IV.- PARÁMETROS DE DISEÑO

IV.1.- PARÁMETROS PRÁCTICOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE LOS AEROGENERADORES EÓLICOS

RELACIÓN DE VELOCIDAD PERIFÉRICA TSR.- La relación de velocidad específica o periférica TSR, Tip-Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento ***v*** y es la relación entre la velocidad periférica ***u*** de la pala ***R w*** la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación, y la velocidad ***v*** del viento, en la forma:

$$TSR = \frac{\text{Velocidad de la periferia de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{R\,w}{v} = \cot g\,\theta = \frac{\pi\,R\,n}{30\,v} = 0{,}105\,\frac{R\,n}{k\,v}$$

Si se conoce la velocidad ***v*** del viento, el radio de la pala y el número ***n*** de rpm a las que funciona, se puede calcular el TSR a cualquier distancia ***r*** comprendida entre el eje de rotación del rotor y la periferia de la pala, relación entre velocidades que se conoce como SR, y es de la forma:

$$SR = \frac{2\,\pi\,r\,n}{60\,k\,v} = 0{,}105\,\frac{r\,n}{k\,v}$$

en la que ***k*** es una constante de ajuste de las diversas unidades que se pueden emplear, tomando los siguientes valores:

$$k = \begin{cases} 1{,}47 \text{ cuando la velocidad del viento } \vec{v} \text{ venga en millas por hora y el radio en ft} \\ 1 \text{ cuando } \vec{v} \text{ venga en ft/seg y el radio en ft} \\ 1 \text{ cuando } \vec{v} \text{ venga en metros/seg y el radio en metros} \\ 3{,}6 \text{ cuando } \vec{v} \text{ venga en km/hora y el radio en metros} \end{cases}$$

RELACIONES PRACTICAS ENTRE C_x y C_y.- En la Fig IV.1 se presenta la polar del perfil FX60-126 y a la misma escala la representación de C_y en función del ángulo de ataque α; de ellas se obtiene que la sustentación máxima se presenta para un ángulo de ataque α= 12° y que el arrastre mínimo se produce

para un valor de $C_x = 0,006$ que se corresponde con un coeficiente de sustentación $C_y = 0,2$.

El mejor funcionamiento de la pala se produce para un ángulo de ataque α en el que la relación $\frac{C_y}{C_x}$ sea máxima, es decir, el coeficiente ascensional tiene que ser grande, pero no necesariamente el máximo absoluto, al tiempo que el coeficiente de arrastre tiene que ser lo más pequeño posible, compatible con la relación anterior.

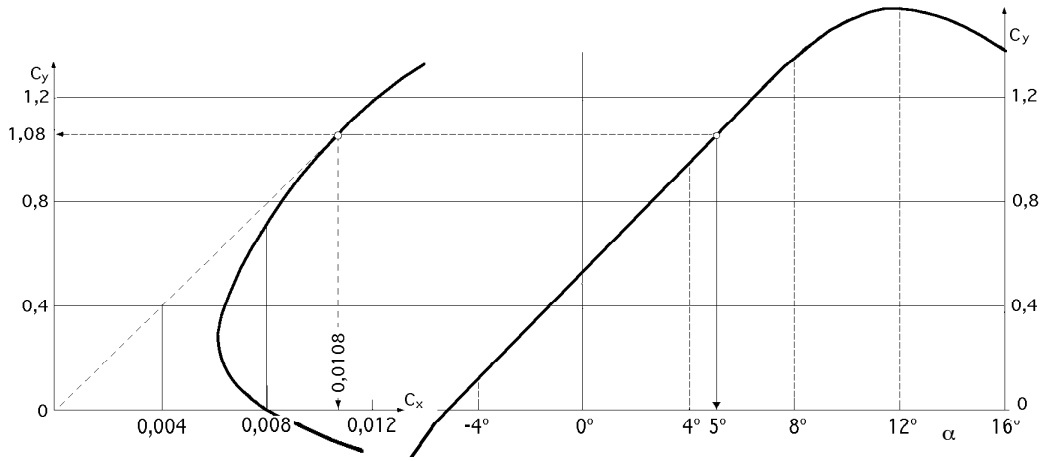

Fig IV.1.- Coeficientes de arrastre y de sustentación del perfil FX60-126

También se observa que el mínimo arrastre se produce para $C_y = 0,2$ que es un valor bajo comparado con el máximo posible $C_y = 1,6$. Para encontrar el ángulo de ataque α para el que la relación $\frac{C_y}{C_x}$ se hace máxima, se traza la tangente a la polar desde el origen de coordenadas; el punto de tangencia P se corresponde con el máximo valor de $\frac{C_y}{C_x}$ del perfil de la pala, proporcionando en este caso un valor de $C_y = 1,08$ y un valor de $C_x = 0,0108$, obteniéndose un ángulo de ataque $\alpha = 5°$ y una relación:

$$\frac{C_y}{C_x} = \frac{1,08}{0,0108} = 100$$

Colocando el perfil con este ángulo, para una determinada velocidad del viento, funcionará en condiciones óptimas.

Tabla IV.1.- Máquinas eólicas de eje horizontal

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de pala	C_y/C_x
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

FACTOR DE ACTIVIDAD, FA.- El factor de actividad indica la capacidad estructural de un rotor para generar energía; se define en la forma:

$$FA = \frac{100.000}{32} \int_{Raiz}^{Punta} \frac{L}{R} \left(\frac{r}{R}\right) d\left(\frac{r}{R}\right)$$

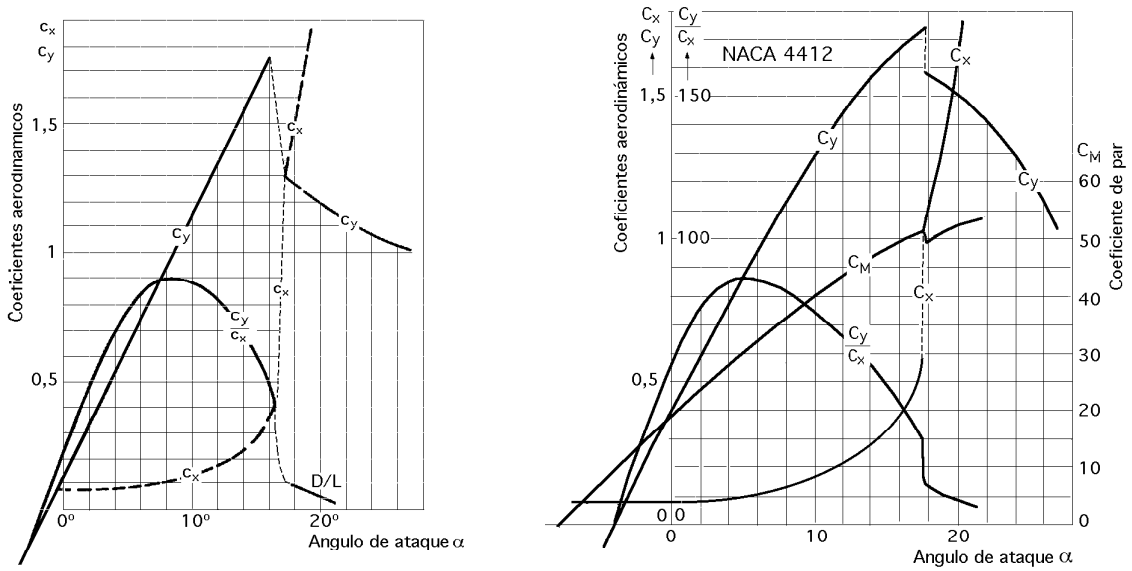

Fig IV.2.- Coeficientes de arrastre y de sustentación en función de α

siendo: *L la longitud de la cuerda media, R el radio y* ***r*** *la distancia al eje.*

Los valores admisibles del factor de actividad están comprendidos entre 15 y 60. Con valores por debajo de 15 el rotor carece de resistencia estructural, por lo que grandes valores del FA se corresponden con palas anchas, mientras que pequeños valores se corresponden con palas finas.

Los valores del FA mayores de 15 se corresponden con ($6{,}5 < TSR < 10$), $\frac{D}{L}$ del orden de 60 y coeficiente de potencia C_N del orden de 0,4

RENDIMIENTO AERODINÁMICO η.– Se ha definido el rendimiento aerodinámico η como la relación entre la potencia generada por el aerogenerador y la energía del viento que atraviesa el rotor, en la forma:

$$\eta = \frac{\text{Potencia del aerogenerador}}{\text{Potencia del viento}} = \frac{N}{\frac{\rho A v^3}{2}}$$

En las Fig IV.3ab se indica la relación entre el rendimiento aerodinámico η, la velocidad específica TSR y el nº de palas, para una relación $\frac{D}{L} \rightarrow \infty$.

COEFICIENTE DE PAR C_M.- Se define el coeficiente de par C_M en la forma:

$$C_M = \frac{\text{Par del aerogenerador}}{\frac{\text{Potencia del viento}}{v} R} = \frac{C}{\frac{\frac{1}{2}\rho A v^3}{v} R} = \frac{C}{\frac{1}{2}\rho A v^2 R} = \frac{\frac{N_{útil}}{R w}}{\frac{N_{viento}}{v}} = \frac{\frac{N_{útil}}{R w}}{\frac{N_{viento}}{v}} = \frac{\eta_{aerod}}{TSR} = \frac{C_N}{TSR}$$

Para el caso particular de un rotor de hélice, el valor del área frontal barrida es $A = \pi R^2$ y el coeficiente de par C_M correspondiente:

$$C_M = \frac{2\,C}{\rho \pi v^2 R^3}$$

El par motor se puede expresar también en función del rendimiento aerodinámico o coeficiente de potencia C_N y de la potencia útil del viento en la forma:

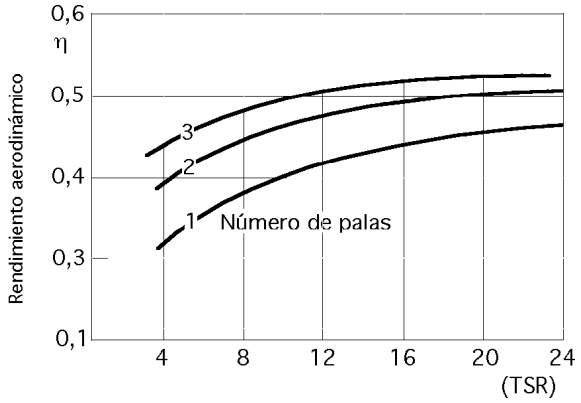

Fig IV.3a.- Relación entre el rendimiento aerodinámico, el TSR y el número de palas para D/L → ∞

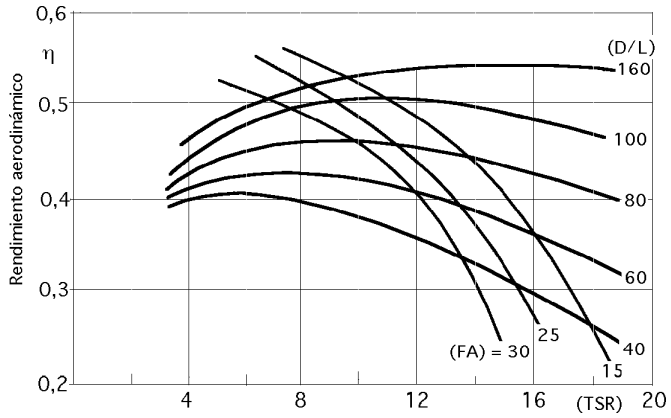

Fig IV.3b.- Relación entre el rendimiento aerodinámico, el TSR y la relación D/L

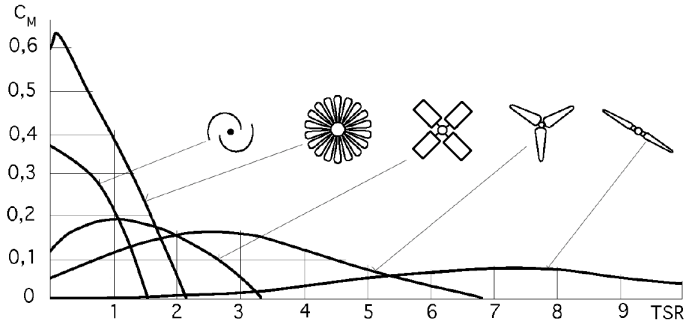

Fig IV.4.- Relación entre el coeficiente de par y el TSR

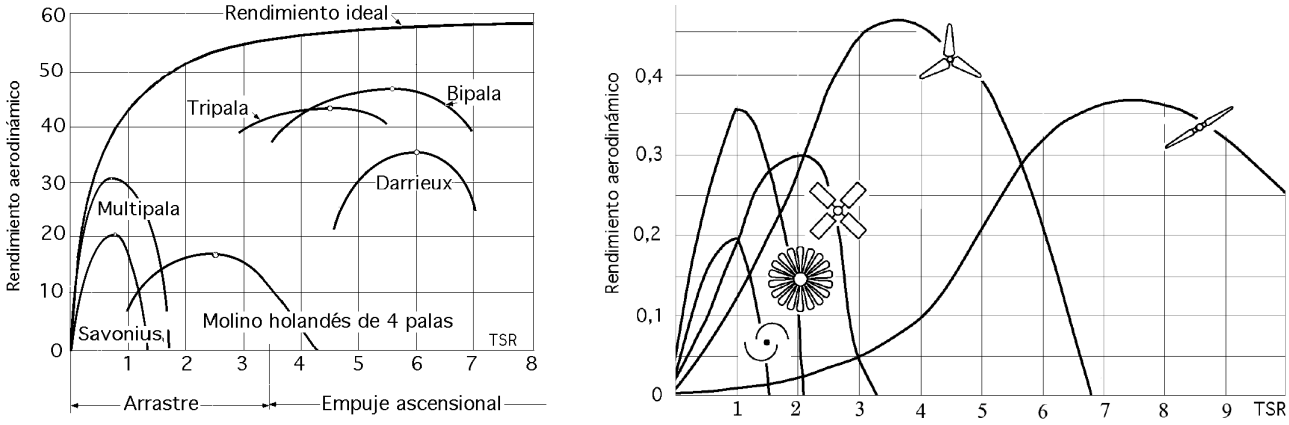

Fig IV.5.- Curvas (η_{aerod} - TSR)

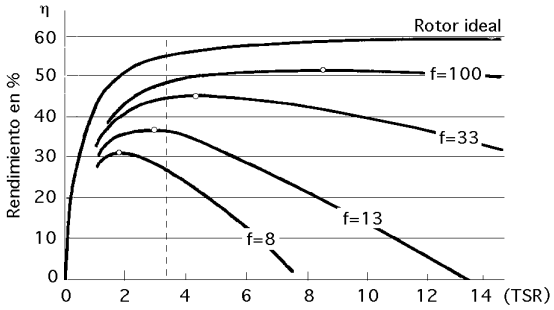

Fig IV.6.- Curvas (η_{aerod}-TSR), para hélices

$$C = \frac{N_u}{w} = \frac{\eta_{aerod}\ N_{viento}}{w} = \frac{C_N\ N_{viento}}{w}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos determinar la calidad de una máquina eólica, considerando las curvas del tipo (η_{aerod} - TSR), de las que en primer lugar se puede hacer una clasificación mediante la representación gráfica de la Fig IV.5, obteniéndose las siguientes conclusiones:

a) Los molinos multipala y Savonius obtienen su máximo rendimiento aerodinámico para TSR pequeños, es decir, giran a baja velocidad; asimismo funcionan con velocidades $\vec{v}$ del viento pequeñas.

b) El rendimiento aerodinámico y, por tanto, la potencia útil es superior en los aparatos Darrieux y hélice.

c) El rendimiento aerodinámico se mantiene siempre por debajo del límite de Betz, y se aproximaría a él si el TSR tendiese a infinito.

d) Si el TSR es mayor que 3,5 las palas funcionan principalmente por empuje ascensional, y si es menor que 3,5 funcionan por arrastre.

En la Fig IV.6 se ha hecho una representación {η_{aerod} - TSR} en función del nº Z de palas, relaciones $\frac{D}{L}$, y $f = \frac{F_{asc}}{F_{arr}} = \frac{C_y}{C_x}$, respectivamente.

IV.2.- DIMENSIONADO DE UN ROTOR EÓLICO

ÁREA FRONTAL BARRIDA POR LA PALA.- El área A barrida por el rotor y que éste presenta frontalmente al viento, es un parámetro que se utiliza con cierta frecuencia en los cálculos de energía eólica.

Para un rotor de hélice de diámetro D de eje horizontal, este área A es la superficie total barrida por las palas, perpendicular a la dirección del viento:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Para máquinas de eje vertical (viento transversal), con un radio uniforme alrededor del eje de rotación igual a $\frac{d}{2}$ y altura ***h***, el área A barrida es:

$$A = \text{Altura} \times \text{Anchura} = h\,d$$

de aplicación al rotor Savonius y a los rotores de palas tipo giromill.

En un rotor Darrieux, la curva envolvente que conforma el perfil (catenaria) proporciona el área A. Sin embargo, en algunos casos, esta curva envolvente se puede aproximar bastante bien, mediante dos medias parábolas, por lo que el área frontal sería, aproximadamente, igual a:

$$A = 0{,}67\ d\,h$$

siendo ***d*** el diámetro máximo de giro y ***h*** la altura del aparato, (distancia entre los extremos del rotor).

El tamaño y dimensiones de un rotor eólico se determinan calculando:

a) El área frontal A del mismo; para ello se le puede suponer como una máquina motriz, a la que de antemano se tiene que prefijar y asignar la energía que se desea generar

b) El promedio de energía que se puede obtener a partir de los recursos eólicos del lugar donde se vaya a instalar la máquina eólica.

Conocidos los datos energéticos, de la máquina y de la fuente energética, se igualan, y se determina el área A barrida por el rotor, y la longitud de las palas. El diseño de la máquina es relativamente senci-

llo, mientras que el estudio y elección de un lugar con recursos eólicos puede ser más complicado, pudiéndose obtener resultados muy ajustados entre la energía que se desea obtener y la energía del viento disponible y necesaria para conseguirla.

Estos promedios de energía eólica necesarios $N_{útil}$ vienen dados por la ecuación:

$$N_{útil} = N_{viento}\ \eta = \frac{1}{2}\rho A v^3 \eta \quad \Rightarrow \quad A = \frac{2\ N_{útil\ aerog}}{\rho v^3 \eta} = \frac{93\ N_{útil\ aerog}}{\eta F C_A C_T}$$

siendo: $N_{útil}$ en kW, y $\eta = \eta_{aerod}$ el rendimiento aerodinámico global del aerogenerador, en las que:

F es un factor que depende de la velocidad del viento y cuyos valores se indican en la Tabla IV.2

C_A y C_T son dos factores de corrección de la densidad del aire, en función de la altitud (en metros) y de la temperatura del lugar en ºC, valores que vienen indicados en la Tabla IV.3.

Tabla IV.2.- Valores del factor de potencia F

v mph	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
F	1,07	1,78	2,62	3,74	5,13	6,82	8,86	11,3	14,1	17,3	21	25,2
v mph	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
F	29,9	35,2	41	47,5	54,6	62,4	70,9	80,1	90,1	101	113	125

Tabla IV.3.- Factores de corrección de la densidad del aire

Altitud m	C_A	Temperatura ºC	C_T
0	1	-18°	1,13
750	0,898	-6°	1,083
1500	0,819	+4°	1,04
2250	0,744	+16°	1
3000	0,676	+27°	0,963
		+38°	0,929

Tabla IV.4.- Valores estimados de la eficiencia para pequeñas máquinas eólicas

MAQUINA EÓLICA	Eficiencia en %	
	Construcción simplificada	Diseño óptimo
Bomba de agua multipala	10	30
Bomba de agua de palas de tela	10	25
Bomba de agua Darrieux	15	30
Aeromotor Savonius	10	20
Prototipos de aeromotores pequeños de menos de 2 kW	20	30
Prototipos de aeromotores medianos de 2 a 10 kW	20	30
Prototipos grandes de más de 10 kW	---	30 a 40
Generador eólico Darrieux	15	35

Si se dispone de un aerogenerador eólico ya instalado y se conoce la eficiencia del mismo, la fórmula anterior permite comprobar si el área frontal del aparato se corresponde con las necesidades energéticas programadas de antemano; por eso, cuando se diseña una máquina eólica es preciso fijar en forma aproximada la eficiencia de la misma, que es un factor desconocido, para lo que se puede hacer uso de la Tabla IV.4.

***Ejemplo:** Dado un aerogenerador de 3 palas que genera 1 kW, instalado en un lugar en el que se sabe sopla el viento a 15 mph, determinar el área A barrida por el rotor.*

Se comienza por estimar la eficiencia, que, para pequeños propulsores se puede suponer, a priori, entre un 15% y un 30%; elegimos $\eta = 25$ %.

Para v = 15 mph $\Rightarrow$ F = 17,3

Para una temperatura standard a nivel del mar de 16°C $\Rightarrow C_A = C_T = 1$.

$$A = \frac{93 \times 1\ kW}{0{,}25 \times 17{,}3 \times 1 \times 1} = 21{,}5\ m^2 \xrightarrow{\text{Diámetro del rotor}} d = 5{,}23\ m$$

TAMAÑO DE LAS PALAS Y COEFICIENTE DE SOLIDEZ Ω.- Cuando una máquina eólica dispone de un número determinado de palas Z, la superficie total de las mismas se puede calcular mediante la expresión:

Área total de las palas = Z S = Solidez Ω x Área A barrida por el rotor

por lo que la solidez Ω del rotor se puede interpretar como la relación entre el área geométrica de la pala (S = RL) y el área barrida por ella en su giro, es decir:

$$\Omega = \frac{Z\,S}{\pi R^2} = \frac{Z\,R\,L}{\pi R^2} = \frac{Z\,L}{\pi R}$$

Para obtener la superficie de una pala se divide el área total así obtenido por el número de ellas. El coeficiente de solidez Ω guarda una relación inversa con el TSR. En la Fig IV.7 se ha hecho una representación en función del nº de palas, sin tener en cuenta sus características; sin embargo, en los actuales aerogeneradores con valores del TSR mayores de 10 la solidez es del orden de 2,5 por ser las palas muy esbeltas.

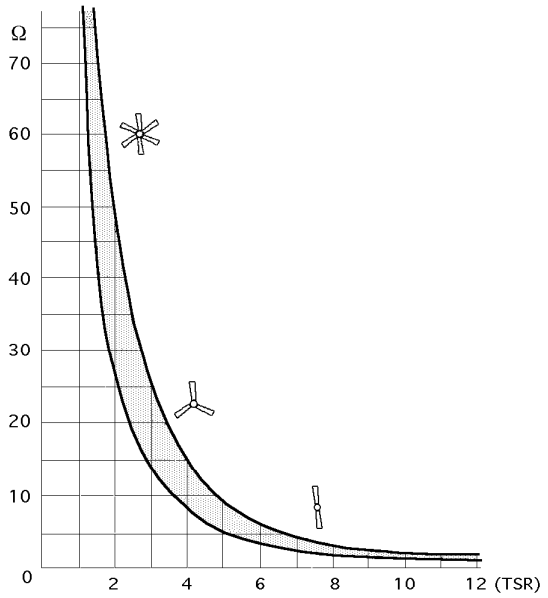

Fig IV.7.- Relación entre el coeficiente de solidez Ω y el TSR

Ejemplo: Supongamos se necesita un TSR = 5 y se ha seleccionado un tripala con un diámetro de 3,7 metros y un área frontal A = 10,75 m².

De la Fig IV.7 se obtiene la conclusión de que la máxima solidez recomendada para TSR = 5 tiene que ser Ω = 0,1 por lo que:

La superficie total de las palas es: 0,1 x 10,75 = 1,075 m²

La superficie S de cada pala es: 1,075/3 = 0,358 m²

Las máquinas con un coeficiente de solidez Ω grande son más lentas.

IV.3.- RESISTENCIA AERODINÁMICA DEL ROTOR

FUERZA CENTRIFUGA.- La fuerza centrífuga empuja las palas hacia afuera y tiende a arrancarlas del cubo del rotor viene dada por la ecuación:

$$F_{cent} = \frac{1}{2}\,G\,\frac{u^2}{r_G} = \frac{G\left(\frac{\pi\, r_G n}{30}\right)^2}{2\, r_G} = \frac{\pi^2 G\,(r_G n)^2}{1800\, r_G} = \frac{\pi^2 G\left(\frac{k\, v\,(SR)_G}{0{,}105}\right)^2}{1800\, r_G} = \frac{0{,}1034\, G\,\{k\, v\,(SR)_G\}^2}{r_G}$$

en la que:

*G es el peso de la pala en kg, y **k** un valor que depende de las unidades*

$(SR)_G$ se calcula en el centro de gravedad de la pala a la distancia r_G

r_G es la distancia en metros, desde el eje de rotación del rotor al c.d.g. de la pala

Como la velocidad del viento está elevada al cuadrado, un aumento brusco de la misma originaría un gran aumento en la fuerza centrífuga.

***Ejemplo:** Un aerogenerador de 3 palas con un diámetro de 3,70 m se utiliza para funcionar con un TSR = 6. Si cada pala pesa 2,268 kg, con su centro de gravedad determinado mediante unos ensayos de balance, y situado a una distancia del eje de giro de 0,925 m, determinar la fuerza centrífuga a la que está sometida la pala, cuando el viento sople a una velocidad, v = 4,47 m/seg.*

En primer lugar hay que conocer la distancia r_G del centro de gravedad de la pala, que se encuentra en este caso en la mitad de su longitud $\frac{3,7}{4} = 0,925$ m; por lo tanto, el valor del SR y de la fuerza centrífuga son:

$$SR = \frac{1}{2}\,TSR = 3 \quad ; \quad F_{cent} = \frac{0,1034 \times 2,268 \times (3 \times 4,47)^2}{0,925} = 45,58 \text{ kg}$$

Tabla IV.6.- Diámetros de aeroturbinas pequeñas tipo hélice

Diámetro del rotor	Número de r.p.m.		Potencia en kW	
metros	v = 5 m/seg	v = 7 m/seg	v = 5 m/seg	v = 7 m/seg
1	935	1340	0,07	0,2
2	470	670	0,27	0,8
3	310	450	0,60	1,8
4	235	335	1,07	5
10	95	134	6,7	20
15	62	90	15	45
20	47	67	26,8	80
30	31	45	60	180
40	23	33	107	320
50	19	27	168	500

Para un rotor que funciona con un TSR fijo, la fuerza centrífuga crece con el cuadrado de la velocidad del viento.

Existen dos condiciones operativas a tener en cuenta para el cálculo de la fuerza centrífuga:

a) Lo primero que hay que prever, cuando todavía el rotor está en fase de diseño, es la velocidad del viento máxima que podrá soportar el aparato antes de que el regulador comience a limitar su número de revoluciones.

b) Una vez construida la máquina y entra en funcionamiento, si se embala por fallo del mecanismo de regulación hay que preveer la máxima velocidad que puede permitírsele alcanzar; si la máquina eólica es pequeña, puede soportar un exceso en la velocidad de rotación de hasta un 50%, pero si es grande, en estas circunstancias, quedaría averiada e inutilizada.

RESISTENCIA AERODINÁMICA DE LA PALA.- Una fórmula aproximada para determinar la resistencia aerodinámica de un aerogenerador en rotación, inmerso en una corriente de aire de velocidad $\vec{v}$, se puede expresar en la forma:

$$F_{aerod} = 0,062\ A\,v^2$$

en la que A viene dada en m², y ***v*** en m/seg.

***Ejemplo:** Una hélice tripala de 3,70 metros de diámetro, está girando en una corriente de aire de velocidad v= 8,94 m/seg.*

La fuerza aerodinámica es: $F_{aerod} = 0{,}062 \frac{\pi \times 3{,}7^2}{4} \times 8{,}94^2 = 53{,}27$ kg, y como el rotor tiene 3 palas, la fuerza aerodinámica correspondiente a cada una es de 17,75 kg.

Si la máquina eólica está parada, pero inmersa en la corriente de aire, la resistencia estática aerodinámica por pala se calcula mediante la expresión:

$$F_{\text{estática aerod}} = 2\ \Omega\ F_{\text{aerod en movimiento}}$$

Para una solidez del rotor $\Omega = 0{,}1$ la fuerza estática aerodinámica para cada pala es:

$$F_{\text{estática aerod}} = 2 \times 0{,}1 \times 17{,}75 = 3{,}55 \text{ kg}$$

siendo la fuerza estática aerodinámica total igual a 10,65 kg.

MOMENTO FLECTOR DE LA PALA.- El momento flector de la pala se calcula a partir de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas, que son paralelas al eje de giro, a la distancia r_G del mismo, de la forma:

$$M_{\text{flector de la pala}} = r_G\ F_{aerod}$$

que proporciona sólo un valor aproximado, por cuanto los factores que intervienen en el cálculo, son también aproximados, pero suficientes para gran número de aplicaciones; para valores exactos sería precisa una formulación más compleja.

Para un aerogenerador de diámetro de palas igual a 3,7 metros y $r_G = \frac{D}{4}$ se tiene un momento flector para el modo operativo (máquina en funcionamiento) igual a 16,42 m.kg, mientras que para el modo estacionario (máquina parada), sería de 3,28 m.kg.

El punto de máximo esfuerzo, que a su vez está sometido a una fatiga máxima, se encuentra situado en la zona donde la pala se une al cubo del rotor.

MOMENTO DE TORSIÓN DEL EJE DE GIRO.- El momento de torsión de las palas respecto al eje de giro (par motor), viene dado por la expresión:

$$C = \frac{N_{\text{generada en el rotor}}}{w} = \frac{N_{\text{útil}}\ D}{2\,(TSR)\,v} \quad \text{con: } \begin{cases} N_{\text{útil}} \text{ en (Kgm/seg)} \\ D \text{ en metros y } v \text{ en (m/seg)} \end{cases}$$

o también:

$$C = \frac{51\ N_{\text{útil}}\ D}{(TSR)\,v} \quad \text{con: } \begin{cases} N_{\text{útil}} \text{ en kW} \\ D \text{ en metros y } v \text{ en (m/seg)} \end{cases}$$

El par motor C así obtenido es el total, por lo que para calcular el par originado por cada pala, habrá que dividirle por el número de palas Z.

Hay que tener en cuenta que la potencia $N_{\text{útil}}$ a utilizar es la que se tiene en el eje del rotor, y no en el eje de salida del generador u otro aparato impulsado por el aerogenerador.

Este momento actúa en el plano de rotación, estando localizada la tensión máxima en la zona de implantación de cada pala con el rotor; el par aumenta con el coeficiente de solidez Ω.

IV.4.- DISEÑO Y CALCULO SIMPLIFICADO DE LOS AEROGENERADORES EÓLICOS RÁPIDOS DE EJE HORIZONTAL

DIÁMETRO DEL ROTOR.- Para calcular el diámetro del rotor, se iguala la potencia específica proporcionada por el generador, a la potencia de salida del sistema a la velocidad máxima del viento; si se supone que:

$N_{útil} = 1$ kW ; $\rho = 1{,}25$ kg/m^3 ; $v = 6{,}7$ m/seg ; $\eta = 25\%$

$$1 \text{ kW} = \frac{10^{-3}}{2} \times 1{,}257 \times (6{,}7)^3 \times A \times 0{,}25 \quad \Rightarrow \quad A = 21{,}27 \text{ m}^2 \quad \Rightarrow \quad D = 5{,}25 \text{ m}$$

Si se aumenta el rendimiento a un 35%, para obtener la misma energía de 1 kW se podría utilizar un rotor más pequeño, cuya superficie frontal fuese:

$$A = 15{,}2 \text{ m}^2 \quad \Rightarrow \quad D = 3{,}75 \text{ m.}$$

Un aumento de la velocidad del viento implica una disminución del diámetro de las palas para obtener la misma potencia.

ACOPLAMIENTO ROTOR EOLICO-GENERADOR ELÉCTRICO.- En el acoplamiento del rotor a un generador eléctrico, a través del multiplicador, hay que tener en cuenta el número de rpm a que va a funcionar el generador. Si se selecciona en el generador eléctrico una velocidad baja (p.e. para una actividad como puede ser la de cargar baterías), el rotor se puede poner a un número de revoluciones que se corresponda con la velocidad máxima del viento.

Si en nuestro ejemplo suponemos que el generador requiere 300 rpm para generar la potencia de 1 kW y el rotor funciona a estas 300 rpm, no es necesario colocar ningún tipo de multiplicador y el acoplamiento será directo; estas rpm se corresponden con un TSR igual a:

$$TSR = 0{,}105 \frac{r\,n}{v} = 0{,}105 \frac{(5{,}25/2)\ 300}{6{,}7} = 12{,}34$$

que es un valor un poco elevado.

Si se pone un multiplicador de velocidades, con una relación, por ejemplo de 2/1, se podría utilizar un rotor con una velocidad inferior, 150 rpm, reduciendo el TSR a 6,17 que es un valor mucho más apropiado. Si lo que se desea accionar es un generador eléctrico, éste requiere una velocidad sincrónica a un número de rpm constante por lo que ésta vendrá perfectamente determinada en función de la frecuencia de la energía eléctrica a obtener y del número de pares de polos del mismo, de la forma:

$$50 \text{ ciclos/seg} \times 60 \text{ seg} = 3000 = n_{(rpm)alt} \times (\text{n}^{\text{o}} \text{ de pares de polos})$$

Para 2 pares de polos (n = 1500 rpm), lo que implica una multiplicación de 5/1 funcionando el rotor a 300 rpm. Un aumento del nº de pares de polos disminuye este factor de multiplicación.

SOLIDEZ Y Nº DE PALAS.- Una vez seleccionada la relación de multiplicación del acoplamiento rotor-generador y por tanto del TSR se determina la solidez Ω mediante la gráfica de la Fig IV.7, y el número Z de palas según la Tabla IV.7, deduciéndose que para un TSR= 6 la solidez tiene que ser del orden de un 5% y el rotor tripala.

Sin embargo, el número de palas de un aerogenerador no es de gran importancia en su actuación,

por cuanto sus criterios de selección son más bien económicos, ya que a más palas mayor coste; a mayor número de palas mayor par de arranque.

Tabla IV.7.- Número de palas en función del TSR

TSR	1	2	3	4	5 a 8	8 a 15
Número de palas	6 a 20	4 a 12	3 a 8	3 a 5	2 a 4	1 a 2

PERFIL DE LA PALA.- Interesan perfiles con altos valores de D/L del orden de 60 y C_y próximo a la unidad; el espesor del perfil disminuye desde el entronque con el cubo a la periferia; cuando el espesor del perfil aumenta, disminuye la relación $\frac{D}{L}$ y el perfil transmite menos fuerza al rotor. Como los perfiles gruesos, por razones estructurales, deben estar más próximos al cubo, producen muy poco par y, por ello, teóricamente, se podrían suprimir en esa zona; concretamente, en el 10% ó 15% de la pala próximo al cubo no sería necesario poner perfiles aerodinámicos, siempre que los problemas de fijación al cubo estuviesen resueltos, que no es el caso en los actuales aerogeneradores; en la periferia de las palas, éstas nunca deben superar espesores del 18%.

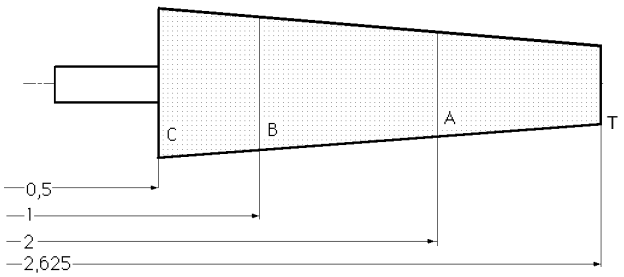

Fig IV.8.- División de una pala de aerogenerador

Para perfilar una pala se procede en primer lugar a hacer un esquema de la misma, Fig IV.8, dividiéndola en varias secciones, calculando la relación de velocidades SR correspondiente a cada una de ellas. En el ejemplo que se presenta se han fijado tres intervalos, aunque en la práctica habría que dividir la pala en 10 o más partes.

$$SR = \frac{TSR\ r}{R} \Rightarrow \begin{cases} SR_T = \dfrac{6 \times 2{,}625}{2{,}625} = 6 \quad ; \quad SR_A = \dfrac{6 \times 2}{2{,}625} = 4{,}57 \\ SR_B = \dfrac{6 \times 1}{2{,}625} = 2{,}29 \quad ; \quad SR_C = \dfrac{6 \times 0{,}5}{2{,}625} = 1{,}14 \end{cases}$$

Valores de θ.- Teniendo en cuenta las gráficas de las Fig IV.9.10, se determinan el ángulo θ y un ***parámetro de forma*** SP a partir del SR, tal como se indica a continuación:

$$\begin{cases} SR_T(6{,}00) \Rightarrow \begin{cases} \theta_T = 6{,}3^\circ \\ (SP)_T = 0{,}17 \end{cases} \\ SR_A(4{,}57) \Rightarrow \begin{cases} \theta_A = 7{,}3^\circ \\ (SP)_A = 0{,}32 \end{cases} \end{cases} ; \quad \begin{cases} SR_B(2{,}29) \Rightarrow \begin{cases} \theta_B = 16^\circ \\ (SP)_B = 1{,}02 \end{cases} \\ SR_C(1{,}14) \Rightarrow \begin{cases} \theta_C = 28^\circ \\ (SP)_C = 2{,}4 \end{cases} \end{cases}$$

Cálculo del coeficiente ascensional C_y máximo.- Una vez elegido el tipo de perfil y determinado el coeficiente C_y que se obtiene de su polar, se determina la longitud L de la cuerda; para el perfil FX60-126 de la Fig IV.1, el máximo valor de $C_y = 1{,}08$ se tiene para una relación:

$$\frac{C_y}{C_x} = \frac{1{,}08}{0{,}0108} = 100$$

siendo el ángulo de ataque correspondiente, $\alpha = 5°$

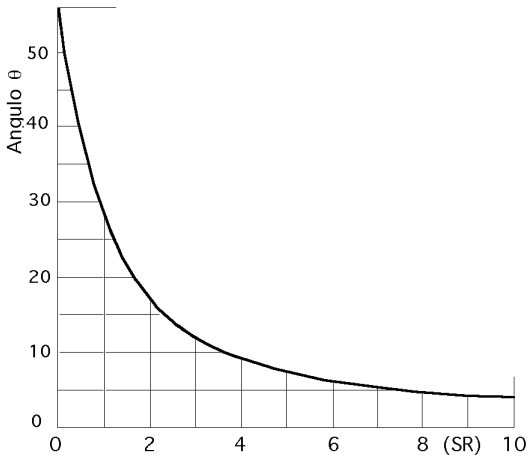

Fig IV.9.- Valores de θ en función del SR = cotg θ

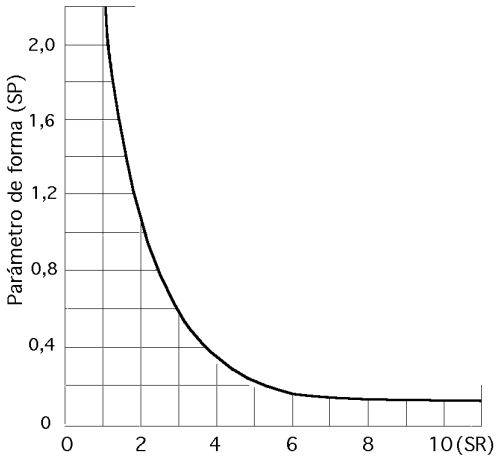

Fig IV.10.- Valores del SP en función del SR

Longitud L de la cuerda.- Para cada distancia radial ***r*** se calcula la longitud L de la cuerda, siendo Z el número de palas, mediante la expresión:

$$L = \frac{r\,(SP)}{C_y\ Z} \xrightarrow{\text{Longitud de las cuerdas}} \begin{cases} L_T = \dfrac{2{,}625 \times 0{,}17}{1{,}08 \times 3} = 0{,}1377 \text{ m} \\ L_B = \dfrac{1{,}0 \times 1{,}02}{1{,}08 \times 3} = 0{,}3148 \text{ m} \end{cases} \quad \begin{cases} L_A = \dfrac{2{,}0 \times 0{,}32}{1{,}08 \times 3} = 0{,}1975 \text{ m} \\ L_C = \dfrac{0{,}5 \times 2{,}40}{1{,}08 \times 3} = 0{,}37 \text{ m} \end{cases}$$

Corrección del ángulo de incidencia α.- El ajuste del ángulo de ataque α para un valor óptimo de la relación $\frac{C_y}{C_x}$ se puede hacer mediante la siguiente ecuación empírica:

$$\alpha = -\,\alpha_0 + \frac{C_y}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L}\right)$$

en la que ΔL es una relación, en primera aproximación, entre la envergadura de la pala (su longitud) definida por su radio máximo R y el promedio de las longitudes de las cuerdas en las distintas secciones consideradas, que sirve para corregir el ángulo de incidencia α:

$$\Delta L = \frac{R}{L} = \left| \hat{L} = \frac{0{,}1377 + 0{,}1975 + 0{,}3148 + 0{,}37}{4} = 0{,}255 \text{ m} \right| = \frac{2{,}625}{0{,}255} = 10{,}29$$

obteniéndose un valor de α constante para todas las cuerdas, por haber considerado el valor promediado de las mismas:

$$\alpha = -\,\alpha_0 + \frac{C_y}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L}\right) = -\,5^\circ + \frac{1{,}08}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{10{,}29}\right) = 7{,}68^\circ$$

Se puede calcular con mayor precisión tomando para cada distancia la cuerda correspondiente, y tratando a cada sección como un caso particular.

$$\alpha_T = -\,\alpha_0 + \frac{C_y}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L_T}\right) = \left| \Delta L_T = \frac{R}{L_T} = \frac{2{,}625}{0{,}1377} = 19{,}06 \right| = -\,5^\circ + \frac{1{,}08}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{19{,}06}\right) = 6{,}36^\circ$$

$$\alpha_A = -\,\alpha_0 + \frac{C_y}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L_A}\right) = \left| \Delta L_A = 13{,}29 \right| = -\,5^\circ + \frac{1{,}08}{0{,}11}\left(1 + \frac{3}{13{,}29}\right) = 7{,}03^\circ$$

$$\alpha_B = -\alpha_0 + \frac{C_y}{0,11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L_B}\right) = \left| \Delta L_B = 8,33 \right| = -5^o + \frac{1,08}{0,11}\left(1 + \frac{3}{8,33}\right) = 8,35^o$$

$$\alpha_C = -\alpha_0 + \frac{C_y}{0,11}\left(1 + \frac{3}{\Delta L_C}\right) = \left| \Delta L_C = 7,09 \right| = -5^o + \frac{1,08}{0,11}\left(1 + \frac{3}{7,09}\right) = 8,97^o$$

Ángulo de calaje o de inclinación β.- Un factor importante en el diseño de superficies alabeadas es determinar la torsión de la pala que se proyecta de forma que su ángulo de calaje β no sea constante, es decir, tiene que existir una variación de dicho ángulo a lo largo del perfil, con el fin de subsanar el hecho de que para diversos radios a lo largo de la pala, la velocidad del viento a la salida varía con la distancia al eje de giro, lo que hace que el ángulo θ no sea constante en cada sección del perfil. El ángulo β es la ***torsión*** y se determina mediante la corrección del ángulo de ataque α, obteniéndose para cada sección transversal la inclinación de las diferentes cuerdas de la pala, correspondiente a cada distancia ***r*** al eje de giro, mediante la ecuación (β = θ – α), en la forma:

$$\text{Con } \alpha \text{ constante} \Rightarrow \begin{cases} \beta_T = 6,3^o - 7,68^o = -1,38^o \;;\; \beta_A = 7,3^o - 7,68^o = -0,38^o \\ \beta_B = 16^o - 7,68^o = +8,32^o \;;\; \beta_C = 28^o - 7,68^o = +20,32^o \end{cases}$$

$$\text{Con } \alpha \text{ variable} \Rightarrow \begin{cases} \beta_T = 6,3^o - 6,36^o = -0,06^o \;;\; \beta_A = 7,3^o - 7,03^o = +0,27^o \\ \beta_B = 16^o - 8,35^o = +7,65^o \;;\; \beta_C = 28^o - 8,97^o = +19,03^o \end{cases}$$

que determinan el ángulo β que forma la cuerda en cada sección del perfil de la pala, respecto al plano de rotación.

IV.5.- DISEÑO Y CALCULO SIMPLIFICADO DE LOS AEROGENERADORES EÓLICOS LENTOS DE EJE HORIZONTAL. MOLINOS MULTIPALA

Las máquinas eólicas de este tipo son de ***arrastre***, y aprovechan la componente de la fuerza del viento perpendicular a la superficie de sus aspas, palas o aletas. El ***molino americano*** es un aerogenerador lento, Fig IV.11, que hizo su aparición hacia 1800; está formado por un rotor compuesto por un número de palas que puede oscilar entre 12 y 24 y que cubren casi toda la superficie del cubo. Su diámetro suele ser del orden de 5 a 8 metros; diámetros mayores originarían un excesivo peso del rotor que dificultaría el arranque; suelen ponerse en funcionamiento con vientos de 2 a 3 m/seg, aunque no alcanzan su potencia máxima hasta velocidades mayores. El rotor está conformado por delgadas placas metálicas, de perfil no aerodinámico, prácticamente planas, con una cierta orientación; el viento ejerce sobre ellas una fuerza de arrastre que provoca el par de giro.

La ***potencia nominal*** de estas máquinas suele darse para velocidades del viento del orden de 5 m/seg y se puede expresar, en primera aproximación, mediante la fórmula:

$$N = 0,15\, D^2 v^3 \;, \quad \text{siendo: } \begin{cases} N \text{ la potencia en W} \\ D \text{ el diámetro exterior del rotor en m.} \\ v \text{ la velocidad del viento en (m/seg)} \end{cases}$$

Su rendimiento máximo es del orden del 30% (aproximadamente el 50% del límite de Betz) con un TSR del orden de la unidad, (la periferia de la pala gira a una velocidad ***u*** igual a la velocidad del viento ***v*** con la que es atacado el rotor). Su funcionamiento es muy simple, por cuanto el rotor acciona directamente un sistema biela-manivela, que mueve un émbolo produciendo un movimiento de vaivén, Fig IV.13. La utilización más común para estas máquinas es el bombeo de agua mediante una bomba de

émbolo que se ajustan bastante bien a las características del multipala, Fig IV.14.

La ***fuerza de arrastre*** F_x sobre una pala viene dada por la expresión:

$$F_{arr} = F_x = \frac{1}{2}\,\rho\, C_x c^2 S = \frac{1}{2}\,\rho\, C_x (v - u)^2 S$$

Si el rotor está en reposo, la velocidad periférica tangencial ***u*** de la pala es cero, y se tiene la fuerza máxima que actúa sobre la pala, cuando ésta esté perpendicular a la dirección del viento. Si se multiplica esta fuerza de arrastre máxima por el radio, tomado a partir del eje de giro, se obtiene el par motor de arranque que precisa la pala para comenzar a girar.

El par neto (resultante) tiene en cuenta la máquina completa y será menor, porque el viento está actuando a la vez sobre otras palas que se presentan a su acción, lo que retrasa y frena la rotación.

El ***par motor a velocidad nominal*** es:

$$C = r\,F_{arr} = \frac{r}{2}\,\rho\, v^2 S\, C_y \frac{\operatorname{sen}(\theta - \alpha)}{\operatorname{sen}^2\theta \cos\alpha}$$

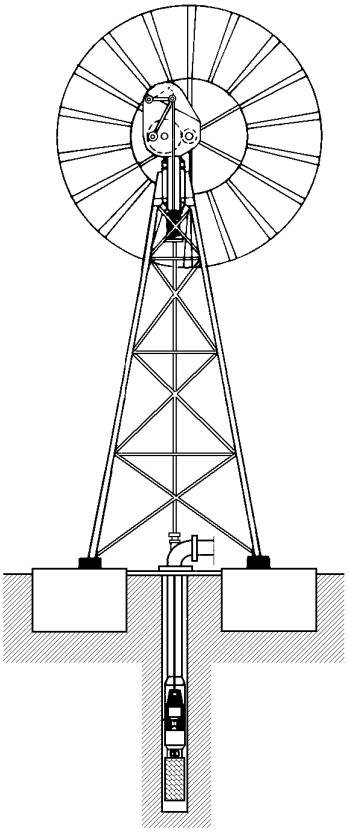

Fig IV.11
Molino multipala con bomba de pistón

La potencia útil desarrollada por una máquina de arrastre es igual a la fuerza de arrastre multiplicada por la velocidad periférica tangencial de rotación de la pala ***u***, es decir:

$$N_{útil} = \frac{1}{2}\,\rho (v - u)^2\, u\, S\, C_x = \frac{\rho\, v^2 S\, C_y}{2}\;\frac{\operatorname{sen}(\theta - \alpha)}{\operatorname{sen}^2\theta \cos\alpha}$$

Cuando la velocidad periférica ***u*** de la pala aumenta, la fuerza de arrastre disminuye rápidamente, y sin embargo, la energía generada a partir del viento crece.

Cuando la velocidad ***u*** de la pala sea 1/3 de la velocidad ***v*** del viento, en circulación libre y régimen de funcionamiento normal, se produce la máxima generación de energía eólica.

Tabla IV.5.- Datos de multipalas americanos

Diámetro del rotor	Número de r.p.m.		Potencia en kW	
metros	v = 5 m/seg	v = 7 m/seg	v = 5 m/seg	v = 7 m/seg
1	95	133	0,018	0,05
2	47,5	66,5	0,073	0,4
3	31,9	44,5	0,165	0,45
4	23,8	33,2	0,295	0,85
5	19	26,6	0,46	1,42
6	16	22,2	0,67	1,8
7	13,6	19	0,92	2,5
8	11,9	16,6	1,2	3,3
9	10,5	14,8	1,52	4,2
10	9,5	13,3	1,87	5,15

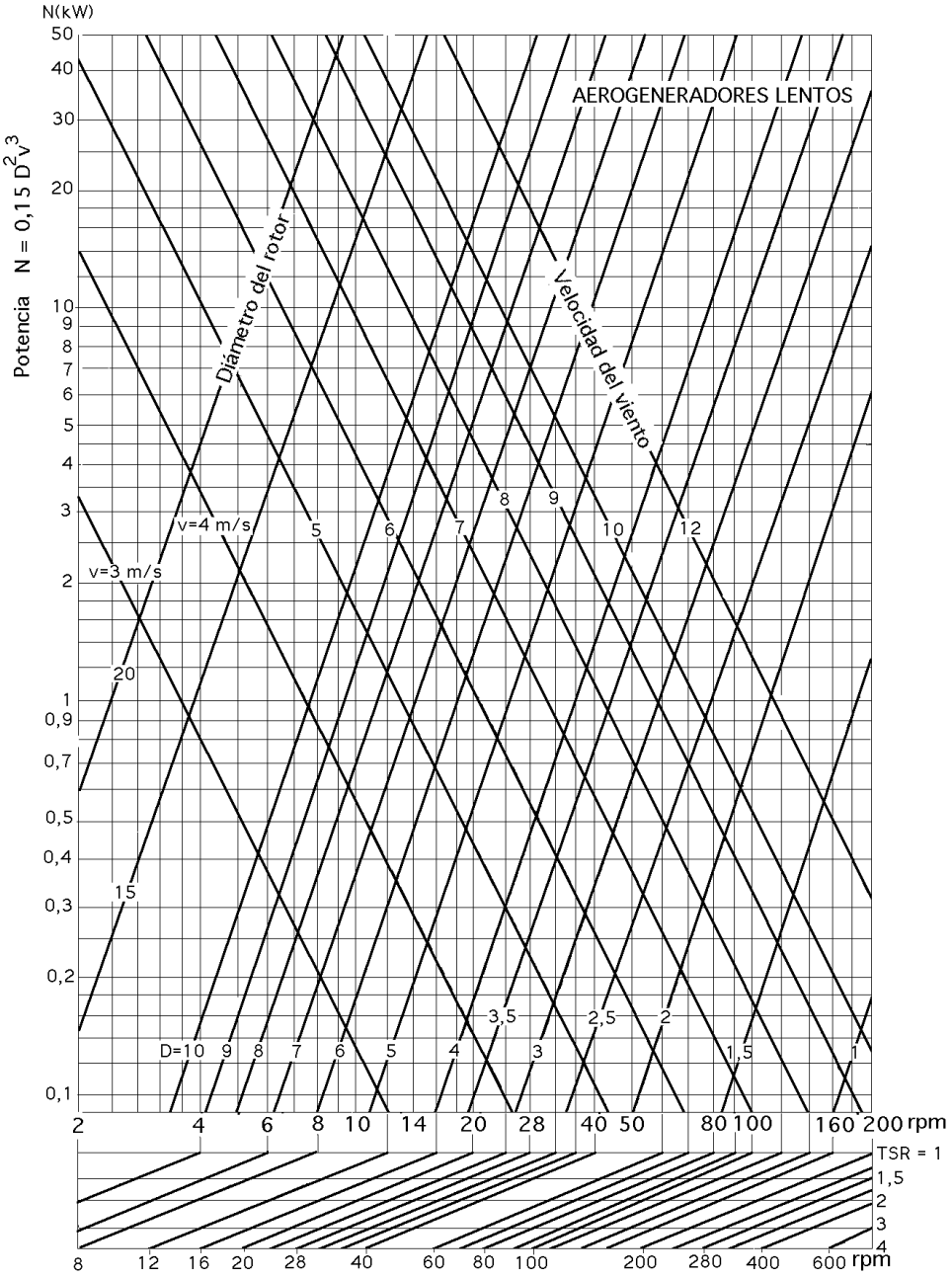

Fig IV.12.- Diagrama para la determinación de la potencia en aerogeneradores lentos

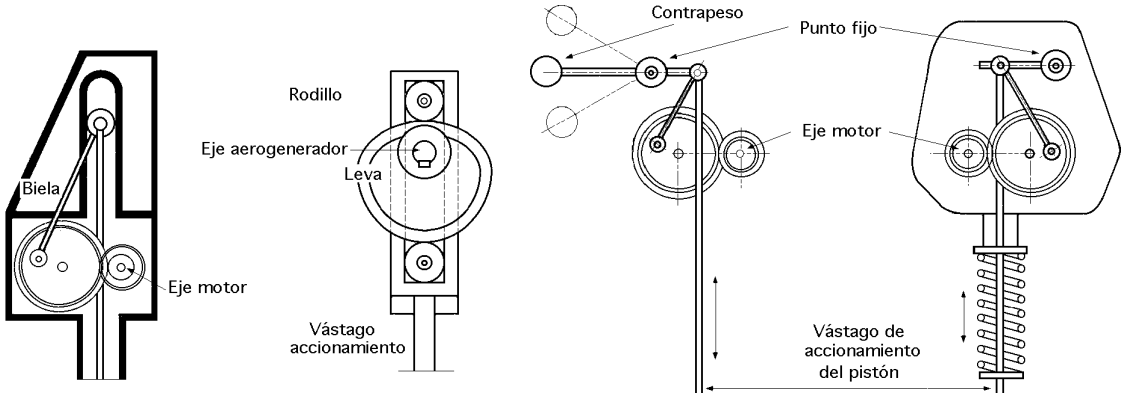

Fig IV.13.- Dispositivos de transmisión del movimiento del molino multipala a la bomba

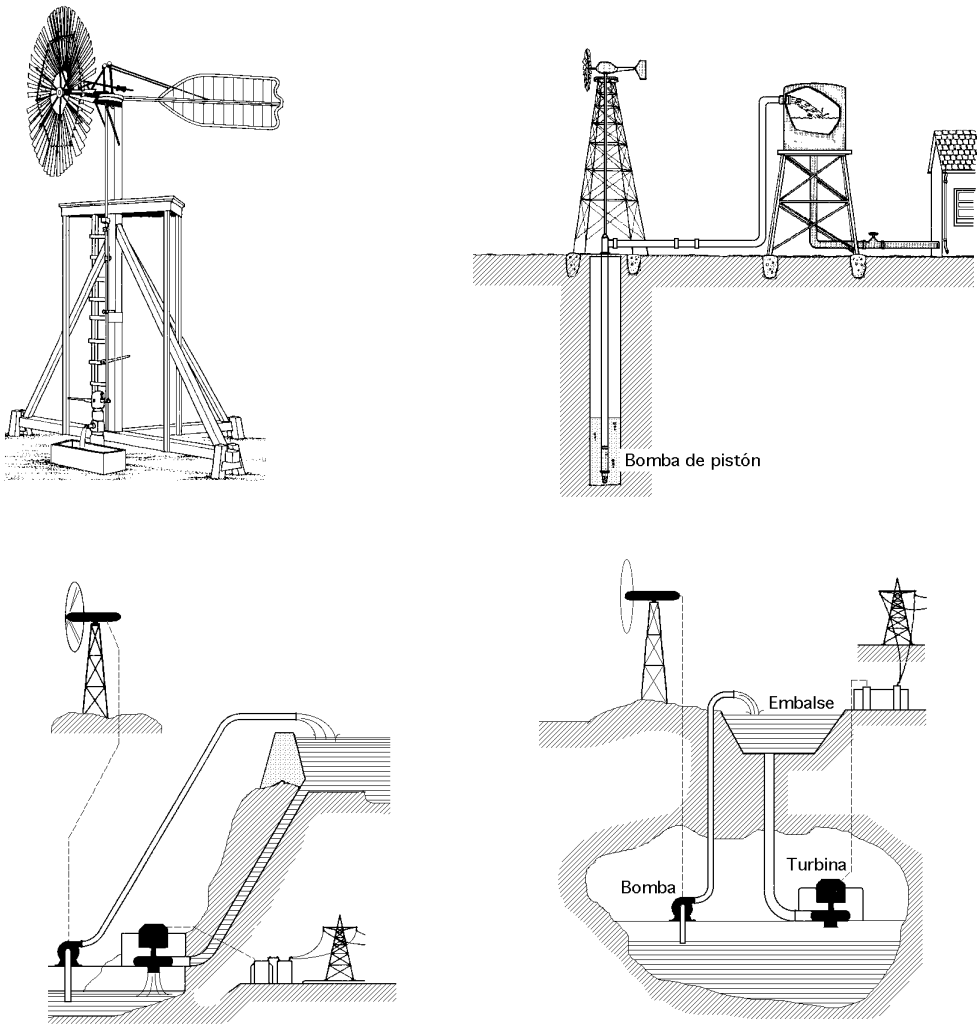

Fig IV.14.- Algunas aplicaciones de bombeo de los multipala

IV.6.- DESCRIPCIÓN Y POSIBILIDADES DE LOS AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

Las máquinas de arrastre diferencial presentan la ventaja de evitar todo tipo de dispositivos de orientación a causa de su configuración simétrica y de su construcción, que es muy simple.

ANEMÓMETRO.- El modelo más sencillo de instrumento de arrastre diferencial es el anemómetro de cucharillas. El movimiento de rotación de las máquinas de este tipo se funda en el movimiento que el viento ejerce sobre los cuerpos huecos o disimétricos originando fuerzas de intensidad muy diferente según la orientación de los cuerpos respecto a la dirección del viento. Por tanto, si el viento actúa sobre la parte hueca (cóncava) de una semiesfera, siendo C el coeficiente aerodinámico, la fuerza actuante es:

$$F = \frac{\rho\, C\, S\, v^2}{2}$$

Para ($10^4 < Re < 10^6$), los valores de C_w para semiesferas y semicilindros vienen indicados a continuación, observándose que debido a la disimetría de los elementos constituyentes se originan unas diferencias en las resistencias que se oponen al desplazamiento del aire, cuya acción sobre el conjunto del dispositivo se traduce en la aparición de un par motor sobre el eje y la rueda se pone en movimiento.

Una teoría aproximada del molino de eje vertical del tipo de acción diferencial simple consiste en su-

poner que el centro de las paletas gira con una velocidad periférica $u = \frac{R\,w}{2}$ en un viento de velocidad ***v***.

Las fuerzas aerodinámicas que se ejercen sobre las palas bajo la acción del viento son aproximadamente proporcionales a $(v-u)^2$ y $(v+u)^2$, por lo que la potencia útil desarrollada por el molino se puede poner en la forma:

Hemisferio hueco ***Semicilindro***

$C_w = 0{,}34$ $C_w = 1{,}42$ $C_w = 0{,}42$ $C_w = 1{,}17$

$$N_{útil} = \frac{\rho\, S\,\{C_1 (v-u)^2 - C_2 (v+u)^2\}\, u}{2}$$

donde C_1 y C_2 son dos coeficientes que se suponen constantes.

Esta potencia es máxima cuando: $u_{ópt} = \frac{2\,a\,v - v\sqrt{4\,a^2 - 3\,b^2}}{2}$, en la que: $\begin{cases} a = C_1 + C_2 \\ b = C_1 - C_2 \end{cases}$

Para: $\begin{cases} C_1 = 3\,C_2 \quad \Rightarrow \quad u_{ópt} = \frac{v}{6} \\ C_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad u_{ópt} = \frac{v}{3} \end{cases}$

En la práctica se verifica que el rendimiento de las ruedas del tipo de acción diferencial simple, es máximo para valores del TSR = 0,3 ÷ 0,6

AEROGENERADOR SAVONIUS.- El aerogenerador Savonius fue inventado por el finlandés de igual nombre en el año 1924 y patentado en 1929. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia, Fig IV.15. Las fuerzas que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa son diferentes, como sabemos, y ello hace que el conjunto gire alrededor de un eje.

Para el rotor Savonius de dos palas o canaletas, el coeficiente de arrastre es aproximadamente la unidad para el curvado cóncavo (intradós), y oscila entre 0,12 y 0,25 para la parte opuesta (extradós) a donde sopla el viento. Estos valores no coinciden con los indicados anteriormente debido a la interferencia de las palas, como se observa en la Fig IV.16, ya que el rotor siempre está sometido a un par aerodinámico suplementario debido a las dos desviaciones sucesivas que experimenta el viento por efecto de las palas, llegando a formar esta desviación un ángulo de 180º, Fig IV.16ab.

Con estos datos se puede calcular fácilmente la fuerza de arrastre, resultante de la diferencia de las fuerzas de arrastre correspondientes a los dos flancos, así como el par motor neto del aparato.

Hay que utilizar la velocidad (v + u) en la pala que está, en un momento determinado, en la parte en que sopla el viento presentando al mismo su parte cóncava (intradós) y (v - u) en la parte convexa (extradós).

CÁLCULOS

Fuerza de arrastre: $F_{arr} = \frac{1}{2}\,\rho\, S\,\{(v+u)^2 - 0{,}2\,(v-u)^2\}$

Potencia: $N_{útil} = \frac{1}{2}\,\rho\, S\,\{(v+u)^2 - 0{,}2\,(v-u)^2\}\,u$

Para valores de C_y del orden de 0,3 se admite, en primera aproximación, que: $N_{útil} = \frac{1}{2} \rho S C_y u^3$

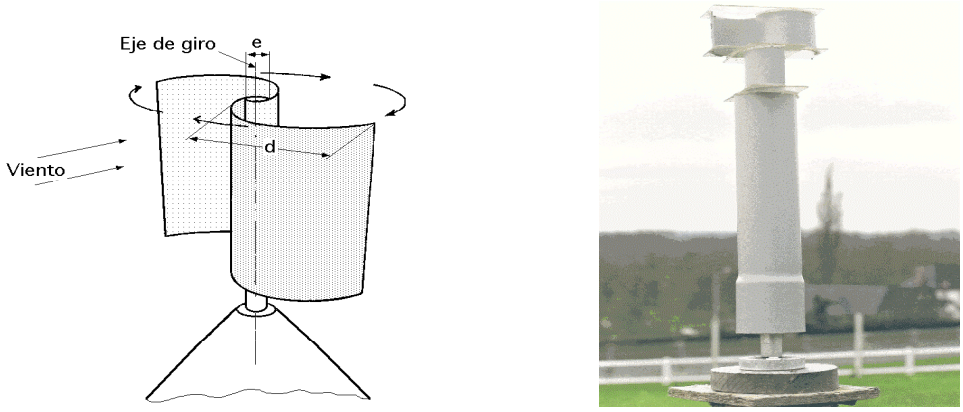

Fig IV.15.- Aerogenerador Savonius

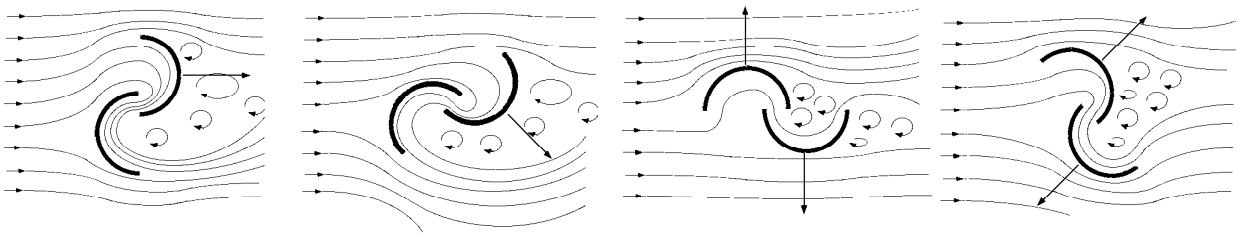

Fig IV.16.- Líneas de corriente en un rotor Savonius

Otra expresión para la potencia útil en función del factor ***k*** de conversión de la energía del viento es:

$$N_{útil} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta k$$

en la que para ***v*** expresada en m/seg, A en m2, y k = 0,00136, se obtiene la potencia en kW; si los semicilindros tienen un diámetro ***d*** se tiene: $A = h(2d - e)$

La potencia alcanza un valor máximo para velocidades ***u*** próximas a $\frac{v}{6}$.

El rendimiento del rotor viene dado por la gráfica de la Fig IV.17, para un valor dado del TSR; si el TSR es igual a 0,8 (que se corresponde con la potencia máxima), el valor del rendimiento es del orden de 0,15. Si se supone que las dimensiones del rotor son: altura, h= 3 m; diámetro, d= 0,5 m, y se desprecia la separación entre semicilindros, el área frontal A y la potencia útil generada son:

$$A = h \times 2d = 3 \text{ m}^2$$

$$N_{útil\ (kW)} = \frac{10^{-3}}{2} \times 1{,}25 \frac{kg}{m^3} \times v^3 \left(\frac{m}{seg}\right)^3 \times 3 \text{ m}^2 \times 0{,}15 = 0{,}2812\ v^3$$

Las fuerzas de sustentación y de arrastre aparecen por efecto Magnus; el rotor frena al viento por una parte (sotavento), mientras lo acelera por la contraria (barlovento).

La fuerza ascensional empuja lateralmente al rotor mientras que la fuerza de arrastre lo empuja hacia abajo.

Estas fuerzas se pueden expresar en la forma: $\begin{cases} F_{asc} = 1{,}08\ C_y\ \rho A v^2 \\ F_{arr} = 1{,}08\ C_x\ \rho A v^2 \end{cases}$

obteniéndose los coeficientes C_x y C_y a partir de la Fig IV.15, en función del TSR.

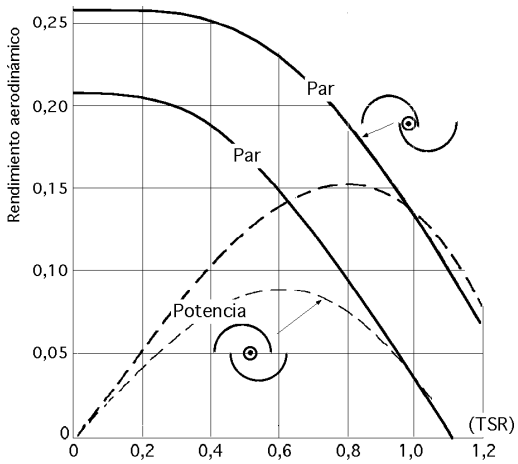

Fig IV.17- Rendimiento del rotor Savonius

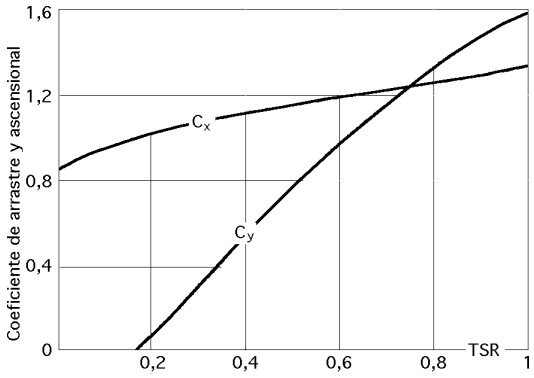

Fig IV.18.- Coeficientes del rotor Savonius

Para un TSR = 0,8 se obtiene $\begin{cases} C_y = 1{,}4 \\ C_x = 1{,}2 \end{cases}$ por lo que suponiendo una velocidad del viento de 10 m/seg se tiene:

$$\begin{cases} F_{asc} = 1{,}08 \times 1{,}4 \times 1{,}25 \times 3.10^2 = 567 \text{ kg} \\ F_{arr} = 1{,}08 \times 1{,}2 \times 1{,}25 \times 3.10^2 = 486 \text{ kg} \end{cases} \Rightarrow F_{total} = \sqrt{F_{asc}^2 + F_{arr}^2} = \sqrt{567^2 + 486^2} = 746{,}8 \text{ kg}$$

que es la carga total que tiene que absorber el soporte de la estructura.

DISEÑO.- Para diseñar un rotor Savonius hay que conocer de antemano las opciones que pueden existir, que incluyen espaciados entre palas, número de palas, esbeltez y posicionamiento de las mismas y discos laterales que conforman las bases de apoyo, como se indica en las Fig IV.19, presentando diversas opciones; se observa que la e tiene una mayor esbeltez que la f, mientras que la g mejora el rendimiento del rotor a bajas rpm, así como la energía liberada para un determinado campo de velocidades del viento.

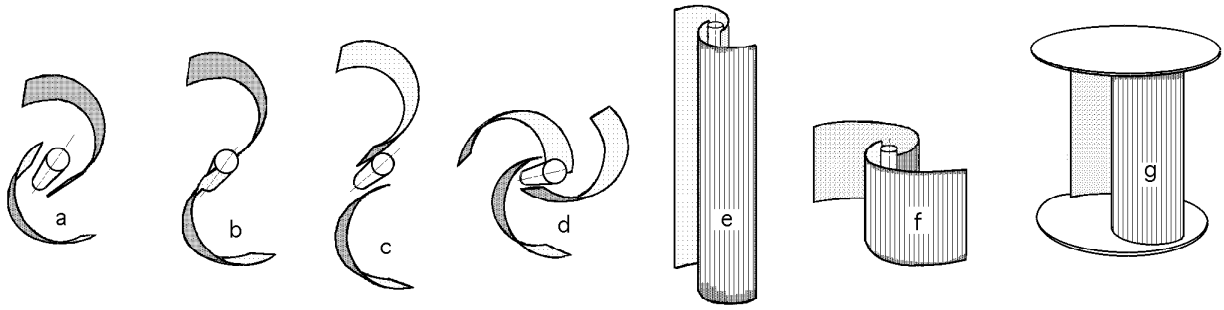

Fig IV.19.- Diversas opciones de diseño de un rotor Savonius

REGULACIÓN.- Por lo que respecta a la regulación sabemos que para un rotor de palas se utilizan formas de orientación y gobierno que actúan en el sentido de preservar a la máquina de la acción del viento para no encontrarse bajo estas fuerzas aceleratives.

Cuando el rotor Savonius se embala es muy difícil de gobernar; si para disminuir la velocidad de rotación se le aplica un freno, el par ejercido sobre el rotor aumenta y puede llegar a averiarle, por lo que este sistema de frenado no es el adecuado.

Si las palas (canaletas) se mueven de forma que el rotor Savonius se convierta en un cilindro, la superficie resultante, cilíndrica, no estaría en condiciones de realizar un trabajo y, por lo tanto, ésta es la forma más usual de regulación en este tipo de rotores; en esta situación, por lo tanto, dejaría de comportarse como tal máquina eólica.

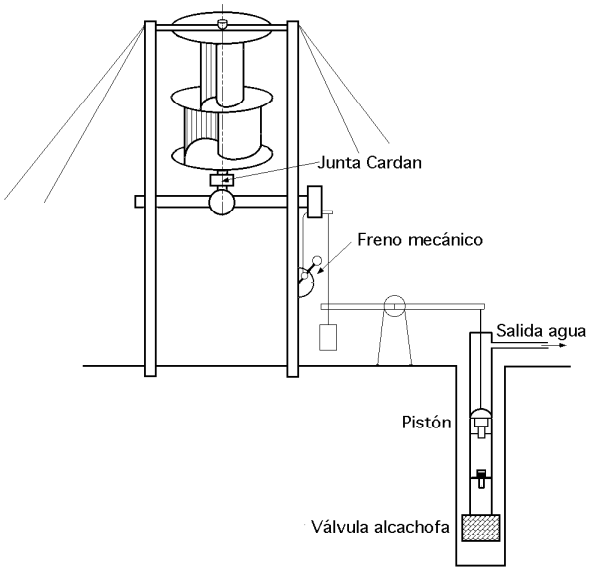

Fig IV.20.- Instalación de bombeo mediante un rotor Savonius

AEROGENERADOR DARRIEUX.- Los aerogeneradores de eje vertical fueron recuperados por Darrieux en los años veinte. El rotor Darrieux fue patentado en 1931, y está constituido por hojas perfiladas que giran alrededor de un eje vertical. En la Fig IV.21 se muestra un ejemplo de rotor Darrieux de tres hojas de aluminio extruido; el alternador síncrono gira a 1500 rpm y la relación de velocidades (alternador-rotor Darrieux) es de 16,78. En lo alto del mástil lleva un anemómetro y un sensor de vibraciones, a cuyas señales anómalas el Darrieux se frena. Para evitar sobrecargas y exceso de velocidad en el alternador, se colocan unos contrapesos ensamblados en las hojas del aparato para absorber la energía extra del viento durante los períodos de alta velocidad; el peso total es de 3 Tm y la potencia generada en el alternador es de 25 kW para velocidades del viento del orden de 12 m/seg.

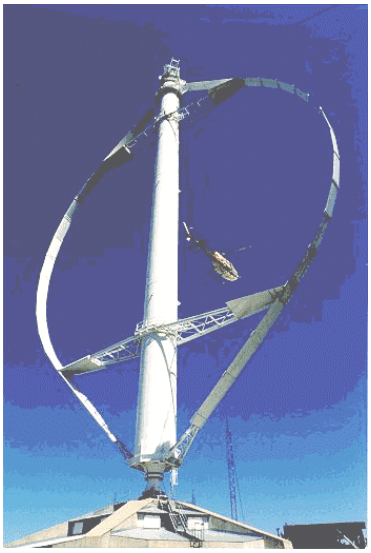

Fig IV.21.- Aerogenerador Darrieux

Los Laboratorios Sandia (New México), construyeron en 1977 una aeroturbina de 17 m de diámetro y una potencia de 70 kW, Fig IV.23. Ese mismo año, la National Research de Canadá encarga la construcción de una máquina de 24 m de diámetro y 200 kW de potencia, que se instaló en la isla Magdalena, acoplada a una planta Diesel. El prototipo funcionó durante un año antes de que las palas acabaran por romperse. Posteriormente los Laboratorios Sandia desarrollaron otro modelo de 120 kW de potencia y 34 m de diámetro. En USA se han diseñado modelos comerciales de aerogeneradores Darrieux, con potencias de 150 y 250 kW y en California existen parques eólicos con turbinas de este tipo que alcanzan los 30 MW.

En Europa, el programa eólico holandés ha dedicado una especial atención a este tipo de turbinas. Dadas las dificultades para encontrar emplazamientos adecuados a las grandes turbinas de eje horizon-

tal, los holandeses intentan desarrollar modelos Darrieux de potencia media con menores requerimientos desde el punto de vista de la utilización del suelo. Después de fabricar máquinas de baja potencia con el fin de adquirir experiencia en este campo y contrastar modelos y métodos de análisis, la Fokker diseñó y construyó un prototipo de 400 kW.

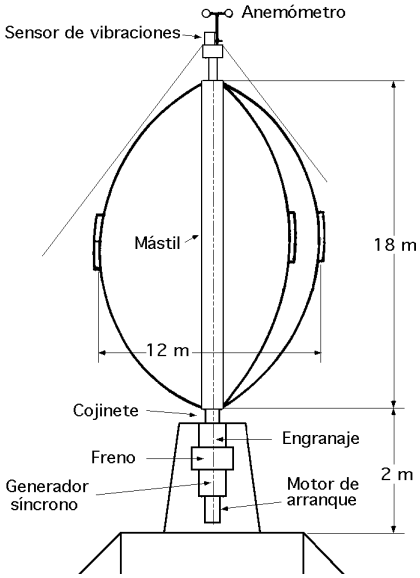

Fig IV.22.- Dimensiones de un rotor Darrieux de 25 kW

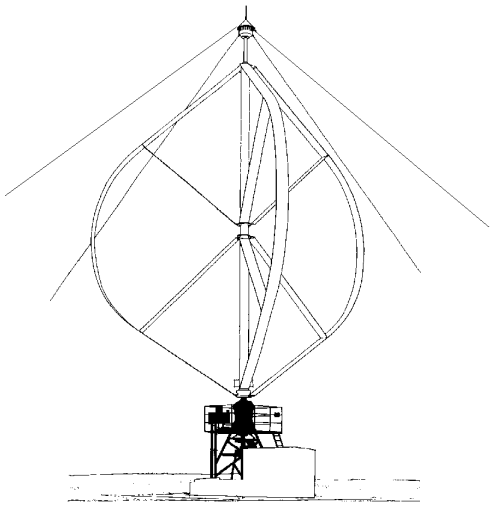

Fig IV.23.- Aeroturbina Darrieux de 70 kW (Lab. Sandia, Albuquerque, New México)

POTENCIA Y PAR MOTOR.- La fuerza ascensional o de sustentación en un rotor Darrieux, es la producida en el perfil según una dirección perpendicular a la dirección del viento aparente. En la Fig IV.24 se observa que para un rotor Darrieux la fuerza ascensional modifica continuamente su dirección, sentido y magnitud, dependiendo de la posición de las aspas respecto al viento, y es la que vería un observador situado sobre el propio perfil.

La ***fuerza ascensional*** viene dada por: $F_{sust} = F_y = \frac{1}{2} \rho C_y S c^2$

La ***potencia*** desarrollada por el aparato es: $N = \frac{1}{2} \rho C_y S c^3$

En la Fig IV.26, se ha hecho la representación (η_{aerod}-TSR), para un rotor Darrieux; se observa que el rotor tiene que ser acelerado cuando su TSR sea menor de 2.

Esta aceleración se puede conseguir mediante un motor de arranque, como por ejemplo el representado en la Fig IV.27, que consiste en dos turbinas Savonius acopladas al eje de la turbina principal, para así poder pasar a un TSR de funcionamiento normal, en que será accionado únicamente por la acción del viento; el prototipo indicado tiene una potencia de 20 kW, (Instituto de Climatología y Meteorología de Hannover, Alemania) . En la Fig IV.28 se indica la influencia de la suciedad de las hojas de un rotor Darrieux en la potencia, cuando se ensucian con el paso del tiempo. En la Fig IV.29 se muestra un prototipo giromill en el que se observa las posiciones de frenado y de trabajo normal de las hojas.

Aunque hasta el momento todas las aeroturbinas Darrieux construidas no han sobrepasado el rango de las potencias medias, el campo de las grandes potencias no está vedado a los sistemas de eje vertical. A medida que se ha ido adquiriendo experiencia práctica se han emprendido proyectos cada vez más ambiciosos; así, a finales de los sesenta, South y Rangi, en el National Research Council de Canadá, comenzaron los estudios y ensayos sobre unas turbinas de este tipo que, hoy en día, constituyen uno de los modelos eólicos de interés.

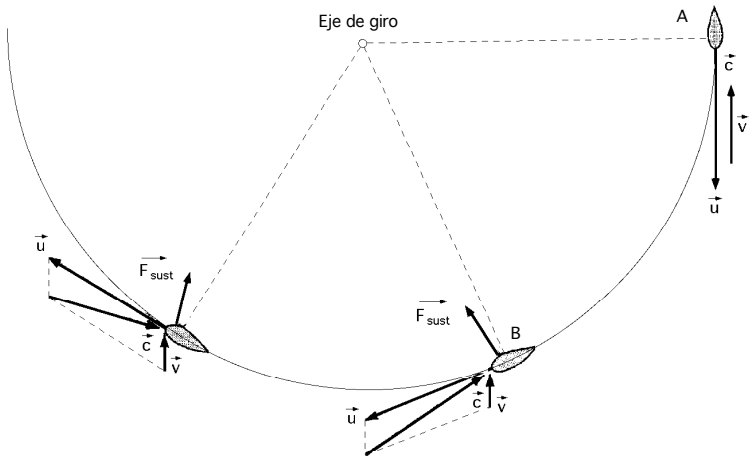

Fig IV.24.- Modificación de la fuerza ascensional en un rotor Darrieux

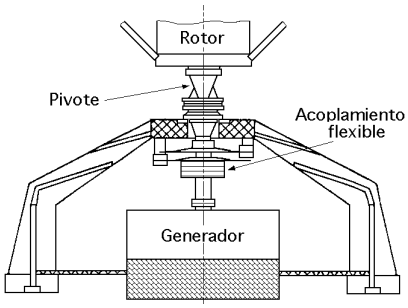

Fig IV.25.- Sistema soporte del rotor Darrieux

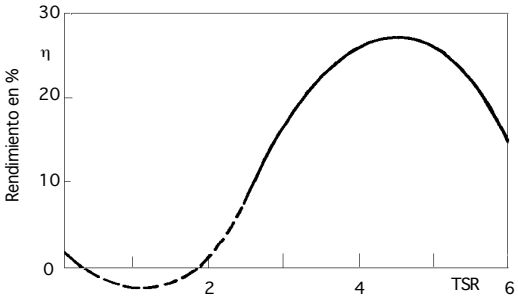

Fig IV.26.- Curva, $\{\eta_{aerod}\text{-TSR}\}$, rotor Darrieux

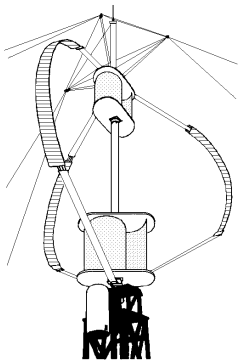

Fig IV.27.- Aerogenerador Darrieux con dos Savonius acoplados, que actúan como motor de arranque

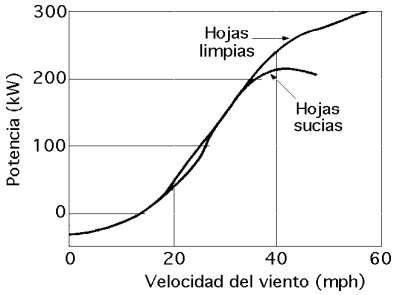

Fig IV.28.- Efecto de la suciedad sobre las hojas de un rotor Darrieux

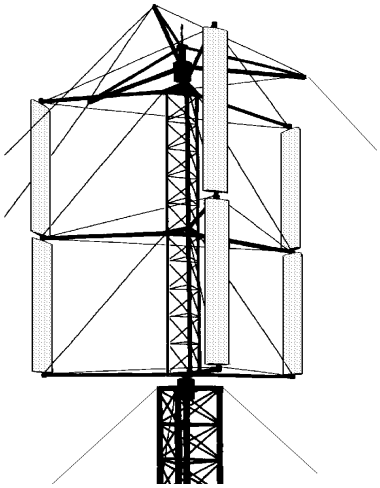

Fig IV.29.- Prototipo giromill 500 kW MacDonnell-Douglas

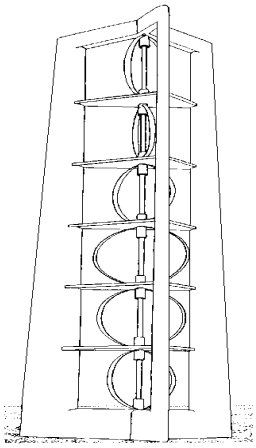

Fig IV.30.- Torre de 6 aerogeneradores Darrieux acoplados en serie

Así, por ejemplo, el proyecto Eolo canadiense consistía en una turbina de 4 MW que fue instalada en Cap Chat, Quebec, en 1987. El aerogenerador, de 2 palas y 98 m de altura, tiene un diámetro ecuatorial de 64 m y es una de las mayores instalaciones construidas hasta el momento.

A finales de 1991 había completado 14.000 horas de operación, si bien con algunos problemas de agrietamiento en las palas.

Otra planta de 1,2 MW diseñada por J. Fischer, utiliza varias aeroturbinas Darrieux acopladas en serie, e instaladas por pisos en una torre de gran altura, Fig IV.30.

IV.7.- OTROS TIPOS DE MAQUINAS EÓLICAS

Después del desarrollo de generadores de hélice de grandes dimensiones, la búsqueda de nuevos modelos para generar potencias superiores a los 100 MW ha conducido a sistemas básicamente distintos a los tradicionales, como:

Sistemas difusores.- La forma más simple de incrementar la eficacia del rotor es incluirle en el interior del difusor de una tobera.

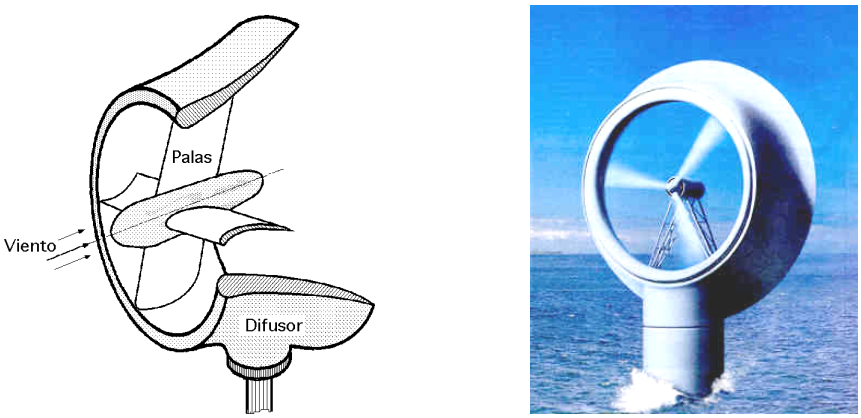

Fig IV.31.- Sistema difusor

El rotor y las palas se incluyen dentro de un conducto de forma cónica o simple embocadura de tobera, con el fin de acelerar la velocidad del viento que incide sobre las palas de la hélice; de este modo se consigue una eficacia teórica superior a tres veces la correspondiente a una aeroturbina ordinaria.

Alas en delta.- Los concentradores de viento Fig IV.32, que tienen forma de ***ala en delta*** generan vórtices a ambos lados de la misma, lo que permite concentrar la energía del viento sobre un par de turbinas eólicas estratégicamente situadas.

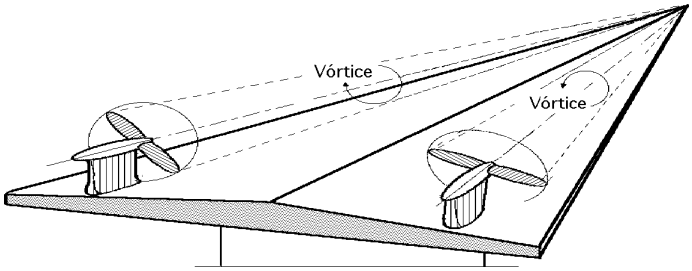

Fig IV.32.- Concentrador de viento tipo ala en delta

Es de esperar que la producción de energía por turbinas impulsadas por los vórtices marginales sea diez veces superior a la obtenida en las turbinas libres, pero hasta la fecha este sistema no ofrece mejoras de rendimientos sobre los convencionales de eje horizontal o vertical.

Generador Andreu-Enfield.- El generador Andreu-Enfield, Fig IV.33, tiene sus palas huecas, y giran por la acción del viento exterior que incide sobre ellas como una máquina eólica normal, lo que provoca la expulsión del aire en ellas contenido, que sale despedido bruscamente por los extremos de las mismas, por efecto de la fuerza centrífuga originada en el giro, generando una depresión o vacío parcial en su interior, que permite la aspiración de aire por la parte inferior de la estructura, el cual hace girar una turbina eólica de eje vertical conectada a un generador situado en su parte inferior.

Sistemas tipo tornado.- Otro aspecto de utilización de la energía eólica que ha sido objeto de numerosos estudios y proyectos de plantas de gran potencia son los generadores ciclónicos.

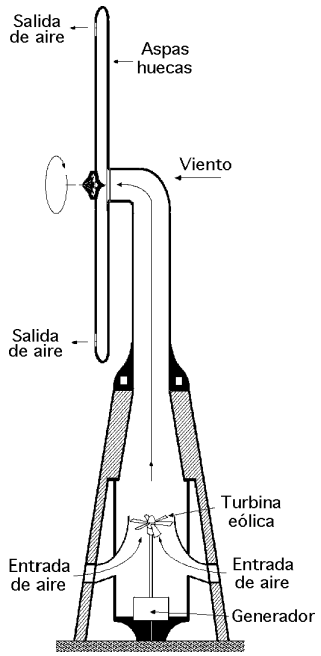

Fig IV.33.- Generador Andreu-Enfield

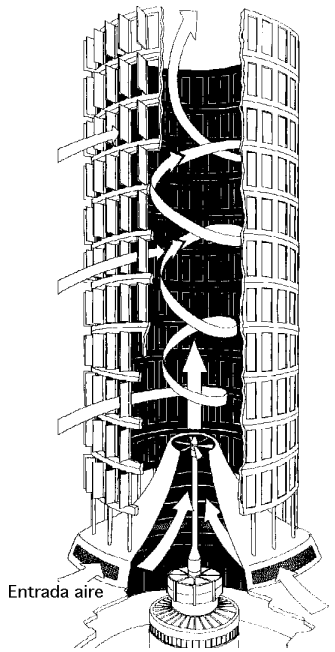

Fig IV.34.- Turbina tipo tornado

Este sistema, totalmente diferente de los que hemos visto hasta ahora, está inspirado en el principio que utiliza la naturaleza al generar energía en tornados, ciclones y huracanes; el viento sopla tangencialmente sobre una torre cilíndrica y penetra en su interior a través de deflectores, produciendo un tornado en su interior.

El vacío creado en el centro del vórtice produce una succión en el fondo de la torre, formándose una corriente vertical que se va acelerando en su movimiento ascendente, generando una depresión en su centro que mueve las turbinas axiales por el efecto de succión, Fig IV.34.

Los primeros antecedentes de este tipo de generadores corresponden al meteorólogo americano Ringleb (1962), aunque existen ciertos grabados de Leonardo da Vinci en los que aparecen unas máquinas movidas por un efecto parecido.

El desarrollo experimental de los generadores ciclónicos fue realizado por L. M. Michaud y J. Yen, siendo el proyecto de este último apoyado por el Gobierno federal de los EE.UU.

Los cálculos realizados parecen demostrar que la velocidad de rotación del aire en el vórtice del ciclón (en una zona comprendida entre el centro y 1/7 del radio del cilindro) puede alcanzar valores diez veces superiores a la que se obtiene en la pared del cilindro.

La velocidad vertical de salida, que es la que se utiliza para mover la turbina, es nula en la pared y crece hacia el centro vórtice, alcanzando valores entre siete y ocho veces la del medio circundante. Ciertas estimaciones parecen indicar que se pueden obtener potencias entre cien y mil veces mayores

que las que se obtendrían con sistemas eólicos convencionales con la misma superficie de captación.

El prototipo diseñado por el profesor Yen, con una potencia nominal de 15 MW, fue ensayado en túneles aerodinámicos; un problema aún no resuelto era el enorme ruido que provocaba el tornado en la torre; los estudios teóricos demostraron que la energía que puede suministrar una chimenea vertical es del orden de cien veces superior a la de una máquina eólica convencional con el mismo viento. En esta torre de conversión ciclónica, la turbina y el generador están situados, donde se producen los vórtices, en la base de la torre de 15 metros de altura y 8,5 m de diámetro.

Los deflectores son fijos y las válvulas de las compuertas de admisión del aire se accionan por el propio flujo del viento; el aire que entra por su parte inferior asciende caliente por la acción del Sol que provoca un efecto invernadero; en períodos nublados, la energía térmica necesaria para la formación del flujo inducido es suministrada por una cámara de combustión de hidrógeno, que calienta el aire; de este modo la fuerza del tornado se refuerza con la corriente de aire caliente al igual que en los tornados naturales, en los que los efectos convectivos térmicos se suman a los verticales.

Este tipo de sistema eólico podría superar las limitaciones de rendimiento del 60% impuestas por la teoría de Betz.

Chimenea eólico-solar.- Lugares ideales para este tipo de central son las regiones soleadas no accesibles a los métodos normales de explotación de la energía eólica; en Manzanares (Ciudad Real) se construyó una central piloto eólico-solar; tenía una chimenea de 200 m. de altura y 10 m. de diámetro, (con un peso de 200 Tm); estaba construida de chapa de acero galvanizado y ocupaba el centro de una cubierta de poliéster de 250 m. de diámetro. Esta planta, llevada a cabo por el Departamento alemán de Investigación Tecnológica en colaboración con Unión Eléctrica Española, aprovechaba la energía solar calentando una gran superficie de terreno mediante el efecto invernadero. El proyecto se desarrolló a partir de una idea original del profesor Schlaich, del Leonhart und Andra de Stuttgart, y los cálculos y diseños de detalle se realizaron en el Instituto de Aerodinámica de la Universidad de Stuttgart, bajo la dirección del profesor Schwartz.

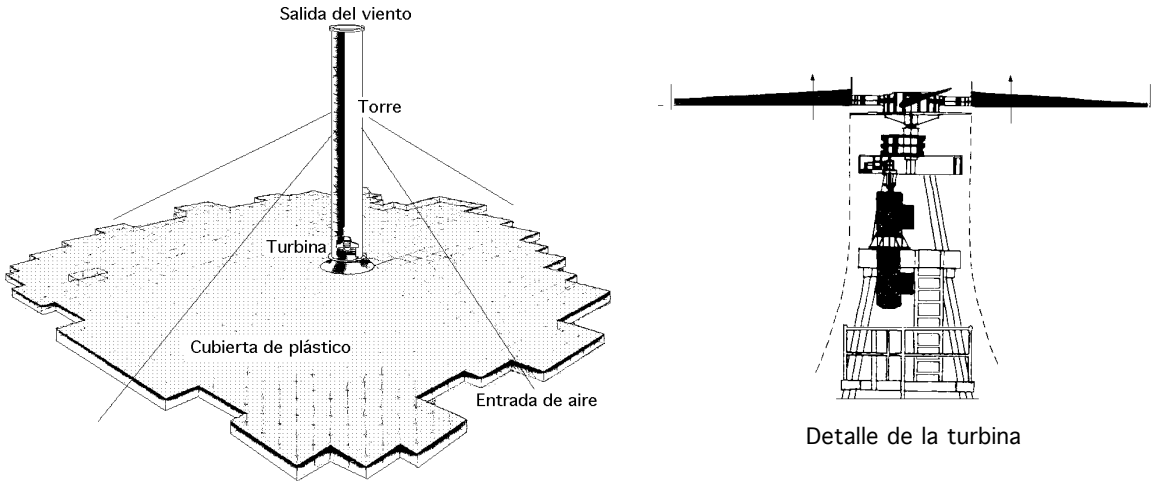

Fig IV.35.- Chimenea eólico-solar

El aire en contacto con el suelo se calentaba, y producía una corriente ascendente a través de una chimenea central en la que se disponía una aeroturbina que la transformaba en energía eléctrica. El modelo experimental, de 100 kW de potencia, se puso en marcha a principios de 1982, y ha funcionado durante ocho años antes de ser desmantelado. La chimenea eólico-solar era una central, en la que la energía, procedía del aire y del Sol, Fig IV.35, y combinaba tres técnicas, como: *El efecto invernadero, el*

efecto chimenea y las aspas del aerogenerador de viento

Los rayos solares atravesaban una enorme cubierta de plástico transparente, situada a una corta distancia del suelo, 2 m, y calentaban el aire que entraba por la periferia, entre 20°C y 50°C, que tendía a escapar por la chimenea situada en el centro de la cubierta; para favorecer este flujo, la cubierta ascendía en dirección a la torre-chimenea; el tiro de aire al ascender por la torre, podía alcanzar grandes velocidades y mover las aeroturbinas dispuestas en su interior, generando energía eléctrica.

El conjunto del turbogenerador estaba formado por una turbina, un regulador de caudal del aire y dos generadores de 150 kW y 40 kW, cuyo acoplamiento dependía del número de revoluciones de la turbina; una vez acoplado el generador de 40 kW, cuando éste alcanzaba las 1.000 rpm se efectuaba el paso al generador grande; en la misma forma, si la velocidad del viento disminuía por debajo de un cierto límite, automáticamente un relé desconectaba el generador de la red para no consumir energía en vez de producirla y la turbina giraba sin carga.

La calidad de la cubierta era fundamental, pues debía permitir la penetración de los rayos solares de corta longitud de onda e impedir el paso de los rayos de longitud de onda larga (infrarrojos) procedentes de la tierra. Al mismo tiempo debía poseer una gran resistencia mecánica, pues las fisuras o cortes en la lámina producirían fugas del aire con pérdidas del rendimiento; por ello, la vida de la cubierta, 25.000 m^2 de poliéster, frente a las influencias climatológicas (tormentas, granizo, etc.) fue crítica para el éxito del sistema, pues representaba aproximadamente el 45% de la inversión total.

En el centro de cada 6 m^2 de cubierta iba instalada una válvula de drenaje que normalmente estaba cerrada para evitar escapes de aire, y que durante períodos de lluvia se abría para permitir el drenaje y la limpieza de polvo y tierra acumulados en la superficie exterior.

En este tipo de sistemas la capacidad productiva crece (el coste disminuye) con la temperatura creciente bajo el colector por efecto invernadero, así como con la altura de la torre y con las dimensiones de la cubierta. La producción de energía depende de la irradiación solar y de las dimensiones de la instalación; el suelo se recubre de mantillo oscuro para favorecer la absorción de la radiación; el movimiento del aire en forma de chorro se produce a pesar de que fuera de la instalación, la calma puede ser absoluta.

Con una altura de chimenea de 900 m, un colector de 10 km de diámetro y 78,5 millones de m^2, se podrían alcanzar potencias de 1000 MW; con una chimenea de 800 metros de altura, en un emplazamiento ideal en un desierto de rocas con una irradiación solar media de 0,5 kW/m^2, se podrían generar 270 MW.

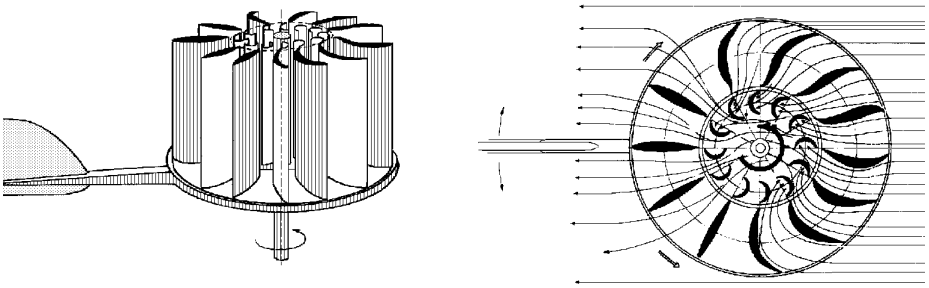

Fig IV.36.- Rotor Savonius con sistema difuso orientable por aleta de cola

Rotor Savonius con difusor.- Existe una variante del rotor Savonius que incluye un mecanismo difusor de álabes fijos, que a su vez se pueden orientar como conjunto mediante una aleta de cola. Esto permite dirigir el viento hacia un rotor con varias aspas, 10 o más, provocando su giro sin apenas efectos de frenado y mejorando por lo tanto su rendimiento, Fig IV.36.

Acoplamiento de las energías eólica y solar.- En muchos países la energía disponible del viento varía a lo

largo del año siendo máxima en los meses de invierno y mínima en los meses de verano, al contrario de lo que ocurre con la energía solar. Por lo tanto, un sistema mixto de captación eólica solar podría ser útil en aplicaciones de calefacción ambiental. Las variaciones diurnas de la velocidad del viento suelen presentarse con cierto retraso respecto al máximo solar.

El método más simple consiste en disponer de una batería de colectores solares planos en una pared inclinada que favorece las corrientes de aire ascendentes y que en su parte superior posee un conjunto de turbinas difusoras de viento de modo que se suman los efectos eólicos con los solares.

Otra posibilidad es el acoplamiento de una torre eólica tipo Savonius, y un panel de células solares; si un día el tiempo es soleado y el viento está en calma, la energía procede del panel fotovoltáico, pero si al día siguiente puede estar nublado y con viento, la energía procederá entonces de la máquina eólica; una batería actúa como elemento que almacena la energía eléctrica, cualquiera sea su origen, como fuente de energía en aquellos días en que simultáneamente esté nublado y no haya viento.

IV.7.- ALGUNOS PROYECTOS UTÓPICOS

La atracción que representa una energía como la del viento, inagotable, gratuita y no contaminante ha dado lugar a un gran número de proyectos ambiciosos y de proporciones gigantescas que hoy nos parecen utópicos, pero que quizá podrán realizarse en el futuro; entre ellos citamos los siguientes:

Proyecto Heronemus.- El profesor Heronemus, USA, proyectó la construcción de 30.000 torres eólicas, de 250 metros de altura provistas de 20 aeroturbinas de 15 metros de diámetro.

Estas torres se distribuirían en las grandes llanuras que se extienden desde Texas al Canadá con una torre por milla cuadrada; ésta empresa representaría la construcción de una torre por cada 1000 ciudadanos americanos con un total de 600.000 generadores con sus correspondientes aparatos de almacenamiento de energía. En conjunto, el proyecto supondría una producción eléctrica de 190.000 MW (equivalente a 150 centrales nucleares de la generación actual), y produciría más del 50% de la energía eléctrica consumida hoy en USA. Incluso se prevé el aprovechamiento de la energía eólica instalando torres con aerogeneradores de 2 MW flotando sobre lagos y océanos. La energía eléctrica generada se destinaría a la obtención de hidrógeno procedente de la electrólisis del agua.

Proyecto de Ezgar Nazare.- E. Nazare (Francia) propuso la construcción de una torre ciclónica a instalar en el Sáhara con una chimenea convergente divergente entre 300 y 600 metros de altura y 300 metros de diámetro en la base. El tiro por la chimenea aspira aire caliente a ras del suelo y se eleva a gran velocidad hacia las capas frías de la parte superior de la torre. Una o más turbinas situadas en la sección más estrecha de la torre producirían hasta 1.000 MW durante las horas más cálidas del día.

Proyecto Aurora.- F.Moissin-Franckhauser propuso la idea de un generador formado por una inmensa vela de 450 metros de radio sujeta por cables de 2 km a un buque dotado de máquinas eólicas, que al ser propulsado por la vela transformarían su energía cinética en electricidad. Para una vela a 500 m de altura, se podría proporcionar una potencia de 1.000 MW que se destinaría a la fabricación de hidrógeno y metanol a partir de la electrólisis del agua.

Proyecto Heidman.- Consistía en el aprovechamiento total de la energía eólica del viento mistral a lo largo del valle del Ródano y así sustituir 20 centrales nucleares de 500 MW.

Proyecto Valioukine.- Valioukine ha propuesto instalar en Rusia, en el trayecto de los vientos siberianos que soplan periódicamente a más de 100 km/h,un conjunto de 1.000 aerogeneradores de 20 metros de diámetro a lo largo de un cañón artificial, suministrando una potencia total de 7.000 MW.

Otra posibilidad es la de utilizar un conjunto de paracaídas dispuestos en fila y unidos mediante un

cable, conformando un circuito en forma de lazo; los paracaídas de una parte de este circuito se hinchan por la acción del viento, mientras que los de la parte opuesta se pliegan, estableciéndose así un movimiento circular que aprovecha el viento para accionar una polea situada sobre el buque anclado y que está acoplada a un generador eléctrico; pruebas mediante modelos (en laboratorio) demuestran que el método funciona con la ventaja de que su instalación es menos costosa que la de los sistemas de turbina convencionales. Otros proyectos prevén la posibilidad de aprovechar la energía de oscilación de los árboles sacudidos por el viento o las cargas electrostáticas producidas por la fricción del viento en la superficie de globos cautivos o el establecimiento de centrales eólicas en la troposfera que aprovecharían la gran regularidad de los vientos a gran altura, etc. Al margen de estos proyectos, que en algún momento llegaron a despertar cierto interés, todavía existen otros sistemas eólicos, tal vez con pocas posibilidades de desarrollo, pero cuyos diseños indican un elevado nivel de imaginación.

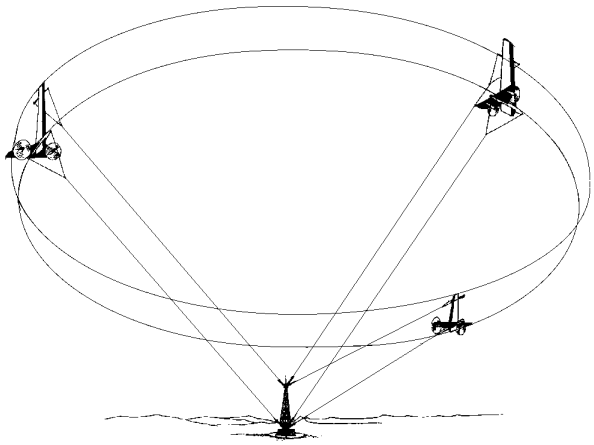

Fig IV.36.- Proyecto de una planta eólica de módulos aéreos provista de aerogeneradores que giran a gran altura (Herter)

Proyecto Obert.- El sistema aerostático diseñado por el profesor Obert se compone de seis aerogeneradores acoplados a un globo, que podría elevarse entre 5.000 y 10.000 m de altura, para operar con velocidades de viento muy superiores a las que se pueden obtener a nivel del suelo. Una planta de este tipo podría generar 20 MW e incluso alcanzar los 100 MW.

Proyecto Herter.- Otro ambicioso proyecto, también de 20 MW, es el del profesor E. Herter, que consistía en unas alas provistas de hélices y sobre las que se apoya otra ala vertical de 30 m de altura. El sistema formado por varios módulos se pone en funcionamiento mediante la ayuda de motores auxiliares que utilizan las hélices como impulsoras. Una vez estabilizados los módulos a 100 m de altura y describiendo círculos de 300 m de diámetro, las hélices actúan como aerogeneradores. Las alas horizontales proporcionan la sustentación necesaria para mantenerse en el aire, actuando igual que las alas de los aviones Fig IV.36. Las alas verticales generarían el impulso que debe vencer la resistencia aerodinámica y producir el empuje necesario para que el sistema siga girando. Dicho impulso es inducido sobre las alas verticales por la energía del viento, de la misma forma que actúa sobre las turbinas Darrieux. La superficie de barrido del sistema sería de 18.000 m^2 y las velocidades del viento a 100 m de altitud son muy superiores a las que se pueden encontrar a nivel del suelo. La electricidad se obtendría a través de los rotores y se enviaría a la estación localizada en la base de la torre por los cables de sujeción. Por el momento, la limitación de potencia de las grandes máquinas eólicas, 5 a 7 MW, supone una dificultad comparativa frente a otros sistemas energéticos. Sin embargo, la solución en el futuro parece ser la instalación de granjas de aeroturbinas. La separación entre turbinas debería ser del orden de diez veces su diámetro para evitar posibles fenómenos de interferencias, pero podría compensarse con la reducción de los costes de mantenimiento y de instalación.