mostrato in Figura 7.2, costituito da un asciugacapelli, un rotore e un piccolo generatore elettrico. L'energia elettrica generata sarà usata per alimentare una piccola lampadina.



Figura 7.2: Apparato sperimentale per lo studio dell'energia eolica; l'apparato è costituito da un asciugacapelli, un rotore e un piccolo generatore elettrico.

7.3 Conclusioni

Emilio Fiordilino, Aurelio Agliolo Gallitto, *Il laboratorio di fisica nel Progetto 'Lauree Scientifiche'*, Aracne, Roma 2010.

Curiosità. *L'energia eolica nella storia*

L'energia eolica è presente ovunque ci sia un po' di vento, non è inquinante ed è gratuita e inesauribile; il suo sfruttamento ha inizio fin dalla preistoria e ha avuto grande importanza soprattutto nella navigazione a vela. Nei tempi recenti, sono stati realizzati i famosi mulini a vento, che tutti conosciamo anche dalla letteratura moderna nel *Don Chisciotte della Manica* (titolo originale in lingua spagnola: *El ingenioso hidalgo don Quijote de la Mancha*), opera dello scrittore spagnolo Miguel de Cervantes Saavedra pubblicata nel 1614. I mulini a vento sono tuttora usati per azionare pompe idrauliche. Nella foto di Figura 7.3 si notano due grandi mulini a vento, usati per pompare l'acqua nelle differenti vasche delle saline di Marsala. Oggi, si possono vedere qua e là gigantesche pale, dal grande impatto estetico sull'ambiente, che trasformano l'energia del vento in energia elettrica.



Figura 7.3: Le saline di Marsala (Tp); i mulini a vento sono usati per pompare l'acqua nelle differenti vasche delle saline.
