

CASOS DE CARGA DE UNA TURBINA EOLICA

Ricardo A. Bastianon

Servicio Naval de Investigación y Desarrollo
Avda. del Libertador 327 - Vicente López - (1638) Buenos Aires

RESUMEN

En este trabajo se describen los casos de carga a los cuales estará sometida una turbina eólica de eje horizontal durante su vida útil.

Los esfuerzos estimados que deben respetarse en el diseño estructural, comienzan con el cálculo aerodinámico de la hélice, teniendo en cuenta las acciones de las fuerzas de gravedad y centrífuga que actúan sobre cada pala.

Los resultados de varios casos significativos son discutidos.

1. INTRODUCCION

Una turbina eólica está sometida a variados estados de cargas, los cuales son originados por los esfuerzos que el viento produce sobre la turbina y la interferencia entre los distintos elementos que la componen.

El viento incide sobre la hélice produciendo una potencia aprovechable pero a su vez genera esfuerzos que deben ser resistidos estructuralmente.

Las fuerzas y momentos que la hélice transmite al eje principal, al multiplicador, al generador, a los mecanismos de control, a las vigas de la barquilla y que finalmente actúan sobre la torre y la fundación que la soporta, son el punto de partida para el cálculo estructural y su conocimiento es de fundamental importancia.

Como el viento es esencialmente variable y acompañado de ráfagas diversas es necesario prever casos típicos de operación y la frecuencia con que ellos se presentarán durante la vida útil del aparato, contemplando especialmente los casos más severos admisibles. Además, para una hélice con palas de

paso variable deberá considerarse el ángulo de paso para los diferentes modos de operación.

Este análisis nos ha llevado a estudiar distintos estados de carga, habiendo servido como orientación las normas utilizadas por el Comité Nacional Sueco para el Desarrollo de Fuentes de Energía y las normas de la Universidad de Stuttgart en Alemania. (1) y (2)

Primeramente describiremos el proceso de cálculo aerodinámico teniendo en cuenta la acción simultánea de la gravedad y la fuerza centrífuga sobre cada pala de la hélice. Luego describiremos los casos de carga considerados y las correspondientes fuerzas y momentos que se originan.

2. CALCULO AERODINAMICO

La hélice de una turbina eólica capta la energía del viento y la transforma en movimiento de rotación de su eje. Para que esta captación se efectúe eficientemente es necesario que la hélice tenga una forma geométrica adecuada.

Teóricamente puede demostrarse, tal como lo hizo A. Betz en 1927, que sólo se puede extraer un máximo del 59,3% de la potencia disponible en un tubo de corriente de aire. Los valores máximos alcanzados en la práctica pueden llegar hasta un 48%. (3)

Debido a este bajo coeficiente de aprovechamiento y a la falta de constancia en la velocidad con que sopla el viento es necesario tener un diseño óptimo que pueda aprovechar al máximo este recurso natural.

Una vez obtenido el diseño óptimo de la hélice para una velocidad de viento determinada y una velocidad de rotación de la hélice elegida, deben calcularse sus performances para las condiciones de diseño y para las condiciones fuera de diseño.

Partiendo de la ecuación de la cantidad de movimiento para un anillo elemental del disco que barre la hélice, de área $2 \pi r dr$ se obtiene la fuerza de empuje que produce el viento.

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

donde ρ es la densidad del aire, V la velocidad del viento y a un factor de interferencia definido por $V = V_1(1-a)$ donde V es la velocidad del aire al cruzar la hélice.

A su vez, la cupla producida por el viento al cruzar el mismo anillo elemental es

$$dC = 4 \pi \rho V_1 (1-a) a' \Omega r^3 dr$$

donde Ω es la velocidad angular del rotor y a' es el factor de velocidad angular definido por

$$a' = \frac{\text{velocidad angular media del aire en el disco}}{\text{velocidad angular del rotor}}$$

Por otro lado, la teoría del elemento de pala de hélice también nos permite obtener el empuje y la cupla en función de las características aerodinámicas del perfil elegido

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_n dr \quad (1)$$

$$dC = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_t r dr \quad (2)$$

donde V_r es la velocidad relativa del aire con respecto al perfil, Fig. 1. N es el número de palas de la hélice, c es la cuerda del perfil y C_t y C_n son los coeficientes de las fuerzas aerodinámicas resultantes proyectadas sobre el plano de rotación y perpendicular a éste.

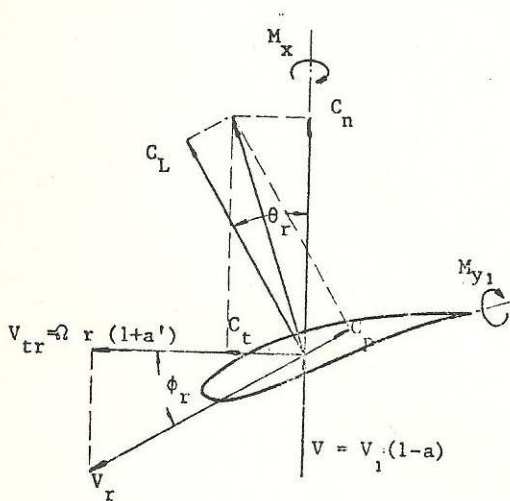


Fig. 1

Las pérdidas de las puntas de pala pueden ser consideradas introduciendo en las expresiones de dT y dC el factor F sugerido por Prandtl

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f}$$

donde:

$$f = \frac{N}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi_r}$$

R es el radio máximo de la hélice y r el radio considerado. Igualando ahora las expresiones de empuje y cupla elemental teniendo en cuenta que en la teoría basada en la variación de la cantidad de movimiento se consideró el aire sin fricción se tiene para el empuje:

$$4 \pi F r \rho V_1^2 a (1-a) dr = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_{ns} dr$$

y para la cupla

$$4 \pi F \rho V_1 (1-a) a' \Omega r^3 dr = \frac{1}{2} \rho V_r^2 N c C_{ts} r dr$$

donde C_{ns} y C_{ts} son los coeficientes C_n y C_t considerados sin fricción.

De ambas expresiones se obtiene

$$\frac{a}{1-a} = \frac{N c C_L \cos \phi_r}{8 F \pi r \sin^2 \phi_r} \quad (3)$$

$$y \quad \frac{a'}{1+a'} = \frac{N c C_t}{8 \pi F r \cos \phi_r}$$

de donde resulta

$$a' = \frac{V_1 (1-a)}{\Omega r \tan \phi_r} - 1$$

$$y \quad \tan \phi_r = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{V_1}{\Omega r}\right)^2 a (1-a)}}{2 a \frac{V_1}{\Omega r}} \quad (4)$$

Para obtener el valor del factor a se parte de la Ec. 4) con un supuesto valor de a y se calcula ϕ_r . Este valor permite calcular la velocidad V_r relativa $V_r = V_1 (1-a) / \sin \phi_r$. La posición del perfil con respecto al plano de rotación de la hélice y el ángulo ϕ_r definen el ángulo de ataque del perfil que junto con V_r permiten determinar el coeficiente aerodinámico C_L .

Con los valores de ϕ_r y C_L en el segundo

miembro de la Ec. 3), se obtiene el nuevo va
lar de a.

El este difiere del supuesto anteriormente
se repite el ciclo hasta obtener la conver
gencia de a.

En este momento se pueden usar las Ecs. 1) y
2) y determinar la contribución de un elemen
to de pala que luego efectuando la sumatoria
a lo largo de la pala se obtiene el empuje y
la cupla total de la hélice.

Tomando en cuenta la velocidad de rotación,
se determina la fuerza centrífuga y ubicando
a la pala en su posición relativa con respec
to a la vertical, se calcula el efecto de
gravedad.

A esta altura del procedimiento se disponen
de todos los elementos para evaluar los es
fuerzos, y los momentos flexores y torsores.

3. CASOS DE CARGA

Para tener en cuenta todas las situaciones
de carga, se ha procedido a efectuar el
cálculo de los esfuerzos aerodinámicos pro
ducido por un viento uniforme y a estos se le
han superpuesto las acciones de la gravedad
y de la fuerza centrífuga, tal como se ha
indicado en el parágrafo anterior. Este
cálculo ha sido realizado para cada uno de
los siguientes casos de carga, estimando que
ellos tienen en cuenta los variados estados
de funcionamiento que se presentarán duran
te la vida útil de la turbina.

En la Fig. 2 se muestran los resultados del
caso de carga N°1 para una potencia nominal
de 13,5 kW. En esta figura se ha graficado
el empuje producido sobre una pala de la hé
lice para distintas velocidades del viento,
pudiéndose observar que al aumentar la inten
sidad de éste el empuje disminuye debido al
incremento del paso de la pala. El aumento
del paso se realiza a fin de conservar cons
tante la potencia captada.

La Fig. 3 permite observar un efecto similar
en el momento M_{y1} ya que disminuye al aumen
tar la velocidad del viento. En la dirección
normal a la cuerda, el perfil tiene su menor
momento de inercia y M_{y1} define la resisten
cia estructural necesaria.

Como puede verse, el momento es máximo en la
raíz de la pala exigiendo en este punto su
mayor resistencia.

Por último, la Fig. 4 muestra la variación
del momento motor M_x en función de la posi
ción de la pala. $\theta = 0^\circ$ corresponde a la

Caso	Vel.del Viento	Potencia	I.P.R. Z
1	Operación normal basada en resistencia a la fatiga	Nominal y parcial al 50%	100
	V_{ci} a V_{cs}		
	Ciclos de Carga $5 \cdot 10^8$	Coefficiente de Seguridad	
2	Vel. nominal +ráfaga= $2V_n$ 10^4	Nominal 1,2	100
3	V_{cs} -ráf.= $0,6V_{cs}$ 10^4	Nominal 1,2	115
4	V_{cs} +ráf.= $1,6V_{cs}$ 50	Nominal 1,2	115
5	V_{cs} +ráf.= $1,6V_{cs}$ 50	Nominal 1,2	85
6	$1,2V_{cs}$ -ráf.= $1,6V_{cs}$ 50	Nominal 1,2	115
7	$1,2V_{cs}$ 500	Nominal 1,2	115 puesta en bande ra rápida
8	60 m/seg supervivencia	Inmovil en bande ra hori zontal.	1,5 rotura
9	60 m/seg	~20 y pa so= 40° a 85°	1,5 rotura
10	Mantenimien to 45,6 m/seg	pala ver tical= 0°	1,5 rotura

pala en posición vertical hacia arriba y
 $\theta = 90^\circ$ a la primera posición horizontal en su
sentido de rotación. Esto indica que para
 $\theta = 90^\circ$ el momento producido por el peso se su
ma al momento aerodinámico mientras que para
 $\theta = 270^\circ$ los momentos se restan.

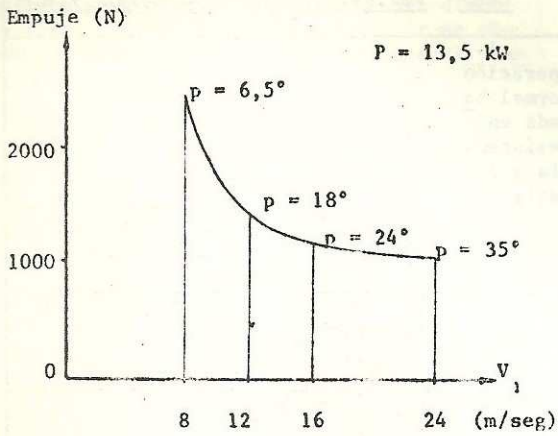


Fig. 2

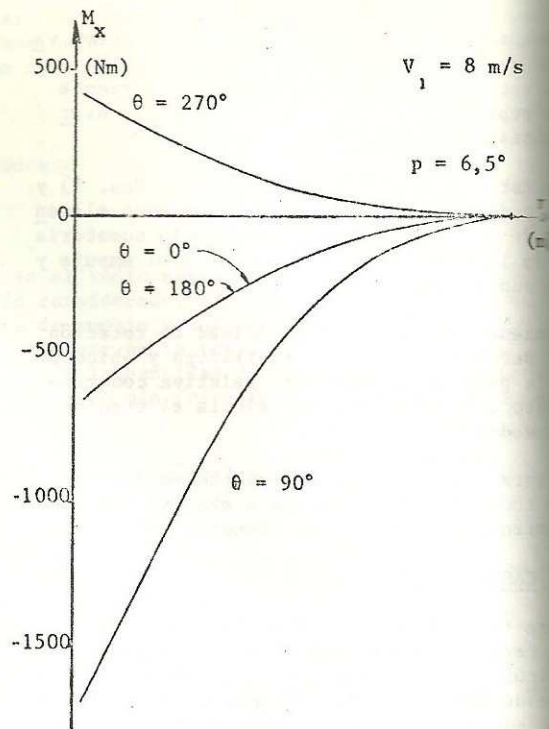


Fig. 4

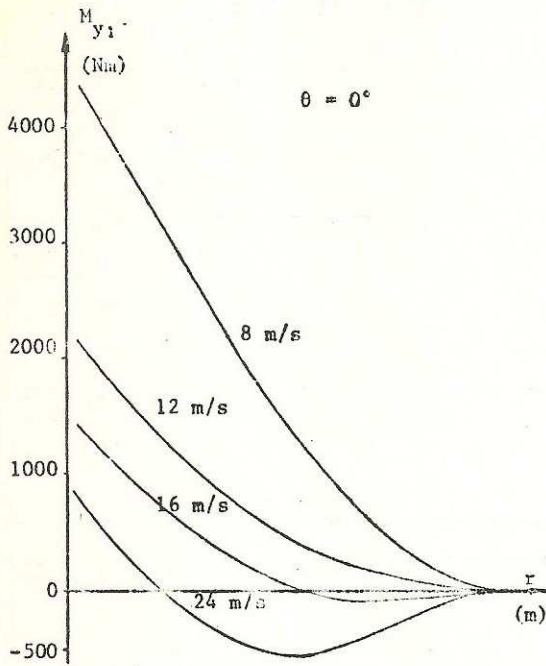


Fig. 3

4. CONCLUSION

El código de cómputo desarrollado ha permitido calcular en función del radio de la pala los tres componentes de los esfuerzos, el momento torsor y los momentos flexores para cada uno de los diez casos de carga especificados. Con estos valores se realizó el diseño estructural de la turbina.

5. REFERENCIAS

- (1) U. Hütter, "Lastannahmen für Rotorblätter von Windenergiekonvertern mit annähernd horizontaler Rotordrehachse", FWE/INGEST Univ. Stuttgart, (1976).
- (2) National Swedish Board for Energy Source Development, "Technical Specification for Design and Installation of Wind Turbine System in Sweden - Part I, Apendix 2", (1978)
- (3) E.W. Golding, "The Generation of Electricity by Wind Power", E.F.N.Spon Ltd. London, pag. 191, (1976).