

# Motore eolico a momento differenziale limite

## 1. Caratteristiche essenziali

Il motore a vento descritto nel presente articolo è del tipo ad asse di rotazione verticale, trae pertanto il suo funzionamento non da una "coppia" motrice (aeromotori a portanza od eliche), bensì da un "momento" risultante dalla differenza di momenti sviluppati rispettivamente tra le sue parti destra e sinistra esposte al vento, considerate rispetto a qualsiasi direzione radiale. Tale momento risultante può essere di origine cinematica o di origine statica. Sono "cinematici" quei momenti risultanti che si sviluppano solo quando le pale dell'aeromotore sono forzatamente poste in rotazione da specifici motori di avviamento (come nel caso del motore a vento Darrieus); sono invece "statici" quei momenti risultanti che si realizzano anche quando il rotore è fermo e che, pertanto, determinano il suo auto-avviamento (come nel caso delle coppette emisferiche degli anemometri, oppure del rotore Savonius, oppure del rotore ad ante battenti).

Il motore eolico a momento differenziale limite, qui presentato, appartiene a quest'ultima categoria, caratterizzata generalmente da bassi rendimenti, notevoli ingombri ed una certa complessità costruttiva. Nonostante la cattiva fama di questo genere di motori a vento, esso possiede delle proprietà che lo rendono interessante per zone geografiche poco ventose, come l'Italia, dove i forti venti oceanici non giungono mai perché fermati dai Pirenei, dalle Alpi e dall'Atlante africano.

Il motore a vento a momento differenziale limite consente di sviluppare sino a valori estremi la differenza tra i momenti destro e sinistro, mediante l'impiego di pale ad apertura e chiusura automatica che, oltre a realizzare una differenza limite della "sezione maestra" offerta al vento, realizzano anche una differenza di "ruvidità" tra la zona esterna ed

interna della pala.

Tali pale sono poste all'estremità di bracci radiali orizzontali montati su un asse verticale, per cui il rotore si sviluppa in piano; inoltre, esse vengono mantenute chiuse in caso di uragani, pur riuscendo lo stesso a sottrarre al vento la potenza nominale di tale motore a vento. Le modalità di incernieramento, di ammortizzazione e di costruzione delle pale sono in continua evoluzione.

## 2. Considerazioni teoriche

Come noto, la potenza è un lavoro compiuto nell'unità di tempo, ovvero è il prodotto di una forza per una velocità. Pertanto, la potenza può essere espressa dalla seguente formula:

(1)

$$P = \frac{F \cdot V}{75}$$

dove:

P = potenza (CV);

F = forza (kg<sub>p</sub>);

V = velocità lineare o periferica (m/s).

Nel caso di un sistema rotante, la (1) può essere scritta come prodotto di un momento per una velocità angolare:

(2)

$$P = \frac{F}{75} \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60} = \frac{M}{75} \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{M \cdot n}{716}$$

## Motore eolico a momento differenziale limite

dove:

$F \cdot r$  = momento ( $\text{kg}_p \cdot \text{m}$ );

$r$  = distanza tra asse di rotazione e punto di applicazione della forza (m);

$n$  = numero di giri al minuto.

Poiché 1 CV = 736 W, si ha

$$P = \frac{M \cdot n}{716} \cdot 736 = 1,028 \quad M \cdot n \quad (3')$$

$$P = 0,001028 \quad M \cdot n \quad (3'')$$

se  $P$  è espressa, rispettivamente, in W o in kW.

Mentre le (3') e (3'') si riferiscono ad una potenza teorica, la formula seguente (4), che contiene un termine relativo al rendimento, si riferisce ad una potenza reale:

$$P = \frac{\gamma \cdot S \cdot V^3}{75 \cdot 2 \cdot g} \cdot \eta \quad (4)$$

$P$  = potenza (CV);

$\gamma$  = peso specifico dell'aria ( $\text{kg}_p/\text{m}^3$ );

$S$  = sezione maestra utile ( $\text{m}^2$ );

$g$  = accelerazione di gravità ( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$\eta$  = rendimento totale;

$\gamma \cdot s \cdot V$  = quantità di aria ( $\text{Kg}/\text{s}$ );

$V^2/2g$  = energia cinetica ( $\text{kg}_p \cdot \text{m}$ )

Tale formula (4) è meno idonea delle (3') e (3''), perché sono abbastanza vaghi i criteri con i quali fissare teoricamente il rendimento totale  $\eta$ .

Come dice il suo nome, il motore a momento differenziale limite basa il proprio momento motore sulla differenza di spinta che il vento esercita tra le sue parti destra e sinistra.

La spinta esercitata dal vento o resistenza aerodinamica è data dalla:

$$R = \frac{C_r \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot S_r}{2g} \quad (5)$$

dove:

$R$  = spinta esercitata dal vento o resistenza aerodinamica ( $\text{kg}_p$ );

$C_r$  = coefficiente di forma (adimensionale);

$S_r$  = sezione maestra del corpo ( $\text{m}^2$ );

Il coefficiente di forma è definito dalla:

$$C_r = \frac{R}{\rho \cdot S_r} = \frac{2R}{\rho \cdot V^2} = \frac{2gR}{\gamma \cdot V^2} \quad (6)$$

$P_d$  = pressione dinamica ( $\text{kg}_p/\text{m}^2$ );

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ densità dell'aria } \frac{\text{Kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

Tale coefficiente  $C_r$  è calcolabile in vari modi, tenendo conto del basso valore del numero di Reynolds inerente ai moti laminari; però è più significativo ed attendibile considerare i suoi valori nella pratica.

Tale coefficiente è tanto più elevato quanto meno il vento può scorrere sulla superficie che investe. Nel caso di semi-sfere senza base (tipiche degli anemometri a coppette) si ha:

- convessità nel senso del moto:  $C_r = 0,34$ ;

- concavità nel senso del moto:  $C_r = 1,33$ .

Nel caso di una lastra rettangolare sottile, normale alla direzione del vento si ha:

- con rapporto 18 tra i suoi lati:  $C_r = 1,4$ ;

- con rapporto infinito:  $C_r = 2,1$ .

Per quantificare il giusto coefficiente di forma applicabile alle pale del motore a vento a momento differenziale limite, è necessario riferirsi alle sue caratteristiche costruttive. La parte interna delle due semi-pale ha una conformazione volta ad impedire al vento di fuoriuscire lateralmente ed a realizzare l'inversione del flusso eolico. Tale flusso investe la semi-pala con angoli progressivamente maggiori a causa del movimento di apertura delle due semi-pale che esso stesso determina. In questo modo si realizza, oltretutto il completo contenimento del flusso all'interno della pala, anche un effetto analogo a quello suscitato dalla forma a doppio cucchiaio tipica delle pale delle turbine Pelton. All'interno delle pale si realizza un flusso che impedisce la creazione di "cuscini d'aria" superficiali, sui quali avverrebbe altrimenti lo scivolamento del flusso del vento verso l'esterno.

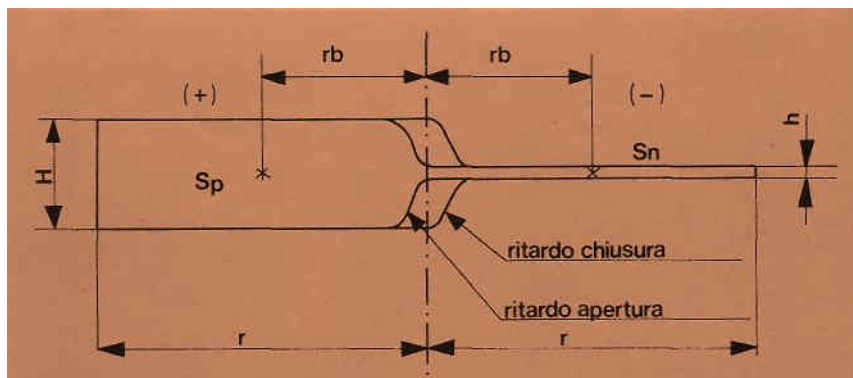
In base a ciò si può ben capire che il coefficiente di forma di tale superficie interna è praticamente il massimo; pertanto nei calcoli si può adottare:

$C_r = 2$ .

Per quanto riguarda la parte esterna della pala si ha il contrario; ovvero, una superficie perfettamente liscia (per esempio, in poliestere rinforzato con fibra di vetro) ed affusolata per avere la massima aerodinamicità.

In tal caso possiamo considerare un coefficiente di forma  $C_r = 0,25$ ; intermedio quindi tra 0,1 (tipico di un elissoide allungato) e 0,34 (tipico della convessità sferica).

**figura 1** - Schema delle sezioni maestre positive e negative, del motore a momento differenziale limite realizzate dalla rotazione delle pale.



Quando, durante la rotazione del rotore, la pala offre al vento la sua parte esterna, essa viene immediatamente chiusa in modo da offrire la massima penetrazione aerodinamica. Ciò è consentito dalla bassa inerzia delle semi-pale che la formano, nonché dalla facilità con cui esse possono espellere l'aria racchiusa tra di esse grazie al loro particolare profilo. Tale espulsione viene realizzata dalla spinta negativa del vento che, tuttavia, viene quasi completamente recuperata dalla positiva reazione che si sviluppa nella pala per effetto di tale espulsione rapida.

Per contro, appena la pala offre la sua parte interna (cioè supera la linea della direzione del vento passante per l'asse di rotazione), essa viene spalancata dalla pressione creata dal vento penetrato al suo interno, cosicché espone la sua massima superficie "assorbitrice" del vento. L'assorbimento del vento avviene non solo con le pale disposte in posizione perpendicolare alla sua direzione, ma anche con pale disposte nelle posizioni oblique, a causa delle nervature unidirezionali delle semi-pale che costituiscono delle asperità della superficie interna delle pale contro le quali il vento cede la propria energia. Pertanto, la superficie utile ( $S_p$ ) o positiva del rotore sarà data dalla:

$$S_p = H \cdot r \quad (7)$$

dove:

$H$  = distanza tra i bordi liberi di ogni pala;

$r$  = raggio del rotore.

Allo stesso modo si definisce la superficie negativa  $S_n$ .

La formula si riferisce alla spinta esercitata dalla energia cinetica inerziale della massa d'aria, poi isolata dal sopraggiungere della superficie della pala successiva. La sezione maestra creata

dalla rotazione del rotore è pertanto quella riportata in **figura 1**.

Per semplicità di calcolo possiamo dunque approssimare la sezione a due rettangoli affiancati: quello grande  $S_p$ , utile o positivo, e quello piccolo  $S_n$ , frenante o negativo.

Esaminando ora la potenza resa disponibile da un rotore avente  $r = 6$  m,  $H = 2$  m ed  $h = 0,25$  m si avrà:

$$- S_p = 2 \cdot 6 = 12 \text{ m}^2$$

$$- S_n = 6 \cdot 0,25 = 1,25 \text{ m}^2$$

Indicando con  $C_{rp}$  e  $C_{rn}$  i coefficienti di forma inerenti rispettivamente alle superfici positiva e negativa, le due spinte relative  $R_p$  ed  $R_n$  saranno date, in base alla (5), da:

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{C_{pr} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot S_p}{2g} \\ &= \frac{2 \cdot 1,29 \cdot V^2 \cdot 12}{2 \cdot 9,81} = 1,578V^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{C_{rn} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot S_n}{2g} = \\ &= \frac{0,25 \cdot 1,29 \cdot V^2 \cdot 1,25}{2 \cdot 9,81} = 0,025V^2 \end{aligned}$$

Moltiplicando ciascuna di queste forze per la distanza del baricentro dei due rettangoli dall'asse di rotazione ( $rb = 3$  m) e sostituendo a  $V$  le velocità medie rispettive  $V_p$  e  $V_n$ , si ottengono i due momenti:

$$M_p = 1,578 \cdot 3 \cdot V^2 = 4,734 V_p^2$$

$$M_n = 0,025 \cdot 3 \cdot V^2 = 0,075 V_n^2$$

Le velocità medie relative  $V_p$  (positiva) e  $V_n$  (negativa) non sono uguali, giacché  $V_p$  è uguale alla velocità del vento ( $V$ ) meno la velocità di

Tabella I

V Velocità del vento (m/s)                      (Km/h)		Mp momento positivo (Kg m)	Mn momento negativo (Kg m)	Mp – Mn differenza momenti (Kg m)                      (Nm)	
2	7,20	10,64	0,47	10,17	99,97
4	14,40	42,56	1,87	40,69	399,17
6	21,60	95,76	4,21	91,55	898,10
8	28,80	170,24	7,49	162,75	1596,58
10	36,00	266,00	11,70	254,30	2494,68
12	43,20	383,04	16,85	366,19	3592,32
14	50,40	521,36	22,93	498,43	4889,60
16	57,60	680,96	29,95	651,01	6386,41
18	64,80	881,84	37,91	823,93	8082,75
20	72,00	1064,00	46,80	1017,20	9978,73

spostamento medio della pala ( $V_u$ ), mentre  $V_n$  è uguale alla velocità del vento più tale velocità della pala; cioè:

$$V_p = V - V_u$$

$$V_n = V + V_u$$

La velocità  $V_u$  della pala, essendo il rotore "ad azione", potrà avere, come valore massimo teorico, la stessa velocità del vento; in effetti, tale velocità è molto minore, sia per le perdite aerodinamiche globali del rotore (va infatti perduta l'energia sottratta dalla parte destra del rotore), sia per l'effetto frenante dell'utilizzazione, che può essere impostato ai valori di massimo rendimento del rotore, esprimenti il compromesso tra coppia motrice e velocità angolare.

Nelle turbine idrauliche ad azione (a palette, oppure Pelton), la velocità periferica di massimo rendimento è circa la metà della velocità del fluido; in questo tipo di rotore eolico, in base ai risultati sperimentali, tale velocità periferica può essere considerata pari ad 1/4 della velocità del vento  $V$ ; per cui:

$$V_u = \frac{V}{4}$$

Pertanto, le velocità relative tra vento e pale saranno rispettivamente:

$$V_p = V - V/4 = 3/4 V$$

$$V_n = V + V/4 = 5/4 V$$

I rispettivi momenti realizzati dal vento sulle pale saranno dunque:

$$M_p = 4,734 \cdot (3/4 V)^2 = 2,660 V^2$$

$$M_n = 0,075 \cdot (5/4 V)^2 = 0,117 V^2$$

I diversi valori di  $M_p$  e  $M_n$  per diverse velocità del vento sono riportati nella **Tabella I**.

Per calcolare la potenza del rotore bisogna

conoscere la velocità angolare del rotore di 12 m di diametro, avente una velocità periferica media  $U$  uguale ad 1/4 della velocità del vento ( $U = 1/4 V$ ) ed un raggio baricentrico di 3 m  $r_b = 3$  m.

Tale velocità angolare è ricavabile dalla:

$$U = \frac{V}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot n}{60}$$

$$n = \frac{60 \cdot V}{4 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 3} = 0,796 V \text{ giri/minuto}$$

Si avranno pertanto, alle varie velocità  $V$  del vento, le velocità angolari del rotore e le conseguenti potenze in kW ricavabili dalla (2) e riportate nella **Tabella II**.

Il "coefficiente di potenza" o rendimento globale di un motore a vento ( $C_p$ ) è dato dal rapporto tra la potenza effettivamente ricavata dal rotore ( $P_e$ ) e la potenza teoricamente disponibile in quella sezione del fluido che investe il rotore ( $P_t$ ); cioè:

$$C_p = P_e/P_t$$

Come specificato all'inizio, la potenza teorica ( $\eta = 1$ ) è espressa, in base alla (4), dal prodotto tra la portata in peso e l'energia cinetica; cioè:

$$P_t = \frac{S \cdot V^3 \cdot \gamma}{75 \cdot 2 \cdot g}$$

Poiché:

$$S = S_p + S_n = 12 + 1,5 = 13,5 \text{ m}^2$$

si avrà:

$$P_t = \frac{13,5 \cdot V^3 \cdot 1,29}{75 \cdot 2 \cdot 9,81} = 0,0118 V^3 \text{ (CV)}$$

Tabella II

Velocità del vento (m/s) (Km/h)		Velocità angolare (n/min) (rad/s)		Momento (Kg m)	Potenza (kW)
2	7,20	1,59	0,17	10,17	0,02
4	14,40	3,18	0,33	40,69	0,13
6	21,60	4,78	0,50	91,55	0,44
8	28,80	6,37	0,67	162,75	1,04
10	36,00	7,96	0,83	254,30	2,03
12	43,20	9,55	1,00	366,19	3,50
14	50,40	11,14	1,17	498,43	5,55
16	57,60	12,73	1,33	651,01	8,29
18	64,80	14,32	1,50	823,93	11,80
20	72,00	15,92	1,67	1017,20	16,19

e quindi:

$$P_t = 0,736 \cdot 0,0118 V^3 = 0,0087 V^3 \text{ (kW)}$$

Così per esempio, alla velocità di 10 m/s si ha:

$$P_t = 0,0087 \cdot 10^3 = 8,7 \text{ kW}$$

Confrontando questo valore di potenza con quello ricavato dal rotore ed indicato nella tabella II si ha:

$$C_p = 2,03/8,70 = 0,233$$

Questo coefficiente di potenza è da ritenersi praticamente costante alle varie velocità del vento.

### 3. Conclusioni

Nella figura 2 sono posti a confronto i rendimenti del motore eolico a momento differenziale limite e di altri motori eolici noti. È quindi possibile rendersi conto che il rendimento di tale motore non è dei più elevati, ma resta pur sempre ragguardevole. Tale confronto, peraltro, non è indicativo degli effettivi vantaggi di questo motore, giacché essendo un motore del tipo "ad azione" (cioè con bassa velocità periferica), la sua curva di rendimento ha un limitato sviluppo lungo l'asse delle ascisse.

Infatti non si deve pensare che più un motore a vento è veloce più è valido, bensì che è valido con venti forti e non è valido per venti deboli.

Inoltre, a parità di potenza, l'aumento di velocità angolare (proporzionale alla velocità periferica) avviene a spese di una riduzione della coppia torcente, come inequivocabilmente indicato dalla (2), che esprime la potenza.

L'aumento di velocità angolare consente, è vero, di alleggerire le strutture, a causa delle minori sollecitazioni torsionali, ma per contro richiede l'azione di venti pure molto intensi, che sono rilevabili solo in rarissime località.

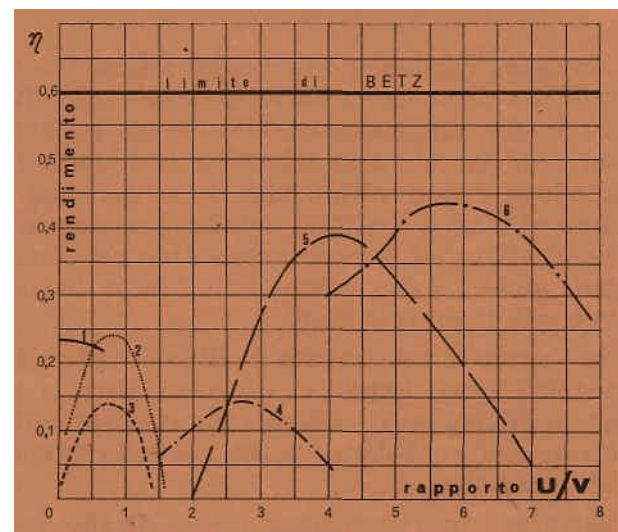


figura 2 - Confronto tra i rendimenti dei motori a vento più diffusi in funzione del rapporto tra la velocità periferica del rotore e la velocità del vento.

1 = motore a momento differenziale limite; 2 = elica lenta multipala; 3 = Savonius; 4 = mulino olandese; 5 = Darrieus; 6 = elica veloce.

Il massimo rendimento teorico 0,59 fu definito dal Betz nel 1926 in base alle sue sperimentazioni pratiche, che stabilirono come ottimale una velocità a valle dell'elica ( $V_2$ ) che fosse  $1/3$  della velocità presente a monte di essa ( $V_1$ ). In base a ciò, eguagliando le perdite di potenza subite dal vento attraversando l'elica (velocità  $V$ ) espresse rispettivamente come variazione di energia cinetica  $W = 1/2 \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2)$

(dove  $A$  è la sezione spaziata dell'elica e  $\rho = \gamma/g$  = densità dell'aria) e come variazione della quantità di moto

$$FV = \rho A V^2 (V_1 - V_2)$$

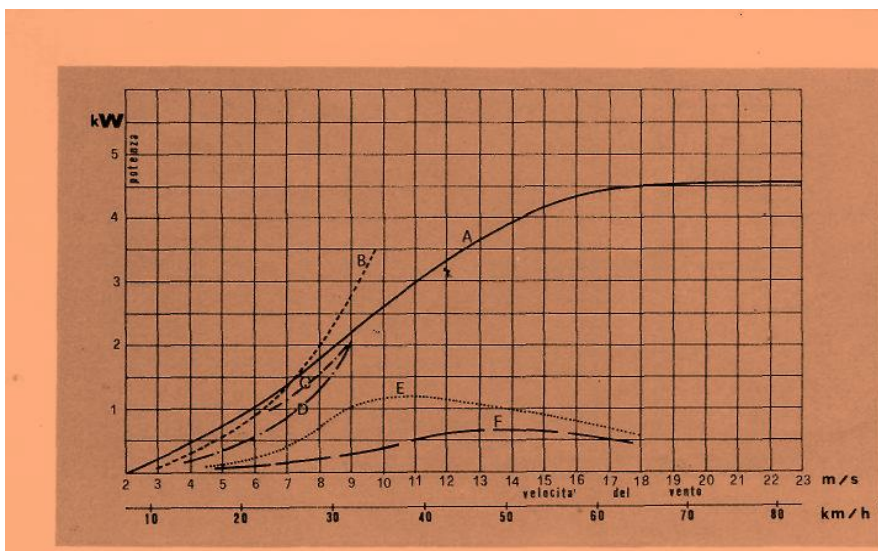
(dove  $F$  è la forza con cui agisce il vento sull'elica) si ottiene infatti

$$\begin{aligned} W_{\max} &= 1/4 \rho A V_1^3 (1 + 1/3) (1 - 1/9) = \\ &= 16/27 \cdot 1/2 \rho \cdot A \cdot V_1^3 \\ &= 0,59 \cdot 1/2 \rho \cdot A \cdot V_1^3 \end{aligned}$$

$$\text{essendo } V = \frac{V_1 + V_2}{2} \text{ e } V_2 = \frac{1}{3} V_1$$

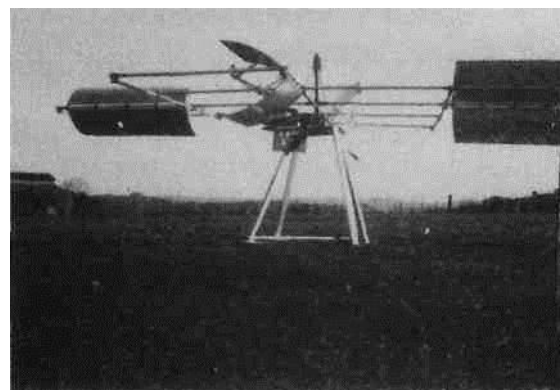


## Motore eolico a momento differenziale limite



**figura 3** - Confronto tra le curve di potenza di motori a vento in commercio aventi costi uguali o maggiori rispetto al motore a momento differenziale limite.

**A** = motore a vento a momento differenziale limite; **B** = Natural Power S. Limited - VORTEX; **C** = American Wind Turbine mod. SST; **D** = Kedco mod. 1610; **E** = Secembaugh mod. 1000-14; **F** = Secembaugh mod. 500-14



Conseguentemente, non bisogna lasciarsi attrarre da tecnologie che promettono risultati con rendimenti prossimi ai massimi teorici, ma con velocità del vento attorno a 100 km/h; e quindi in condizioni di fatto pressoché inesistenti su tutto il territorio italiano! Pertanto, le eliche veloci ed i motori tipo Darrieus non sono motori eolici compatibili con la bassa ventosità presente in Italia.

Tra l'altro, va sottolineato il fatto che laddove esistono i venti ideali per i motori Darrieus e per le eliche, sono ben "rari gli insediamenti umani, cioè i beneficiari potenziali dell'energia eolica raccolta.

Pertanto, è in questo contesto che un motore eolico a basso rendimento massimo, come il tipo a motore differenziale limite, può trovare una sua ragion d'essere.

Infatti, se a parità di superficie esposta tale motore a vento può sviluppare una potenza che è la metà di quella sviluppabile generalmente da un'elica operante nelle rare condizioni ideali, va considerato pure che tale motore può erogare una potenza ben maggiore di quella dell'elica veloce nelle più frequenti condizioni di vento debole. Ciò è visibile nella **figura 3**, in cui sono poste a confronto le potenze di varie eliche attualmente in commercio.

La curva di potenza del motore eolico a momento differenziale limite rappresentata in **figura 3** non è stata tracciata in base ai valori teorici delle formule sopra esposte, bensì dai dati concreti emersi durante la sperimentazione con un rotore di 8 m di diametro ed a quattro pale (**fig. 4**). Un tipo più evoluto, ad 8 pale e 12 m di diametro (**fig. 5**), ha confermato, seppur con potenze erogate proporzionalmente maggiori, l'andamento della curva di potenza.

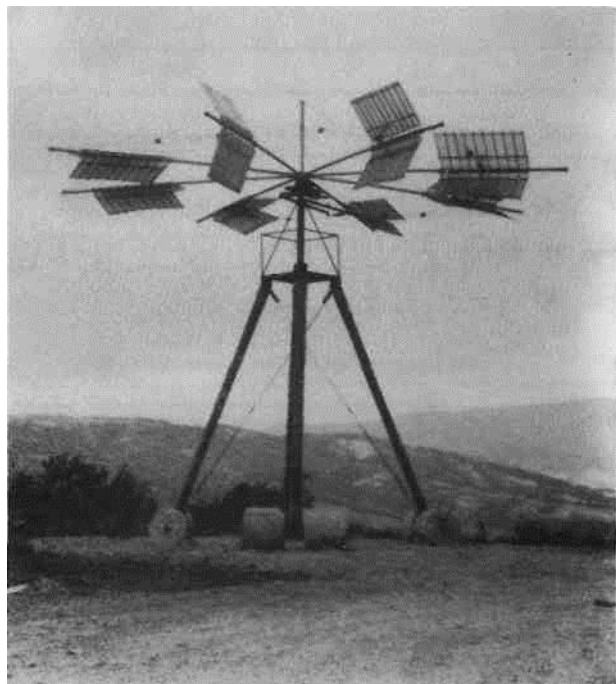
Per questi motivi, il motore eolico a momento differenziale limite può trovare applicazione in un grandissimo numero di località; inquadrato in una prospettiva energetica a livello nazionale, esso risulta senz'altro più interessante sia delle eliche sia del motore tipo Darrieus.

Per quanto riguarda il vantaggio della maggiore velocità degli impianti ad elica, non va dimenticato che tale maggiore velocità è ottenuta con l'impiego di tecnologie avanzate, che aumentano considerevolmente i costi; in altre parole, la maggiore leggerezza intrinseca delle eliche viene ottenuta anche con materiali pregiati, che in pratica vanificano il vantaggio economico teorico connesso alla maggiore velocità.

Il motore eolico a momento differenziale è più pesante di un'elica di pari superficie, ma è realizzato con materiali molto economici e con tecnologie standard che incidono poco sul costo finale del prodotto. In altre parole, con lo stesso costo di un impianto ad elica si può ottenere un motore eolico a momento differenziale che sviluppa una potenza molto più grande.

Generalmente si sostiene che le eliche sono più

## Motore eolico a momento differenziale limite



facilmente accoppiabili a generatori elettrici per via della loro maggiore velocità, ma al riguardo va precisato che la velocità delle eliche è sempre lontana da quella richiesta dai normali generatori elettrici in commercio, per cui si richiedono, come nel caso dei più lenti motori eolici a momento differenziale, rapporti di moltiplicazione che sono tanto più elevati quanto più il diametro dei rotori è elevato. La necessità dei motori ad elica di doversi auto-orientare impone l'adozione di delicati contatti elettrici striscianti. Inoltre, il valore di un motore a vento non è dato dalla sua idoneità ad essere

accoppiato ad una macchina elettrica, bensì dall'energia che esso è in grado di erogare; energia che può anche non essere di natura elettrica, ma semplicemente meccanica e/o termica. Nelle nazioni industrializzate, infatti, ha ben poco significato per l'utente privato il poter produrre autonomamente dell'energia elettrica quando, in 99 casi su 100, tale energia elettrica è già disponibile in rete con costi tali da non giustificare economicamente l'installazione di un impianto eolico.

Fermo restando il fatto che anche gli aeromotori lenti possono produrre energia elettrica, va considerato che è preferibile consumare la maggior parte dell'energia prodotta mediante sistemi termici per il riscaldamento dell'acqua (servizi igienici oppure termosifoni); sarebbe quindi più corretto valutare i diversi tipi di motori a vento in quest'ottica.

In tal caso il motore eolico a momento differenziale risulterebbe nettamente favorito, giacché le sue elevate coppie torcenti sono impiegabili direttamente per la produzione di calore mediante attrito viscoso (realizzato ponendo in idoneo lavoro una massa di olio). Ovvero, con questo tipo di motore eolico diventa estremamente economico trarre calore dal lavoro di trafilamento provocato dal rotore all'interno di una speciale "caldaia ad attrito". In questa, l'energia meccanica viene trasformata in calore con rendimenti prossimi all'unità, senza bisogno né del moltiplicatore di giri, né di macchine elettriche, fornendo calore utilizzabile nei normali impianti di riscaldamento sia in modo ausiliario sia in modo esclusivo.