

Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008

Módulo: Energía Eólica

Autor: Millán Esteban Cornejo

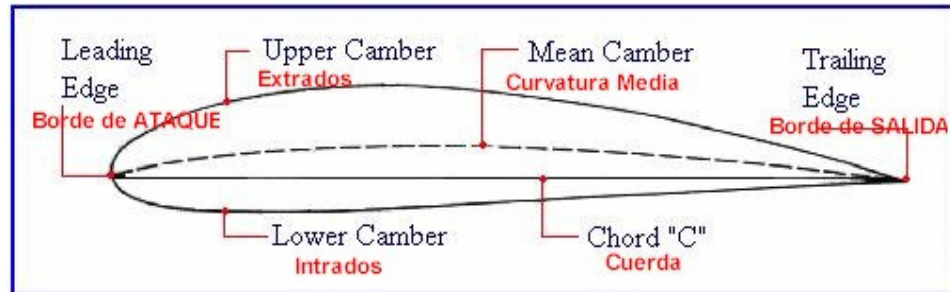
EL SISTEMA EÓLICO. DISEÑO AERODINÁMICO

Índice

1	AERODINÁMICA. CONCEPTOS GENERALES	3
2	PERFILES AERODINÁMICOS. COEF. DE SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA	4
3	TEORIAS AERODINÁMICAS EN AEROTURBINAS	5
3.1	TEORÍA DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO	5
3.2	LÍMITE DE BETZ	7
3.3	TEORÍA DEL ELEMENTO DE PALA.....	8
3.4	COMBINACION DE LA TEORÍA DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO Y DEL ELEMENTO DE PALA.....	9
4	ACTUACIONES DE LAS AEROTURBINAS. CURVA $C_p - \lambda$.....	12
4.1	ENVOLVENTE CURVAS $C_p - \lambda$	13
5	CURVA DE POTENCIA	14
6	COEFICIENTE. DE POTENCIA Y CURVA DE POTENCIA (PASO FIJO).....	16
7	COEFICIENTES DE POTENCIA Y CURVA DE POTENCIA (PASO VARIABLE).....	17
7.1	COEFICIENTE DE POTENCIA (PASO VARIABLE).....	17
7.2	CURVA DE POTENCIA (PASO VARIABLE).....	18
8	ESTUDIO PARAMETRICO DE ACTUACIONES PARA EL DISEÑO DE ROTORES DE EJE HORIZONTAL.....	19
8.1	NUMERO DE PALAS	21
8.2	FORMA EN PLANTA DE PALAS	22
8.3	DISTRIBUCION DE ESPESORES.....	25
8.4	DISTRIBUCION DE TORSION	26
8.5	ZONA NO AERODINAMICA	27
8.6	TIPO DE PERFIL AERODINAMICO	28
8.7	ACTUACIONES ÓPTIMAS DE AEROTURBINAS. LIMITES EN EL DISEÑO	30
9	PALAS	31
9.1	MATERIAL DE PALAS. CARACTERISTICAS NECESARIAS.....	31
9.2	ESTRUCTURA DE PALA	35
9.3	FABRICACIÓN DE PALAS	36

1 AERODINÁMICA. CONCEPTOS GENERALES

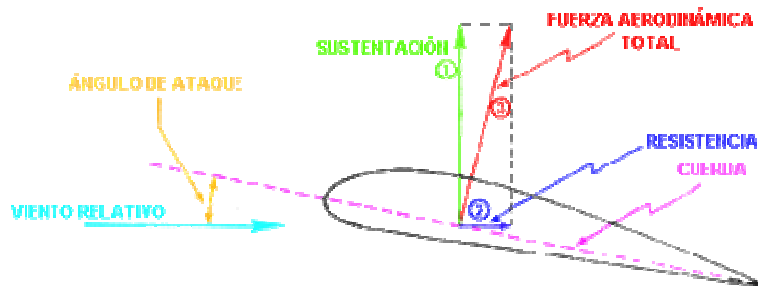
Una fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye alrededor de un perfil aerodinámico.



El punto donde esta corriente se divide se lo denomina "punto de remanso".

La forma del perfil crea una depresión en el extradós y una sobrepresión en el intradós. La diferencia de presión entre la parte superior del perfil (extradós) y la inferior (intradós) es la que produce la fuerza neta resultante sobre el perfil

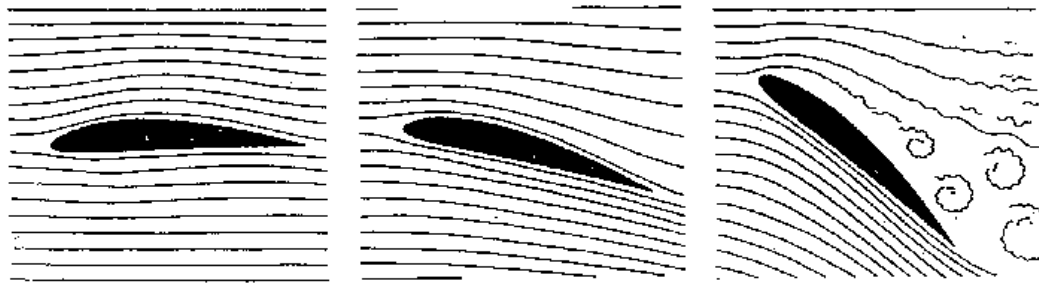
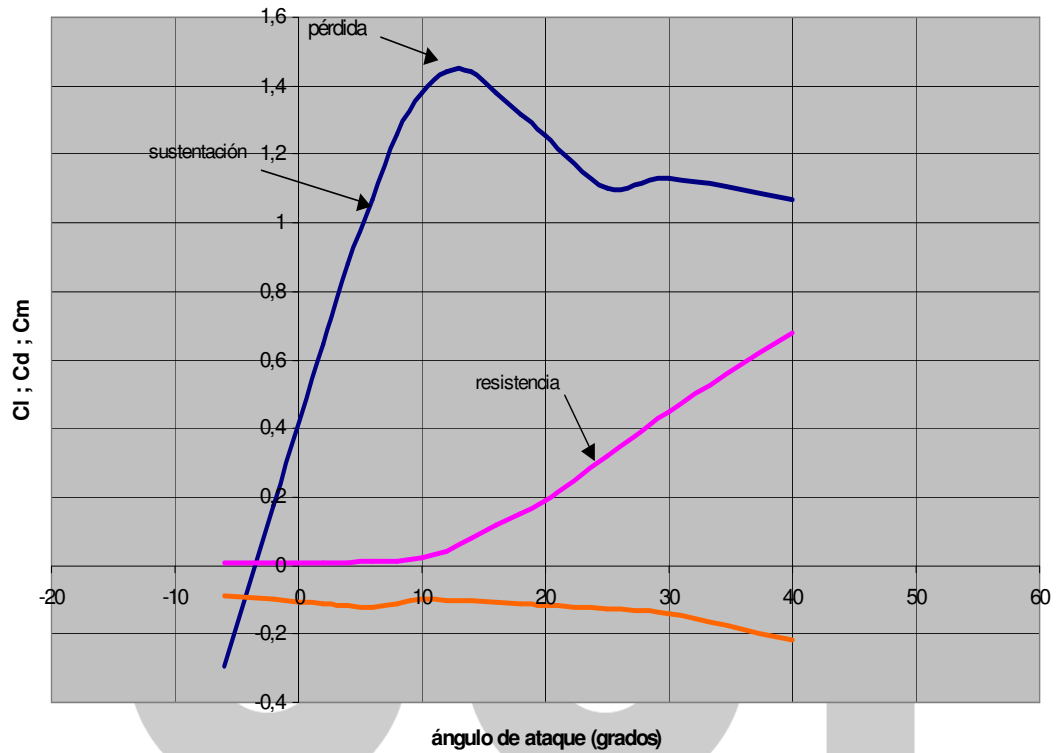
La fuerza aerodinámica resultante, puede ser dividida en dos componentes, que son la sustentación y la resistencia. La sustentación actúa perpendicular al viento relativo. La resistencia es la fuerza que se opone al movimiento del perfil en el aire y por tanto lleva la dirección del viento incidente.



Fuerzas actuantes sobre un perfil aerodinámico

2 PERFILES AERODINÁMICOS. COEF. DE SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA

COEFICIENTES AERODINÁMICOS



ZERO LIFT

INCREASING LIFT

"STALLED"

3 TEORIAS AERODINÁMICAS EN AEROTURBINAS

3.1 TEORÍA DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La teoría de Cantidad de Movimiento es la mas básica que podemos aplicar al problema de determinar las acciones (tracción, par y potencia extraída) sobre un rotor de aeroturbina.

Supongamos un volumen de control que encierra el rotor de la maquina y se extiende aguas arriba y aguas abajo de la corriente hasta regiones lejanas en las que podemos considerar que las variables fluidas alcanzan valores constantes

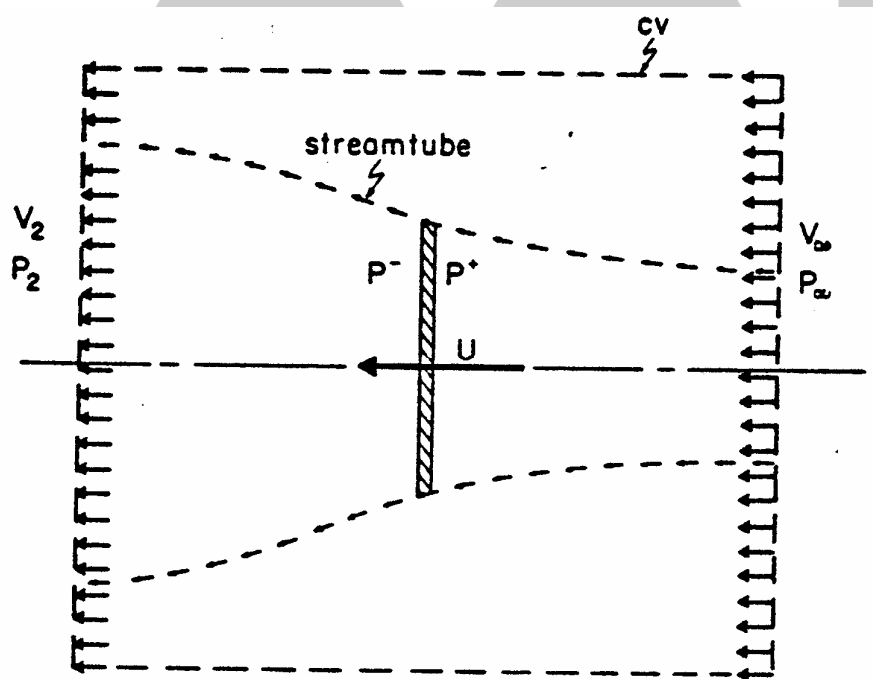


figura 1 .- tubo de corriente en una aeroturbina

Hagamos las siguientes hipótesis:

1. *Movimiento estacionario.*
2. *Rotor aislado, sin efectos colaterales del terreno u obstáculos.*

los.

3. *Perfiles de velocidades uniformes.*
4. *El tubo de corriente que atraviesa el rotor está bien definido.*
5. *Flujo incompresible.*
6. *No hay efectos de rotación en el aire.*

Bajo estas hipótesis el rotor de la aeroturbina es como un disco poroso de espesor infinitesimal que actúa sobre el tubo de corriente mediante la creación de un salto de presiones a través de él, o bien, podemos suponer que el rotor de la máquina está formado por un número infinito de palas que no producen resistencia y que giran a una velocidad muy elevada.

Aplicando el teorema de conservación de la cantidad de movimiento llegamos a:

$$T = \rho AU(V_2 - V_1)$$

Donde, T es la tracción o fuerza en la dirección de la corriente sobre el disco del rotor, ρ es la densidad del aire, A el área del rotor, U la velocidad local en el plano del rotor y V_1 y V_2 las velocidades aguas arriba y abajo, respectivamente.

Por otra parte, la tracción también se puede expresar como:

$$T = A(p' - p) = -\rho A(V_1 - V_2)$$

Donde, se ha aplicado la ecuación de Bernoulli, para describir las presiones inmediatamente antes y después del rotor (p_+ y p_-) en función de las velocidades.

Igualando las expresiones de la tracción obtenemos para la velocidad en el plano del rotor:

$$U = (V_1 - V_2)/2$$

Definiendo el coeficiente de velocidad inducida axial a como

$$U = V_1(1 - a)$$

Obtenemos

$$V_2 = V_1(1 - 2a)$$

la potencia, como diferencia de energías cinéticas es en función del coeficiente de velocidad inducida.

$$P = \rho A U (V_1^2/2 - V_2^2/2) = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 4a(1 - a)^2$$

Finalmente la tracción adquiere la forma:

$$T = 2\rho A V_1 a (1 - a)$$

3.2 LÍMITE DE BETZ

La máxima potencia ocurre cuando $dP/da=0$

$$dP/da = 2 \rho A V_1^3 (1 - 4a + 5a^2) = 0$$

Resolviendo, tenemos

$$a = 1/3$$

La máxima potencia ocurre cuando $a = 1/3$, Por tanto

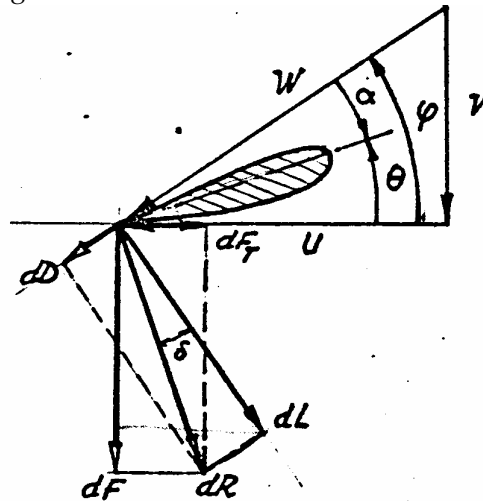
$$P_{max} = 16/27 (1/2 \rho A V_1^3)$$

Es decir cuando el coeficiente de potencia iguala a 16/27. Este valor se denomina Límite de Betz y nos indica el máximo valor de la potencia contenida en el tubo de corriente de aire que es capaz de extraer el rotor de una aeroturbina

3.3 TEORÍA DEL ELEMENTO DE PALA

La teoría del elemento de pala se basa en evaluar las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre una rebanada de pala, para posteriormente obtener la resultante de estas acciones mediante la suma a lo largo de la pala.

Vamos a suponer un rotor de B palas girando sobre un eje horizontal a velocidad angular Ω en una corriente uniforme de viento de valor V en el infinito aguas arriba.



Supongamos la pala dividida longitudinalmente en segmentos de longitud diferencial dr (figura), cuyo perfil aerodinámico forma un ángulo θ° con el plano de rotación (figura). Asumiendo que la interferencia de las otras palas es nula y que las fuerzas aerodinámicas sobre el elemento son debidas a la sustentación y resistencia de la sección aerodinámica considerada, tenemos hacienda uso de la Figura:

$$\Delta T = 1/2 \rho W^2 [C_l \cos\phi + C_d \sin\phi] B c dr = 1/2 \rho W^2 C_n B c dr$$

$$\Delta Q = 1/2 \rho W^2 r [C_l \sin\phi + C_d \cos\phi] B c dr = 1/2 \rho W^2 r C_t B c dr$$

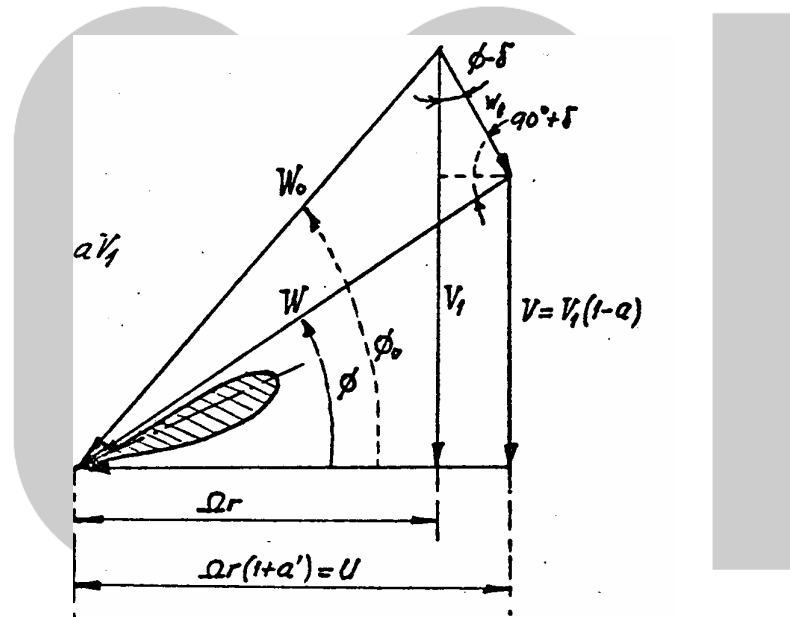
$$\Delta P = 1/2 \rho W^2 r \Omega [C_l \sin\phi + C_d \cos\phi] B c dr = 1/2 r W^2 r \Omega C_t B c dr$$

Donde, Ω es la velocidad relativa vista por el elemento de pala en su movimiento de rotación y ϕ es el ángulo que forma la sustentación con la dirección perpendicular al plano del rotor.

Estas expresiones pueden ser integradas a lo largo de la pala para obtener las acciones sobre el rotor de la máquina.

3.4 COMBINACION DE LA TEORÍA DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO Y DEL ELEMENTO DE PALA

Sabemos a través de las teorías de cantidad de movimiento que la presencia del rotor produce una perturbación en la corriente que podemos cuantificar a través de los coeficientes de inducción a y a' definidos anteriormente.



De la figura podemos descomponer la velocidad W en el plano del rotor en sus componentes transversal y circunferencial, siendo

$$\tan \phi = (1-a)/(1+a') \cdot V_1/\Omega r$$

con la que, expresamos los términos implicados en la teoría del elemento de pala en función de a y a' . Para obtener los coeficientes de velocidades inducidas igualaremos las expresiones de la tracción y del par de cada una de las teorías:

$$[dT]_{\text{cant. de movimiento}} = [dT]_{\text{elem. pala}}$$

recordando que:

$$dT = 1/2 r (dA) V_1^3 4a(1-a)^2 = 1/2 r (2\pi r dr) V_1^3 4a(1-a)^2$$

obtenemos:

$$4 \pi r \rho V_1^2 a (1-a) dr = 1/2 \rho W^2 C_n B c dr$$

recordando

$$W = (1-a)V_1 / \sin \varphi$$

resulta

$$a / (1-a) = \sigma C_n / 8 \sin^2 \varphi$$

Donde se ha definido la solidez local del rotor como

$$\sigma = B c / \pi r$$

De igual manera, igualando los pares obtenidos a partir de la teoría del momento cinético y elemento de pala:

$$[dQ]_{\text{cant. de movimiento}} = [dQ]_{\text{elem. pala}}$$

$$4 \pi r^3 \rho V_1 (1-a) a' W dr = 1/2 r W^2 r C_t B c dr$$

podemos obtener:

$$a' / (1+a') = \sigma C_t / 8 \sin \varphi \cos \varphi$$

La resolución de estas ecuaciones debe abordarse por procedimientos iterativos dado el carácter no lineal. Un esquema posible de iteración es el siguiente:

1. Suponer unos valores de a y a' .
2. Calcular el ángulo φ .

3. *Calcular el ángulo de ataque $\alpha = \varphi - \Theta$.*
4. *Calcular los coeficientes aerodinámicos y sus combinaciones C_l y C_d .*
5. *Calcular a y a' a partir de las expresiones obtenidas.*
6. *Comparar los valores de a y a' calculados con los supuesto en el cálculo (pasos 2 a 4). Si la diferencia es suficientemente pequeña se para el proceso iterativo.*
7. *Ir al paso 2.*

Una vez calculados los coeficientes de velocidad inducida, es posible obtener mediante integración la tracción, el par y la potencia en el rotor.

eoí

4 ACTUACIONES DE LAS AEROTURBINAS. CURVA $C_p - \lambda$

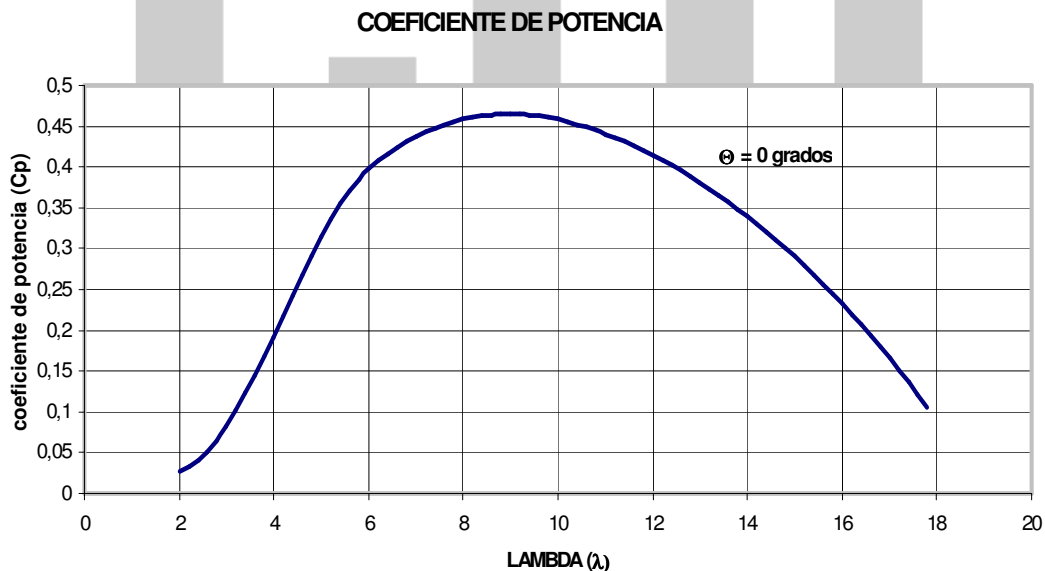
El comportamiento aerodinámico de un rotor de aeroturbina viene caracterizado de manera general por los valores de los coeficientes de tracción (C_T), coeficiente de par (C_Q) y sobre todo el coeficiente de potencia (C_P)

$$C_Q = \frac{\text{Par}}{1/2 \rho V^2 \pi R^3}$$

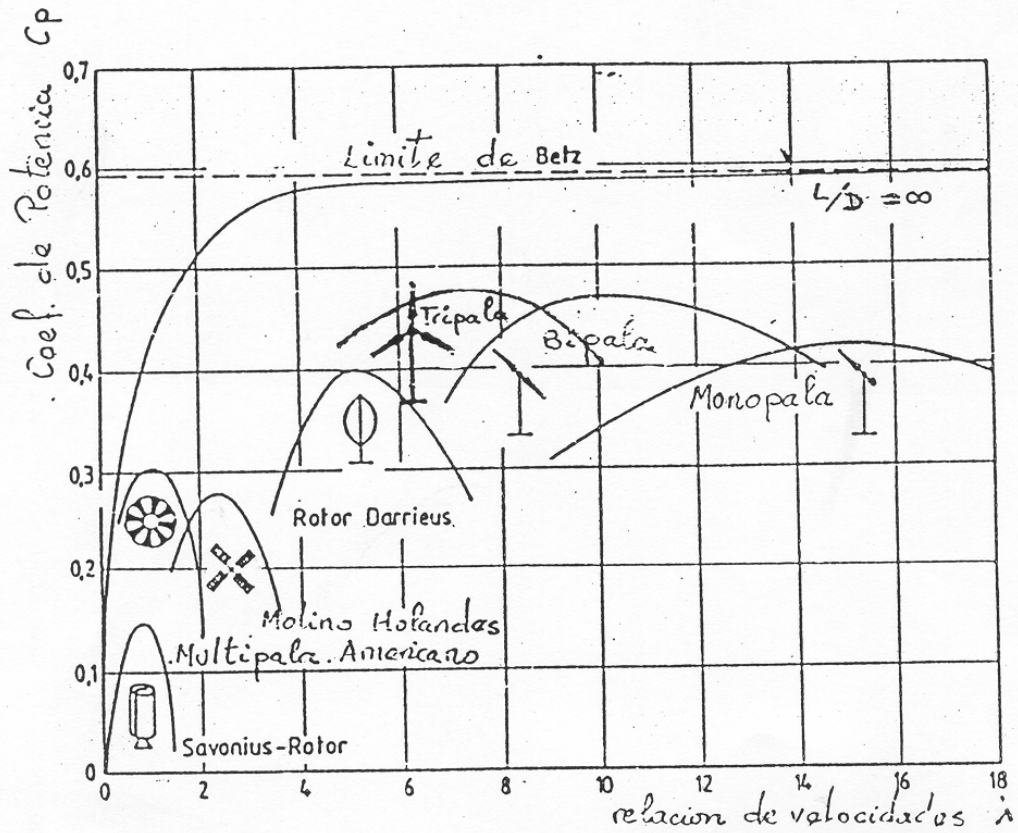
$$C_T = \frac{\text{Empuje}}{1/2 \rho V^2 \pi R^2}$$

$$C_P = \frac{\text{Potencia}}{1/2 \rho V^3 \pi R^2}$$

El coeficiente de potencia expresa el porcentaje de energía contenida en el viento que atraviesa el rotor de una aeroturbina que es transformada en energía mecánica en el eje del rotor.



4.1 ENVOLVENTE CURVAS $C_p - \lambda$




5 CURVA DE POTENCIA

La característica que define a un aerogenerador específico es su curva de potencia, que nos da la potencia que es capaz de suministrar el aerogenerador para cada velocidad de viento.

Hay que hacer la observación de que muchas veces se utiliza como parámetro para definir el tamaño de un aerogenerador su potencia nominal sin hacer ningún tipo de referencia sobre la velocidad de viento para la que se consigue dicha potencia, lo cual puede inducir a error si tratamos de comparar máquinas con igual potencia nominal conseguidas a distinta velocidad de viento. Por lo tanto para poder comparar dos máquinas es necesario disponer de sus curvas de potencia completas.

La curva de potencia eléctrica de salida se puede obtener de manera teórica a partir de la curva $C_p - \lambda$, conocida la velocidad de giro de la máquina, rendimiento del tren de potencia y, o bien el ángulo de calado de la pala en el rotor (máquinas de paso fijo), o la potencia nominal de la máquina (máquinas de paso variable). Estos parámetros de funcionamiento, a los que hay que añadir las velocidades de arranque y de corte de la máquina son seleccionados dependiendo del diseño de la máquina y atendiendo al régimen de vientos del lugar para que la energía extraída sea máxima




Deutsches Windenergie-Institut

Excerpt from evaluation:
Power Performance Testing No: PV 9810-07


Wind Turbine:
Manufacturer:

Data of the WEC:
 rated power: 705 kW
 diameter: 47 m
 hub height: 45.5 m
 blade pitch angle: variable
 rotor speed range: 22.79-32.66 1/min

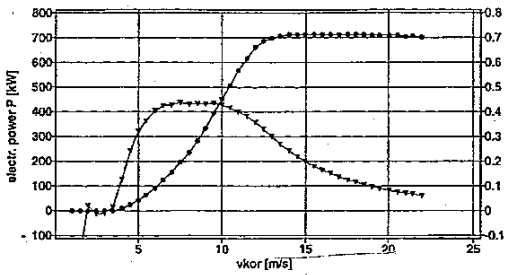
Measurement:
 According to IEC 61400-12: 1998 and MEASNET
 - period of measurement 04.11.1999 to 01.02.2000
 - amount of data: 3380 data sets or 563 h
 - averaging time: 10 min
 - measurement of wind speed at hub height
 - wind sector: 290° - 330°
 - meteorological standard atmosphere
 - anemometer: Thies 4.3303.22
 - calibration of anemometer: by DEWI according to MEASNET
 - accuracy of measurement:
 - anemometer (after calibration): 0.1 m/s
 - power transducer: 5.1 kW
 - temperature: 1.0 °C
 - air pressure: 2.0 hPa
 Deviations from IEC 61400-12 1998 and MEASNET
 - limits for terrain requirements regarding terrain complexity slightly exceeded,
 only outside the measurement sector
 - anemometer not yet recalibrated after measurements



Deutscher
Akreditierungs
Rat
GAR
DAP-P-02.394-00-92-01




Bin-Nr.	v-Bin	P-Bin	Values	Cp	Uncert.
[]	[m/s]	[kW]	[]	[]	[kW]
2	1.05	-1.0	17	-0.781	3.2
3	1.57	-0.7	37	-0.179	3.1
4	2.01	0.2	63	0.021	3.1
5	2.51	-0.2	75	-0.019	3.1
6	3.00	-0.3	90	-0.009	3.1
7	3.50	0.7	109	0.015	3.1
8	4.01	8.7	121	0.128	3.0
9	4.51	23.6	97	0.242	5.4
10	5.01	42.9	132	0.321	6.7
11	5.48	63.6	131	0.363	7.8
12	5.98	91.5	100	0.402	10.0
13	6.51	124.3	105	0.424	11.8
14	7.00	155.7	87	0.428	12.9
15	7.48	194.5	113	0.435	15.9
16	8.01	234.8	103	0.430	16.9
17	8.49	281.5	100	0.433	21.7
18	9.00	333.1	127	0.430	23.5
19	9.48	394.2	115	0.435	31.0
20	9.98	451.0	131	0.427	28.9
21	10.47	507.4	95	0.416	30.6
22	10.99	565.7	81	0.401	31.2
23	11.50	615.2	100	0.382	28.6
24	12.03	660.1	106	0.357	24.9
25	12.51	685.3	120	0.330	17.1
26	12.99	698.0	115	0.298	10.0
27	13.50	709.9	131	0.270	8.1
28	14.02	710.7	78	0.243	6.2
29	14.52	711.8	71	0.219	5.8
30	14.99	712.3	85	0.199	5.7
31	15.50	712.9	75	0.180	5.7
32	16.01	712.3	68	0.163	5.7
33	16.49	711.8	73	0.150	5.7
34	16.97	711.5	61	0.137	5.7
35	17.51	711.2	55	0.125	5.7
36	18.01	711.2	58	0.115	5.7
37	18.51	710.7	33	0.106	5.7
38	19.00	709.4	38	0.097	5.8
39	19.45	708.8	24	0.091	5.7
40	20.03	708.0	9	0.083	5.9
41	20.53	707.6	10	0.077	5.7
42	21.04	704.5	10	0.071	6.5
43	21.45	704.7	4	0.067	5.7
44	21.95	700.9	9	0.062	7.0

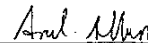


page 1/1

measured by: German Wind Energy-Institute GmbH

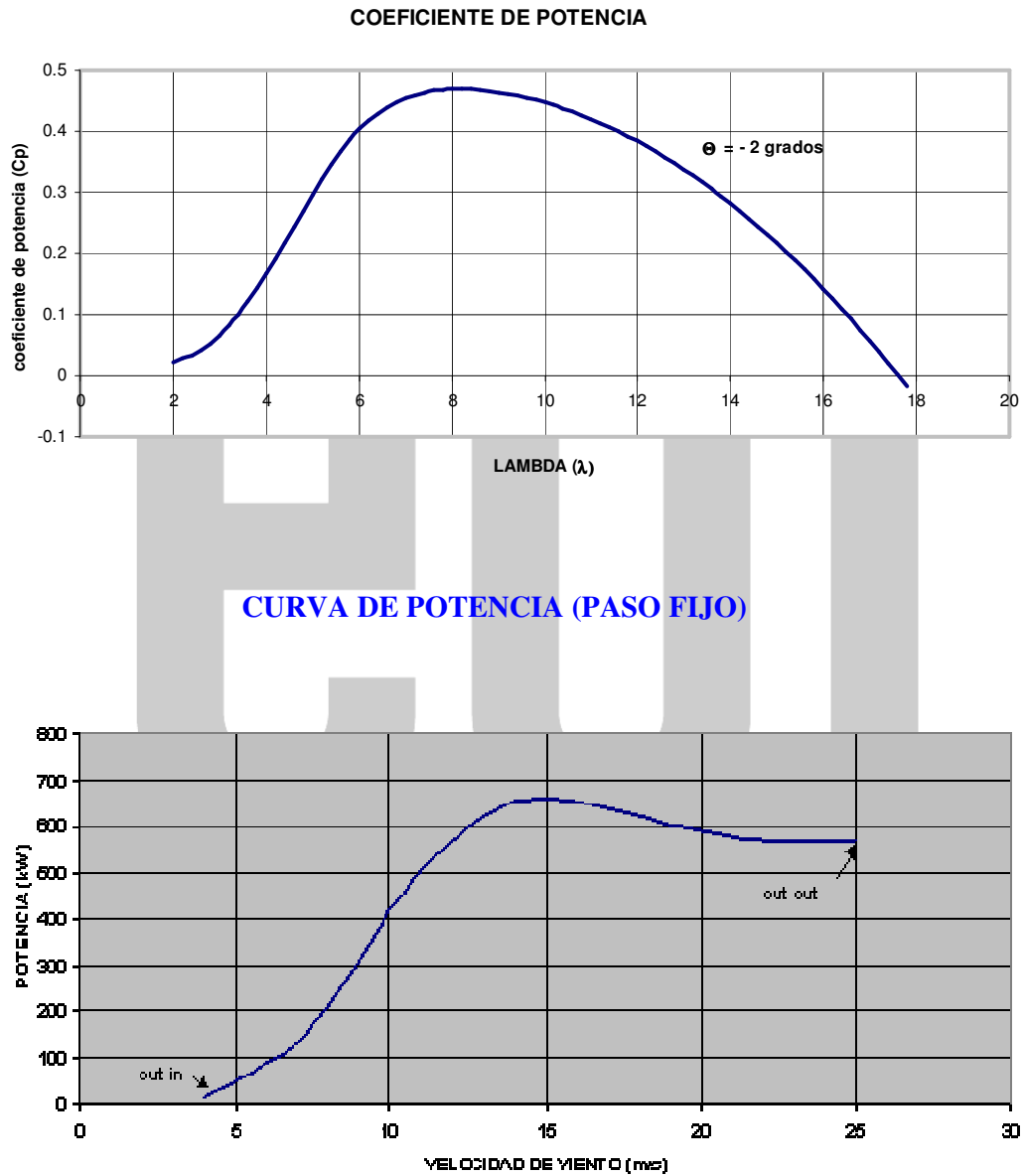
date: 08.02.2000
signature and stamp:


(J. P. Molly)


(i.A. Dipl.-Phys. A. Albers)

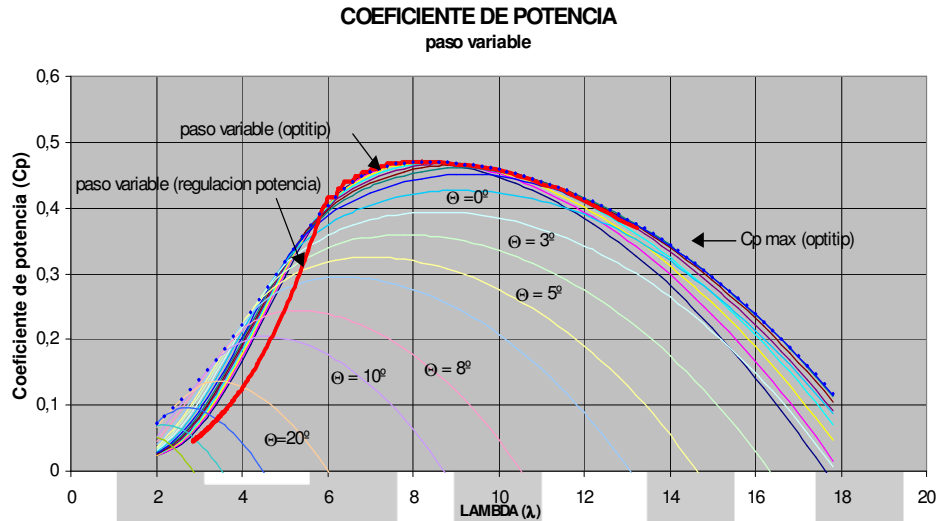


6 COEFICIENTE. DE POTENCIA Y CURVA DE POTENCIA (PASO FIJO)



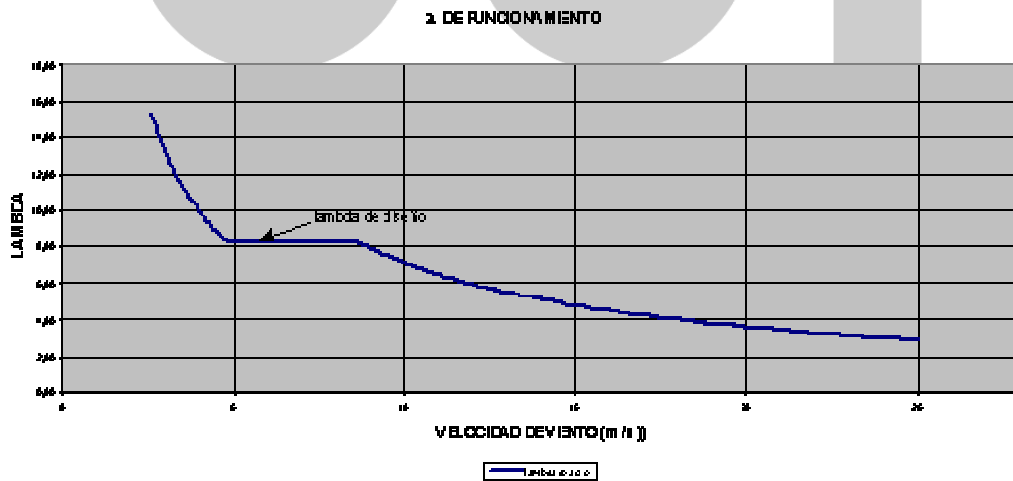
7 COEFICIENTES DE POTENCIA Y CURVA DE POTENCIA (PASO VARIABLE)

7.1 COEFICIENTE DE POTENCIA (PASO VARIABLE)



PASO VARIABLE Y VELOCIDAD VARIABLE. λ CONSTANTE

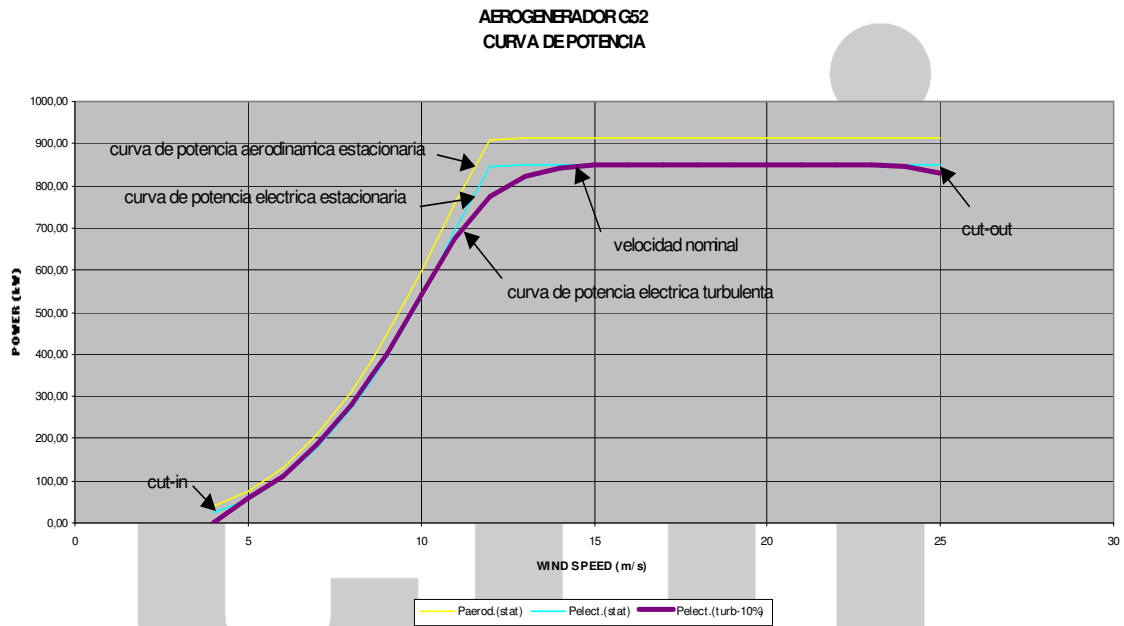
El funcionamiento de las aeroturbinas de velocidad variable pasa por tratar de mantener durante el mayor rango de operación posible el λ constante e igual al óptimo durante la operación a potencia parcial.



La velocidad de rotación del rotor deberá variar de acuerdo con la variación de la velocidad del viento para así mantener λ constante.

7.2 CURVA DE POTENCIA (PASO VARIABLE)

La curva de potencia de las aeroturbinas de paso variable tiene la forma siguiente para viento estacionario y para viento turbulento respectivamente



8 ESTUDIO PARAMETRICO DE ACTUACIONES PARA EL DISEÑO DE ROTORES DE EJE HORIZONTAL.

El diseño del rotor de una aeroturbina de eje horizontal comprende el diseño tanto en su vertiente de comportamiento aerodinámico, como el diseño estructural o de resistencia a las solicitaciones mecánicas.

Estos dos aspectos de diseño no pueden analizarse independientemente sino que se encuentran ampliamente relacionados entre sí, por lo que en el diseño final del rotor se debe llegar a una solución de compromiso que proporcione la máxima potencia compatible con una geometría que presente facilidad de fabricación y adecuada resistencia estructural.

En las prestaciones aerodinámicas de un rotor de aeroturbina influyen diferentes parámetros, como son :

parámetros dependientes de la forma geométrica del rotor :

<i>diámetro</i>	<i>D</i>
<i>nº de palas</i>	<i>b</i>
<i>tipo de perfil</i>	<i>(L/D)max</i>
<i>forma en planta</i>	<i>c(x)</i>
<i>espesor relativo</i>	<i>t/c(x)</i>
<i>torsión</i>	<i>$\theta(x)$</i>

parámetros de operación de la máquina :

<i>r.p.m.</i>	<i>n</i>
<i>ángulo de paso</i>	<i>φ</i>

características del viento :

<i>densidad</i>	ρ
<i>viscosidad</i>	μ
<i>velocidad del viento</i>	V

los cuales se traducen en los siguientes parámetros adimensionales.

<i>diámetro</i> -----	D
<i>nº de palas</i> -----	b
<i>tipo de perfil</i> -----	$(L/D)_{max}$
<i>relación de velocidades</i> --	$\lambda = \pi/60 n D / V$
<i>factor de actividad</i> -----	AF
<i>nº de Reynolds</i> -----	$Re = \rho V D/\mu$
<i>espesor relativo</i> -----	t/c
<i>ángulo de torsión</i> -----	θ
<i>ángulo de paso</i> -----	φ
<i>coef. de potencia</i> -----	C_p

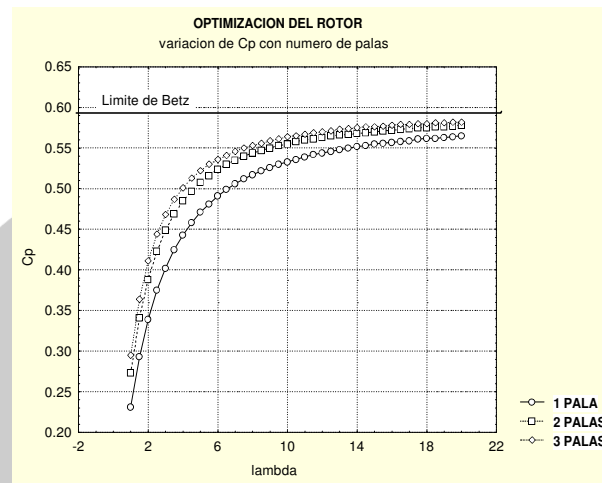
y por tanto se puede establecer entre ellos una relación funcional

$$C_p = f(D, b, L/D, \lambda, AF, Re, t/c, \theta, \varphi)$$

A continuación se muestra la manera en que estos parámetros afectan a las actuaciones de las aeroturbinas.

8.1 NUMERO DE PALAS

El efecto que produce el aumentar el número de palas es aumentar el coeficiente de potencia, asimismo la energía producida es función directa del numero de palas.



Los incrementos en las actuaciones de las aeroturbinas de 3 y 4 palas sobre las aeroturbinas de 2 palas es aproximadamente del 3% y 4% respectivamente.

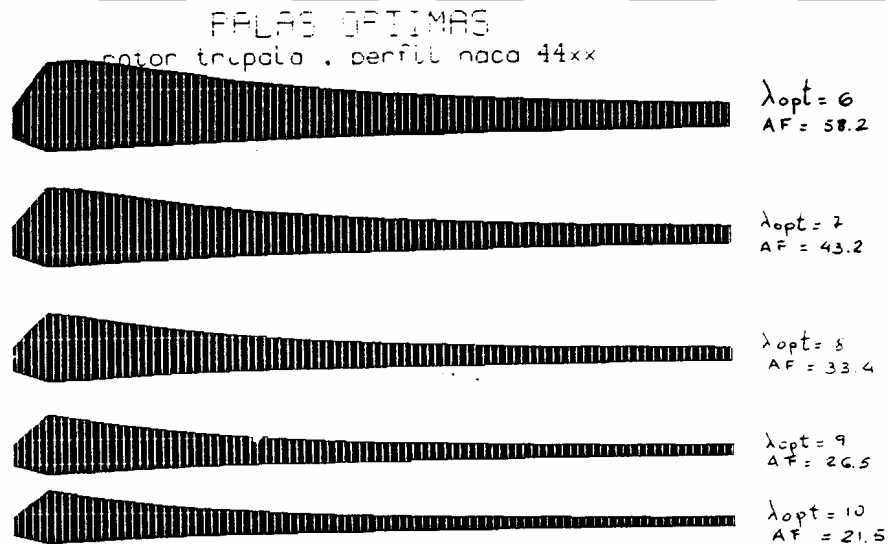
La actuación de la aeroturbina de una pala es aproximadamente un 30 % menor que para dos palas, con lo que si se quiere obtener la misma energía el diámetro del rotor tiene que incrementarse. La elección del numero de palas es pues un compromiso entre poner menor número de palas de mayor longitud o mayor numero de palas y por consiguiente mayor coste del rotor.

8.2 FORMA EN PLANTA DE PALAS

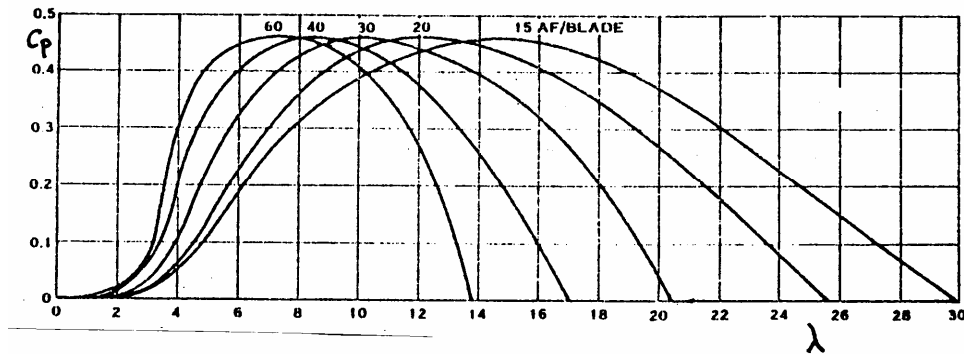
El factor de actividad de la pala es una medida de la solidez del rotor, junto con el número de palas y se obtiene fácilmente a partir de la distribución de cuerdas de la pala.

$$AF = \frac{100000}{16D} \int_{\text{raiz}}^{\text{punta}} \left(\frac{c}{R}\right)^3 d\left(\frac{r}{R}\right)$$

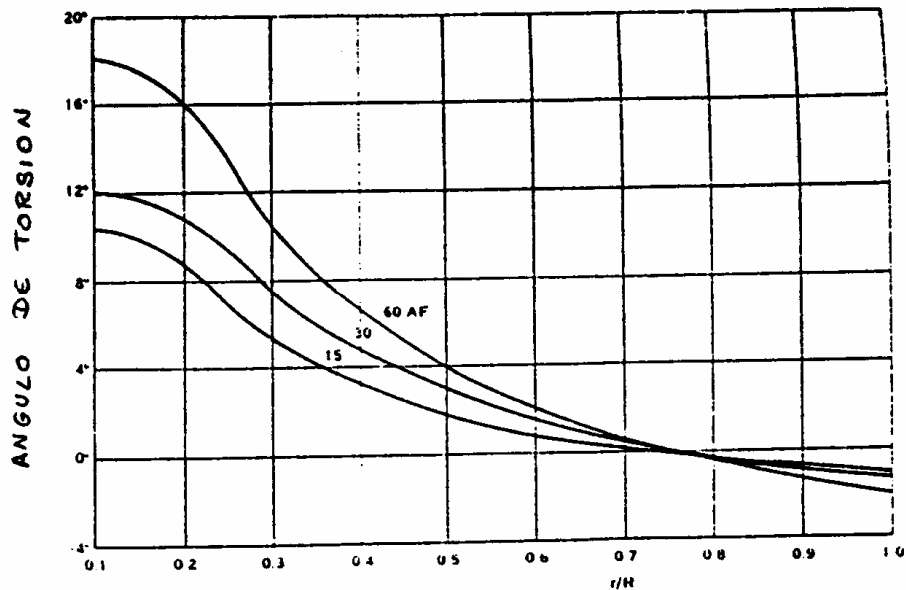
Si calculamos las actuaciones de las palas optimas para rotores tripala con λ de diseño entre 6 y 15 así con sus distribuciones de cuerdas y torsión optima requerida, podemos extraer las siguientes conclusiones:



El factor de actividad de la pala debe reducirse cuando la velocidad de giro del rotor de diseño se incrementa (λ crecientes).

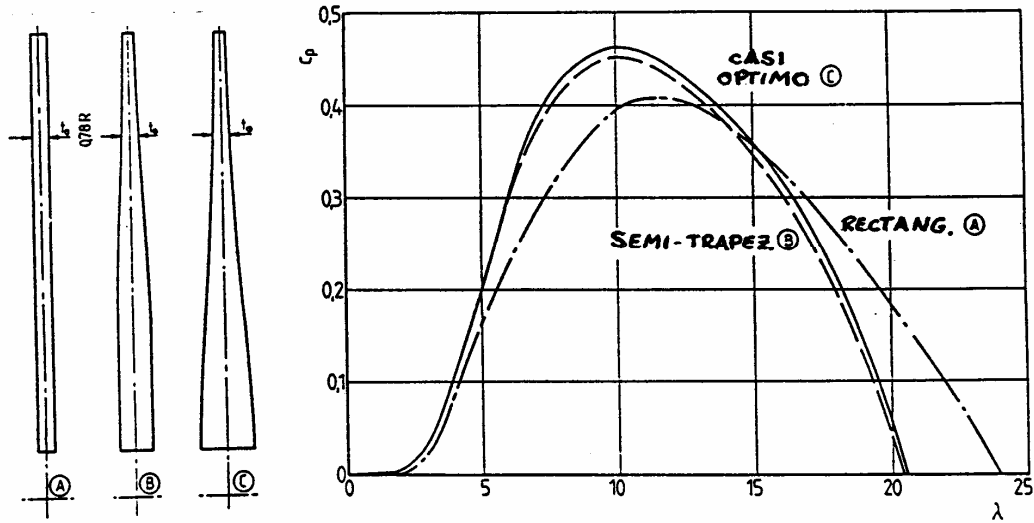


Además de un menor factor de actividad de la pala, la torsión de pala requerida es menor.

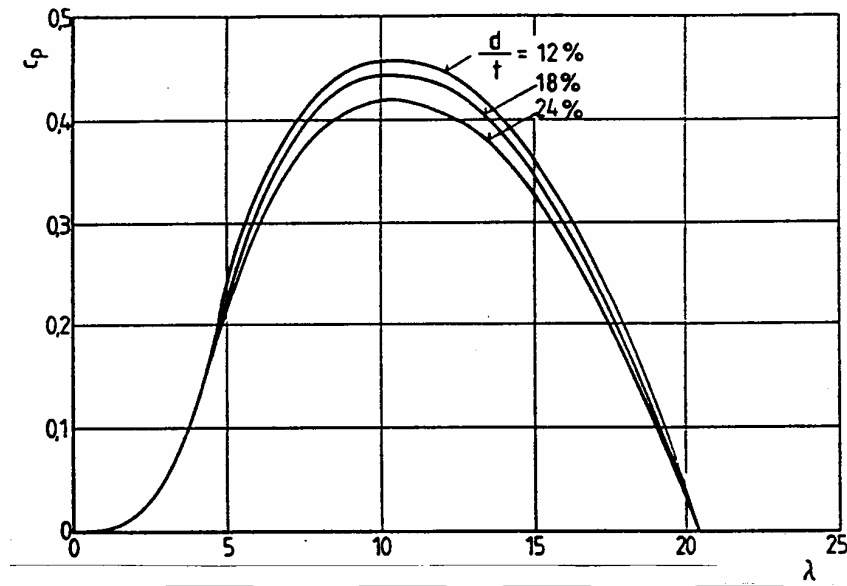


En cuanto a la forma geométrica en si de la pala, si modificamos ligeramente la forma en planta optima por otras formas geométricas de mas fácil realización, como la aproximación a la forma semitrapezoidal, la reducción que se produce en actuaciones del rotor es mínima comparada con la mayor facilidad de fabricación. Otras aproximaciones como la forma rectangular presentan reducciones importantes en

actuaciones y un deslizamiento del C_p máximo hacia valores mas altos de λ , a lo que hay que añadir también un peor comportamiento estructural.



8.3 DISTRIBUCION DE ESPESORES



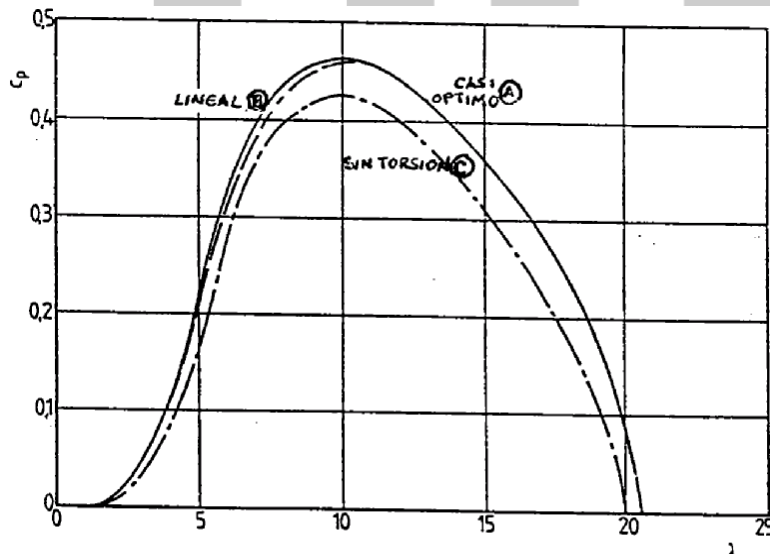
Por consideraciones estructurales y de reducción de peso, la relación de espesores relativos de los perfiles en las distintas secciones de la pala debe distribuirse de manera que los perfiles en punta de pala se aproximen a los óptimos aerodinámicos mientras que en la zona de raíz el espesor relativo de la sección sea lo suficientemente grande para tener una transición suave con la brida de unión al buje de la máquina.

La energía perdida por el hecho de aumentar el espesor relativo de los perfiles se cifra en un 3% para espesores relativos de 0.18 y alrededor de un 10 % si se incrementa el espesor relativo al 0.24.

La tendencia general en el diseño de palas es conseguir una adecuada resistencia estructural con mínimo peso a base de aumentar de forma progresiva el espesor relativo, solo ligeramente en la zona externa de la pala y mas ampliamente en la zona de raíz de pala, aún a costa de reducir performances.

8.4 DISTRIBUCION DE TORSION

La distribución de torsión requerida para tener unas actuaciones optimas es de difícil ejecución en el proceso de fabricación por lo que habitualmente se construyen las palas con ángulos de torsión menores que los óptimos en la zona de raíz y con una variación lineal de raíz a punta de pala. La variación en la energía obtenida si la torsión se desvía de la optima solo en las secciones de la zona interior de la pala no es importante (alrededor de un 2 %), desviaciones de la distribución de torsión respecto a la optima en la zona externa de la pala resultan mucho mas perjudiciales, siendo la pala sin torsión la de peores actuaciones.

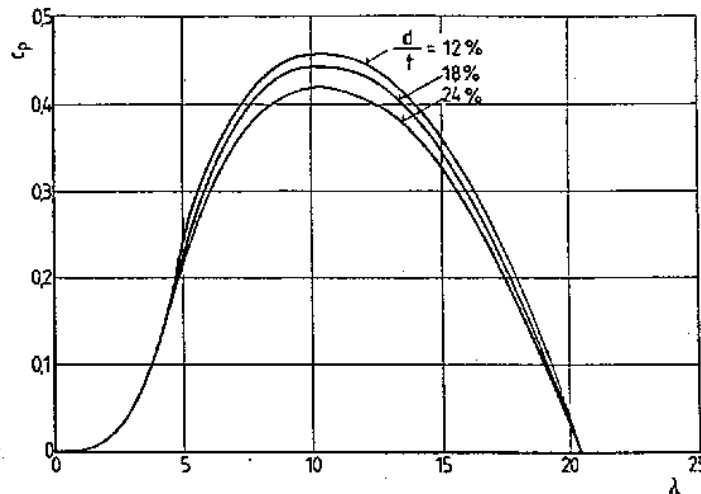


La torsión tiene un significativo efecto en las actuaciones del rotor, aumentando su importancia a medida que las palas tienen un factor de actividad mayor. Para el arranque a velocidades bajas en aeroturbinas de paso fijo, el efecto de la torsión de la pala en la zona de raíz es altamente beneficioso.

8.5 ZONA NO AERODINAMICA

Se ha estudiado el efecto que tiene sobre las actuaciones el porcentaje de parte no aerodinámica existente en la zona central del rotor ocupada por el buje y la zona de transición desde la brida hasta los perfiles aerodinámicos. También, en el caso de rotores a los que se instalan palas de longitud reducida acoplando un alargador en la zona de raíz como solución para reducir costes de fabricación de las palas para diferentes diámetros de rotor

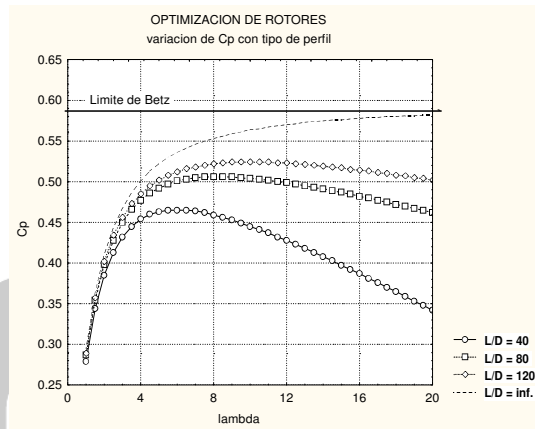
Las reducciones en el C_p obtenidas son debidas no solo a la no existencia de perfil aerodinámico sino también a la resistencia aerodinámica del alargador que se instala.



Se puede observar en el gráfico que hay una significativa penalización en actuaciones si el porcentaje de zona no aerodinámica se incrementa por encima del 25 % de la envergadura de la pala.

8.6 TIPO DE PERFIL AERODINAMICO

Las actuaciones de las aeroturbinas mejoran al aumentar el parametro de eficiencia aerodinámica de los perfiles utilizados L/D .



Perfiles convencionales como los de la serie 230XX, 44XX o NACA6 tienen valores L/D en el intervalo 100 - 120 con un CL de operación de 1.0 - 1.1.

Perfiles avanzados como Wortmann o Liebeck tienen L/D por encima de 150 y CL de operación de 1.5.

Perfiles Whitcomb muestran L/D de 85 a 90 para CL de 0.8

Perfiles tipo vela muestran inaceptables bajos valores de L/D .

Los perfiles utilizados tradicionalmente en rotores de aeroturbinas son los mismos que se utilizan de manera general en la industria aeronáutica. En los últimos años se ha realizado un considerable esfuerzo en diseñar perfiles aerodinámicos específicamente para aeroturbinas como son los perfiles S-8 gruesos y delgados del DOE-SERI o los perfiles DU de la Universidad de Delft, los perfiles RISO y los perfiles FFAW3 del

Organismo aeronáutico sueco FFA.

La selección de un tipo de perfil u otro está fuertemente influenciada por el deseado CL de operación. Aunque de manera general las performances de las aeroturbinas mejoran con altos valores de L/D, los correspondientes altos valores del CL de operación que llevan aparejados reducen rápidamente el AF requerido, reduciéndose aún mas para un mayor numero de palas, de manera que por ejemplo no sería estructuralmente factible el diseñar rotores de 3 palas con Cl de operación iguales o superiores a 1.0 para λ de diseño iguales o mayores de 12.

De manera similar, cuanto menor sea la velocidad media anual del lugar es mas beneficioso seleccionar tipos de perfiles que presenten un $(L/D)_{max}$ para mas bajos valores de Cl.

Mas aún consideraciones de costes del sistema de transmisión conduce a altos valores de λ que requieren palas de bajo AF, por lo que la selección del tipo de perfil debe estar basada en el máximo L/D que sea capaz de alcanzarse compatible con geometrías de pala practicables y altos niveles de performances.

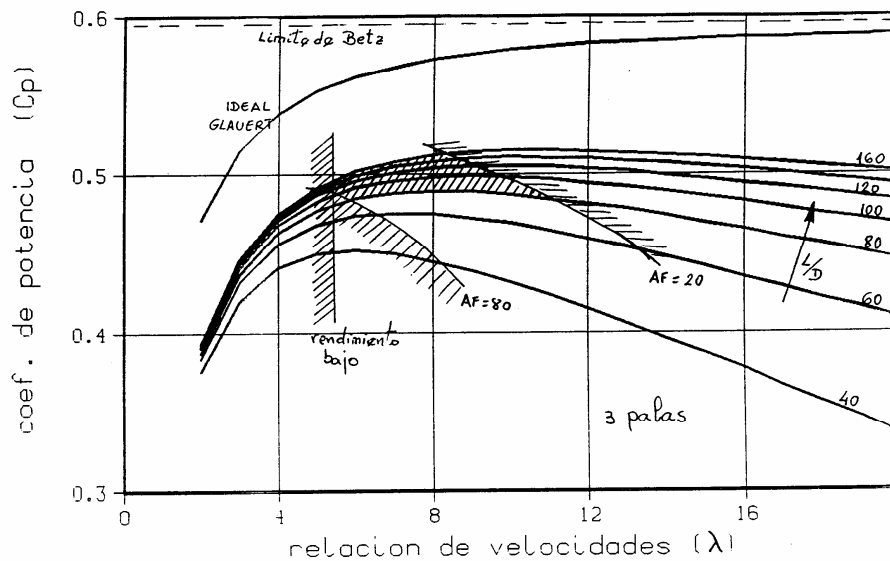
Para aeroturbinas de paso fijo se tienen además problemas específicos como son el de la potencia pico y la regulación de potencia para velocidades de viento elevadas y el efecto de rugosidad en los perfiles.

El pico de potencia en aeroturbinas de paso fijo se alcanza cuando los perfiles interiores de la pala están en perdida y los perfiles de punta de pala se encuentran proximos a la perdida, para disminuir el pico de

potencia y alcanzar el máximo de energía anual con un ángulo de paso óptimo se necesitan perfiles en punta de pala con C_{lmax} reducido. La rugosidad en la superficie de las palas como consecuencia del polvo e insectos adheridos, erosión, gotas de lluvia o hielo pueden reducir sensiblemente las actuaciones de palas de aeroturbinas, siendo de primera importancia la consecución de familias de perfiles con una baja sensibilidad a la rugosidad de la superficie.

8.7 ACTUACIONES ÓPTIMAS DE AEROTURBINAS. LIMITES EN EL DISEÑO

ACTUACIONES OPTIMAS DE AEROTURBINAS
límites en el diseño

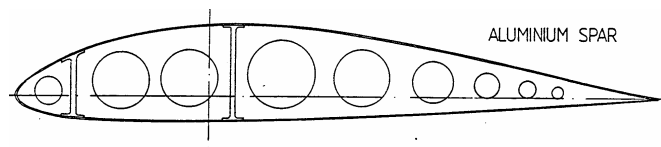


9 PALAS

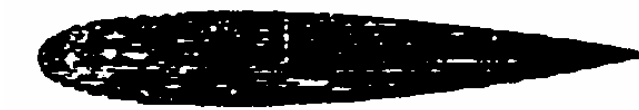
9.1 MATERIAL DE PALAS. CARACTERISTICAS NECESARIAS

- **Resistencia estructural**
- **Resistencia a fatiga**
- **Rigidez**
- **Peso**
- **Facilidad de fabricación**
- **Resistencia a agentes medioambientales**

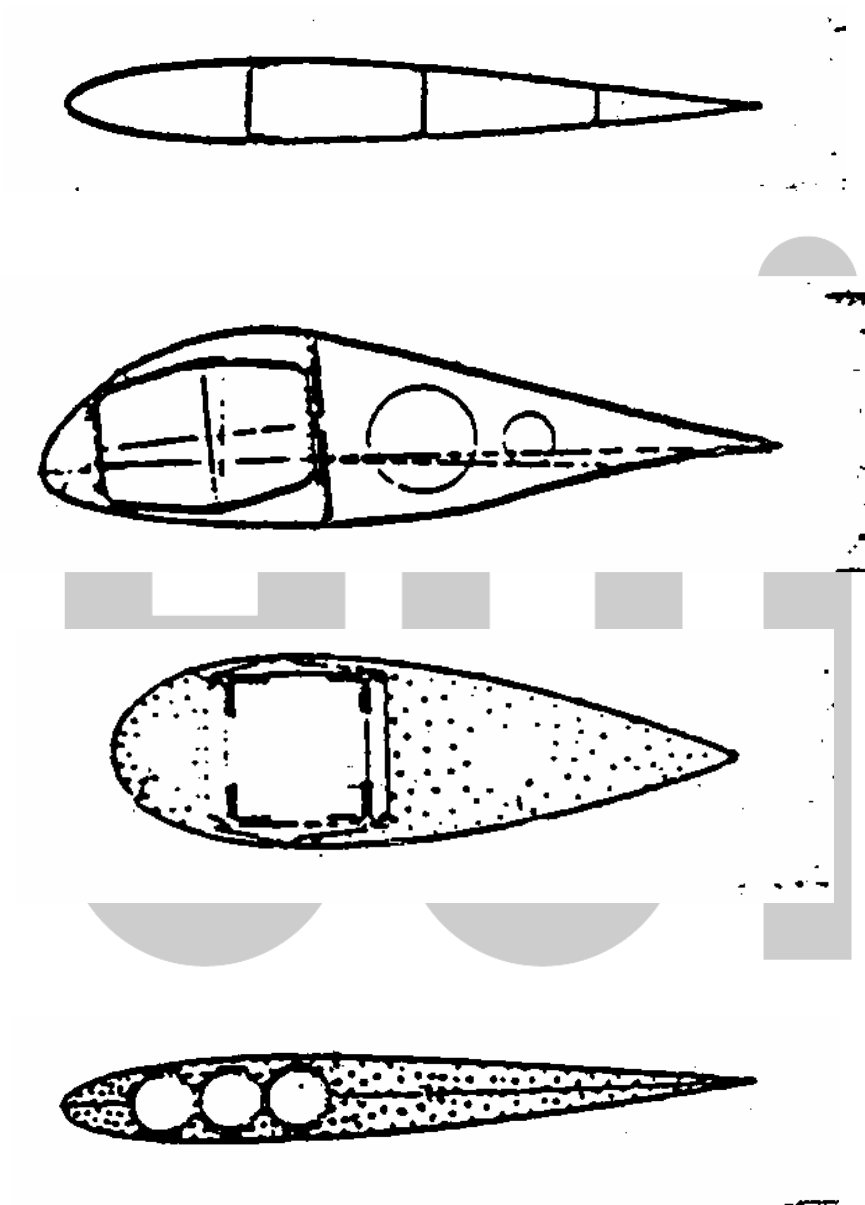
1.- ALUMINIO



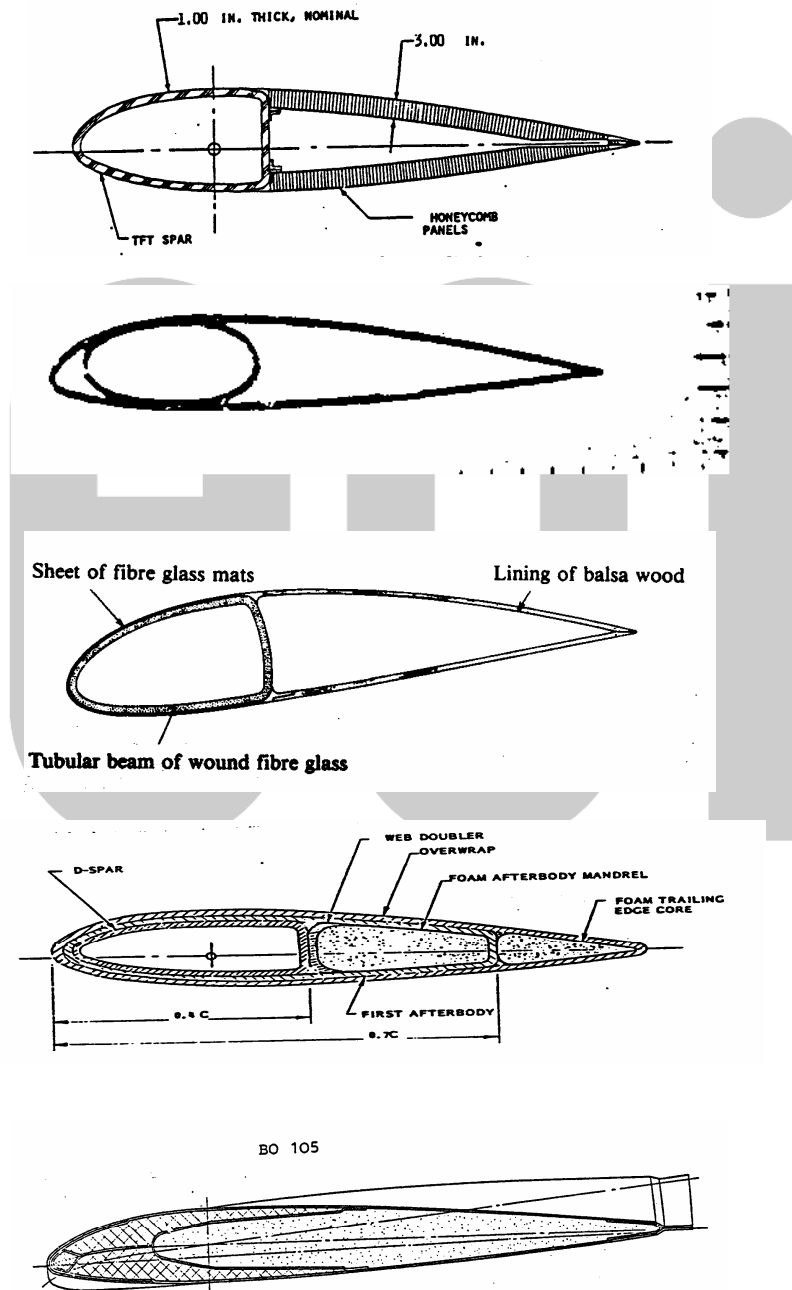
2.- MADERA



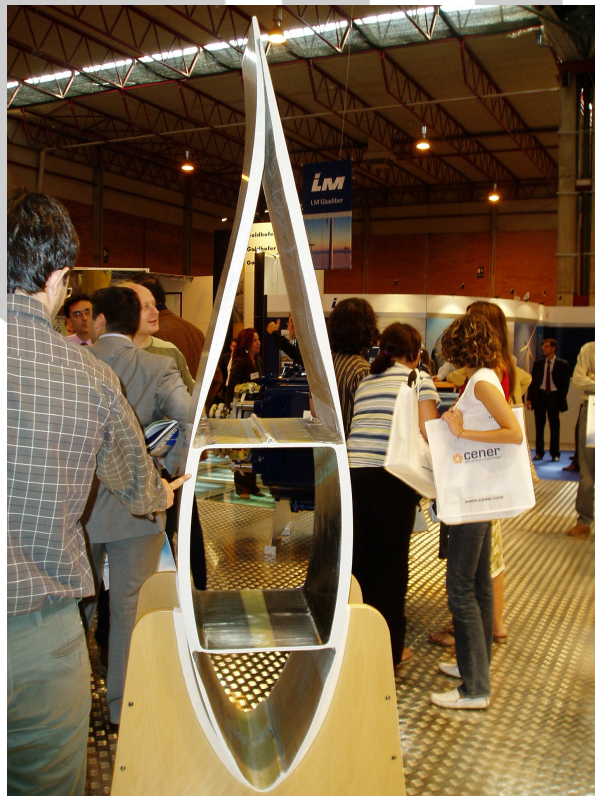
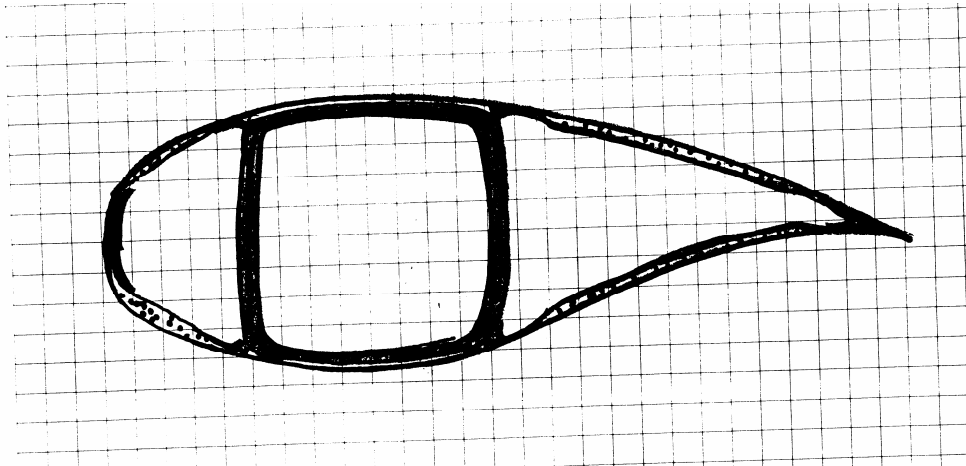
3.- ACERO Y ACERO + MAT.COMPUUESTO



4.- MATERIAL COMPUESTO

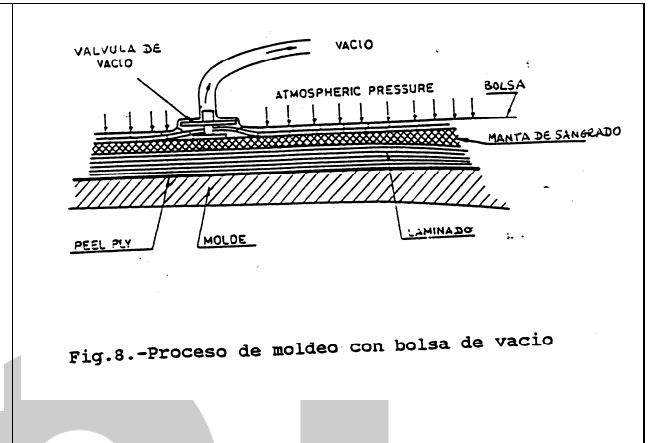
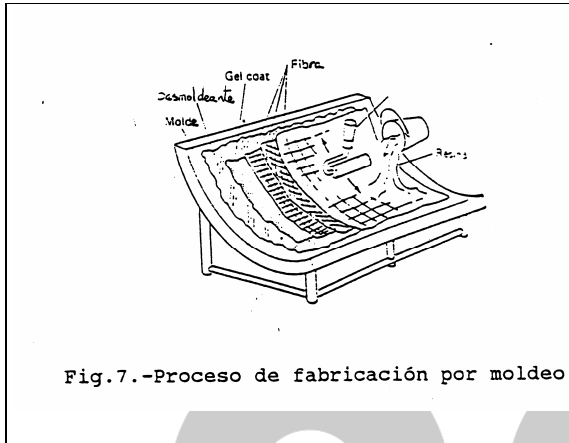


9.2 ESTRUCTURA DE PALA



SECCION TRANSVERSAL DE PALA

9.3 FABRICACIÓN DE PALAS



MOLDE DE CONCHAS PALA