

Comparación entre modelos de molinos de viento

Este trabajo hace parte de la investigación sobre aerogeneración patrocinada por CINDEC-COLCIENCIAS.

Se evaluaron varios modelos de molinos de viento diseñados con la metodología de Jansen y Smulders (1) y es la intención fundamental probar la versatilidad y limitación del túnel de viento instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional, así como los problemas que se presentan en el ensayo de dichos modelos en él.

JULIO MARIO RODRIGUEZ DEVIS
Ingeniero Mecánico M. Sc.
Profesor, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional

Nomenclatura

λ : Lambda. Relación de velocidad en la punta.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U}$$

W : Velocidad relativa del aire.

C : Cuerda del perfil.

γ : Viscosidad relativa del aire.

α : Angulo de ataque.

C_l : Coeficiente de elevación.

$$C_l = \frac{L}{1/2 W^2 A \rho}$$

L : Fuerza de elevación.

ρ : Densidad del aire.

A : Area del álabes igual al producto de la cuerda por la longitud.

C_d : Coeficiente de arrastre.

$$C_d = \frac{D}{1/2 \rho W^2 A}$$

D : Fuerza de arrastre.

ϕ : Angulo de velocidad relativa respecto al plano de rotación.

β : Angulo de posición estática formado por la cuerda del elemento y el plano de rotación.

U : Velocidad del aire sin perturbación.

V : Velocidad de rotación del aspa.

$$V = \Omega R$$

Ω : Velocidad angular.

C_p : Coeficiente de potencia.

$$C_p = \frac{P_m}{1/2 \rho \pi R^2 U^3}$$

P_m : Potencia mecánica.

R : Radio del aspa.

C_{pmax} : Coeficiente máximo de potencia.

B : Número de aspas.

λ_r : Lambda a un radio, r .

λ_o : Lambda de diseño.

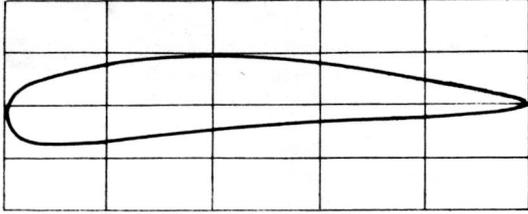
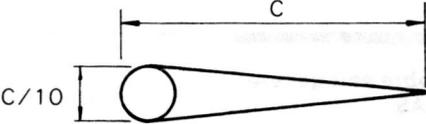
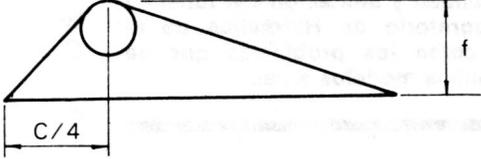
η : Eficiencia total.

C_Q : Coeficiente de torque.

$$C_Q = \frac{Q}{1/2 \rho U^2 \pi R^3}$$

Q : Torque.

TABLA 1.
Descripción geométrica de los perfiles usados

Nombre del perfil	Descripción geométrica
NACA 4412 (N)	
VELA (V)	
VELA TRIANGULAR (TR)	

C_T : Coeficiente de resistencia axial.

$$C_T = \frac{T}{1/2 U^2 \pi R^2 \rho}$$

T : Resistencia axial.

R_e : Número de Reynolds.

$$R_e = \frac{WC}{\gamma}$$

a : Coeficiente de interferencia axial.

$$a = \frac{U - U_r}{U}$$

U_r : Velocidad del viento al atravesar el rotor.

a' : Coeficiente de interferencia rotacional.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega}$$

ω : Velocidad angular de la estela del rotor.

Como parte de la investigación de aerogeneración el grupo de trabajo de la Facultad de Ingeniería considera el estudio de los modelos en el túnel de viento como fundamental.

En general su importancia radica en los siguientes puntos.

- Costos. El túnel de viento permite hacer múltiples pruebas de modelos a bajo costo.
- Teoría. Se pueden experimentar las diversas teorías aerodinámicas mencionadas por los autores expertos en el tema. Esto permite que haya una comprensión más profunda de los investigadores en la parte de modelos matemáticos y de esta manera, proponer cambios y modificaciones pertinentes a nuestro medio y posibilidades.

- Confiabilidad. Una vez resueltos los problemas inherentes a toda modelación y estudiados los resultados de la experimentación, se puede proponer el prototipo más adecuado a cada caso en particular. Esto permite disminuir los riesgos y costos.

- Apropiación de tecnología. Obtenido el éxito esperado, se confirman los planteamientos de diseño propios y se tiene una base sólida en la que cada uno de los parámetros teóricos es explicado y sustentado.

A pesar de que una evaluación rápida determinó la necesidad de construcción de un túnel de viento de grandes dimensiones, se decidió comprobar las limitaciones y posibilidades del túnel de viento instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional.

PRINCIPIOS TEORICOS

La investigación se centra en diseñar molinos de viento para generar electricidad. Como prototipo se prediseñó un aerogenerador de 3 m. de radio que se moviera con velocidad del viento de 4 a 6 m/s, velocidades que pueden ser encontradas en sitios escogidos cerca de Bogotá. El molino debe girar a velocidades de rotación altas, por lo que se escogieron lambdas (λ) de 4 y 5. El número de aspas generalmente usado es de 2, 3 y 4, por lo que se realizaron pruebas con dicha cantidad.

Se ensayaron tres tipos diferentes de perfiles, el NACA 4412, el VELA y EL VELA TRIANGULAR (Tabla 1).

El ángulo alfa, (véase figura 1), el coeficiente C_j y la relación $(C_d/C_l)_{min}$, fueron obtenidos de un trabajo preliminar anterior (4) y de la tabla citada por

PARA PERFIL CON CD/CL MINIMO DE 0.016 CON LAMPDA DE DISEÑO IGUAL A 4.0 Y CON 4.0 AL/						
COEFICIENTE DE SUSTENTACION 0.92 PARA ALFA IGUAL A 0.0						
ROTOR DE RADIO 0.1863 Y CON COEFICIENTE DE POTENCIA 0.492						
ESCALA GEOMETRICA 1 : 27.0						
GEOMETRIA DEL ALABE IDEAL GEOMETRIA DEL ALABE LINEALIZAC						
RADIO DEL ELEMENTO DE ALABE	CUERDA	ANGULO BETA	CUERDA	ANGULO BETA	CUERDA	ANGULO BETA
0.0093	0.0249	52.46	0.0431	25.99		
0.0186	0.0380	45.47	0.0417	25.07		
0.0279	0.0433	39.36	0.0402	24.15		
0.0373	0.0441	34.23	0.0388	23.23		
0.0466	0.0426	30.00	0.0374	22.31		
0.0559	0.0402	26.54	0.0359	21.39		
0.0652	0.0375	23.69	0.0345	20.47		
0.0745	0.0349	21.34	0.0330	19.55		
0.0838	0.0324	19.37	0.0316	18.63		
0.0932	0.0302	17.71	0.0302	17.71		
0.1025	0.0281	16.30	0.0287	16.79		
0.1118	0.0263	15.08	0.0273	15.87		
0.1211	0.0247	14.03	0.0258	14.95		
0.1304	0.0232	13.10	0.0244	14.03		
0.1397	0.0219	12.29	0.0230	13.11		
0.1491	0.0207	11.57	0.0215	12.19		
0.1584	0.0196	10.93	0.0201	11.27		
0.1677	0.0186	10.35	0.0186	10.35		
0.1770	0.0177	9.83	0.0172	9.43		
0.1863	0.0169	9.36	0.0158	8.51		

TABLA 2. Muestra de resultados de un álabe linealizado.

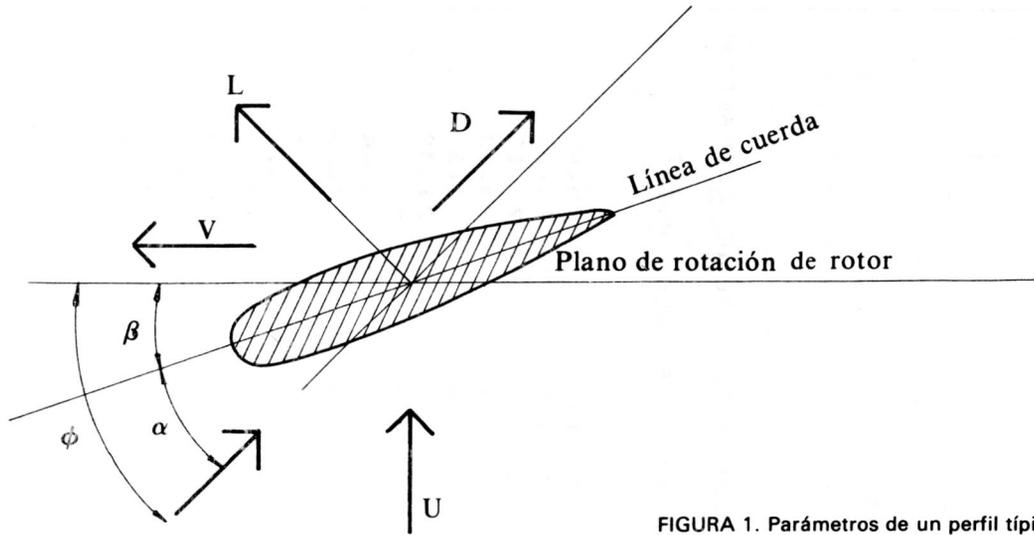


FIGURA 1. Parámetros de un perfil típico.

Jansen et al (1), pág. 10, para valores típicos. Dichos valores son obtenidos de experimentación y recopilados en diagramas polares (véase Catalogue of Aerodynamics... (7) para varios ejemplos).

Las principales ecuaciones usadas son desarrolladas por Jansen et al (1) pág. 24 y siguientes, Jansen (3) y son:

$$C_{Pmax} = \left(1 - \frac{1.386}{B} \text{Sen} \frac{\phi}{2} \right)^2 \frac{16}{27} \left(e^{-0.35\lambda} \frac{C_d}{C_L} \lambda \right)$$

de diseño.

$$\phi = \frac{2}{3} \text{arc cotg} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right)$$

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R}$$

$$P_{ot} = \frac{1}{2} \pi \rho U^3 R^2 \eta C_{pmax}$$

$$C = \frac{8\pi\Gamma}{BC_L} (1 - \cos\phi)$$

$$\beta = \phi - \alpha$$

$$C_p = C_Q \lambda$$

El Ct se obtiene directamente de los datos en los ensayos.

en donde se tienen en cuenta el coeficiente de Betz, la rotación de la estela, el arrastre del aspa y las pérdidas en los extremos debido al número finito de aspas. Se asumió que el λ óptimo (λ_o) es igual al

Se linearizaron los álabes suponiendo que se extrae la máxima energía al viento entre los 0.5 y 0.9 del radio de éstos. La tabla 2 muestra un ejemplo de los resultados ya computarizados.

TABLA 3. Características de las aspas experimentadas.

Tipo de álabes	λ	B	Cl	$(C_d/C_l)_{min.}$	C_{pmax}	R	Escala
NACA 4412	5	2	0.92	0.016	0.473	0.1972	1:26
	5	3	0.92	0.016	0.489	0.1941	1:26
	5	4	0.92	0.016	0.496	0.1855	1:27
	4	2	0.92	0.016	0.464	0.1480	1:35
	4	3	0.92	0.016	0.482	0.1881	1:27
	4	4	0.92	0.016	0.492	0.1863	1:27
VELA TRIANGULAR	5	2	1.00	0.100	0.247	0.1973	1:36
	5	3	1.00	0.100	0.255	0.1942	1:36
	5	4	1.00	0.100	0.259	0.1927	1:36
	4	2	1.00	0.100	0.286	0.1939	1:34
	4	3	1.00	0.100	0.298	0.1795	1:36
	4	4	1.00	0.100	0.304	0.1778	1:36
VELA	5	2	1.00	0.050	0.382	0.1969	1:29
	5	3	1.00	0.050	0.394	0.1933	1:29
	5	4	1.00	0.050	0.400	0.1923	1:29
	4	2	1.00	0.050	0.392	0.1943	1:29
	4	3	1.00	0.050	0.408	0.1905	1:29
	4	4	1.00	0.050	0.416	0.1884	1:29

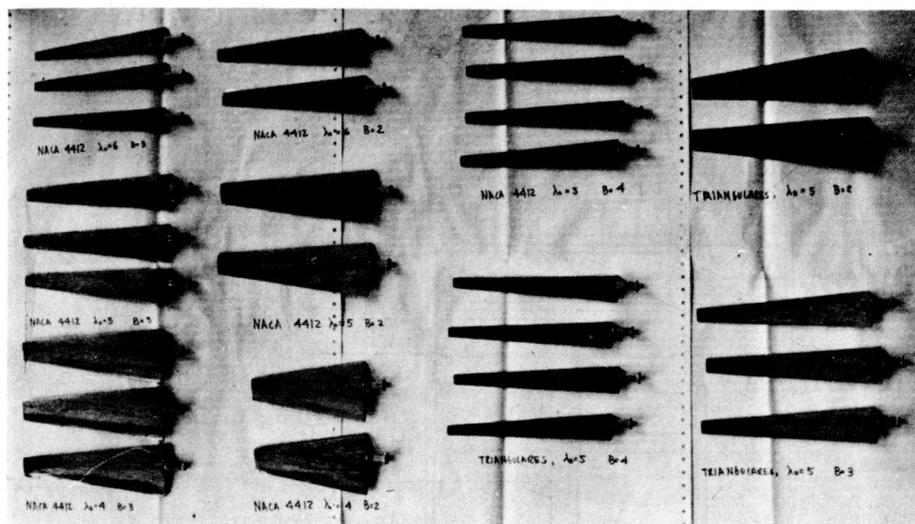


FOTO 1. Algunos perfiles hechos por el método de copiado por proyección.

En estos cálculos no se tuvieron en cuenta el factor de interferencia axial ni el factor de interferencia rotacional. Se fijó el comportamiento de un perfil a un número de Reynolds (Re) típico y no se ajustaron dichos valores al diseño final.

La tabla 3 muestra los resultados de dichos cálculos. Las hélices fueron construidas por una máquina de tallado de álabes (Véase revista "INGENIERIA E INVESTIGACION" Vol. 2 N^o 1). La fotografía N^o 1 muestra algunos de los álabes tallados.

TUNEL DE VIENTO Y APARATOS DE MEDIDA

Túnel de viento. Se modificó la cámara de pruebas del túnel de viento subsónico de circuito cerrado de HP., existente en el laboratorio de hidráulica. Jansen (3) determinó que una relación de 0.46 entre el área barrida por el modelo y el área de la sección transversal de la corriente de aire, permite obtener resultados confiables en el ensayo. La cámara de pruebas se diseñó de forma octagonal con un área transversal de 3572 cm² en donde habrá una corriente efectiva de 65.6 cm. de diámetro lo que,

descontando la capa límite y la expansión de estela aguas abajo del molino, permitirá probar molinos de 40 cm. de diámetro como máximo. La velocidad mínima del viento en la cámara de pruebas es de 14 m/s y la máxima de 28 m/s lo que permitirá λ s entre 3.5 y 7.0. La figura 2 muestra el túnel modificado con los pitot para medir la velocidad del viento.

Medición de potencia: Para determinar la potencia generada por los modelos es necesario medir dos parámetros por separado: el torque y la velocidad angular. Se usó un estroboscopio que permite medir velocidades angulares entre 200 RPM y 25.000 RPM. El rango de velocidades de los modelos puede estar entre 1.000 y 10.000 RPM.

Para medir el torque se diseñó un pequeño freno de Prony. Entre los parámetros de diseño se tuvieron en cuenta el espacio disponible, el tipo de freno, los materiales del apareado de fricción, la potencia de diseño y su velocidad angular, la presión admisible de los materiales, los parámetros geométricos dependientes del tipo de freno, la sensibilidad de aplicación de carga y la refrigeración. La figura 3

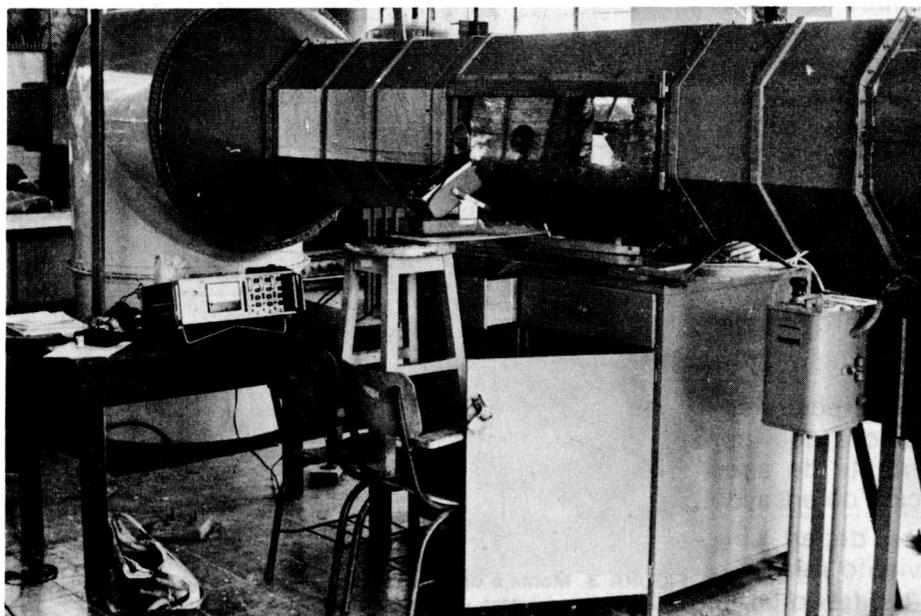


FOTO 2. Vista general del túnel de viento con los instrumentos usados en la experimentación.

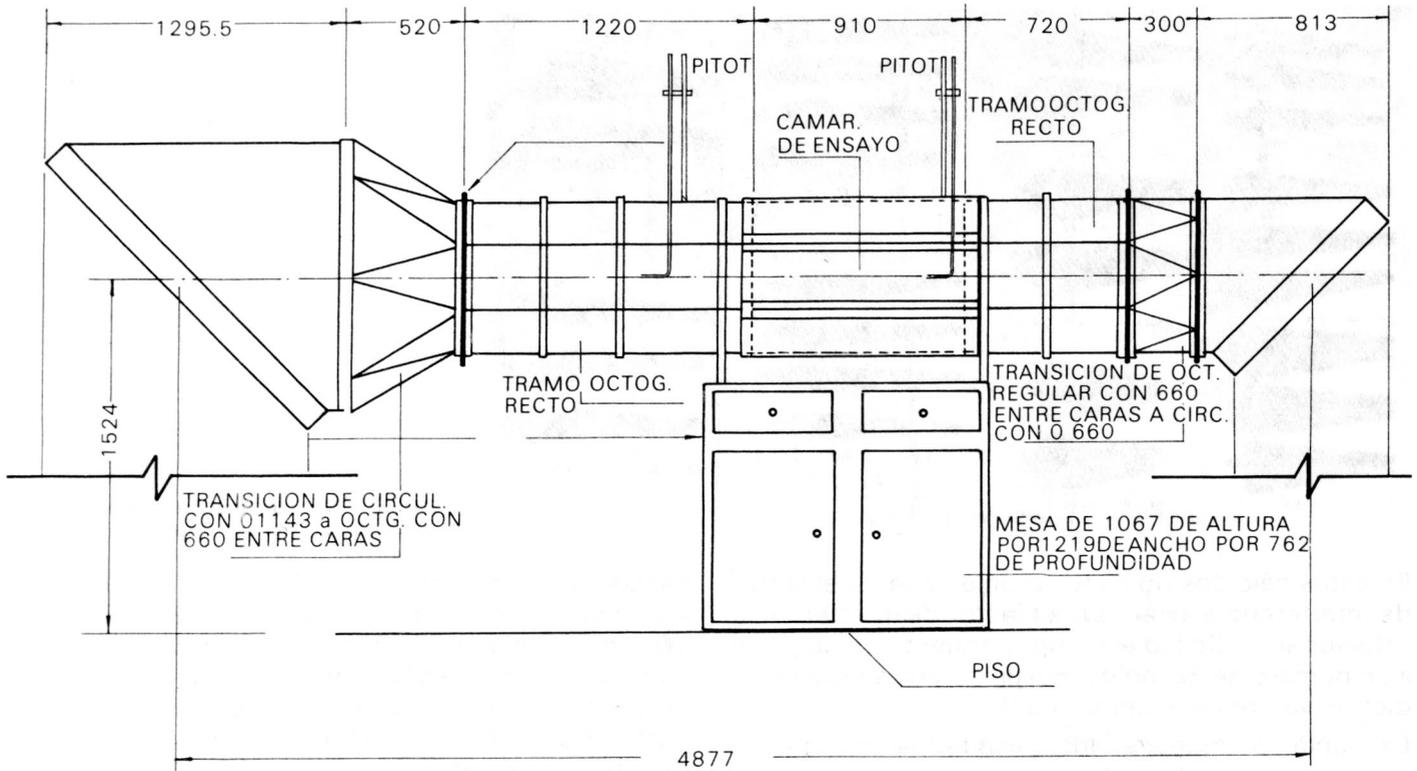


FIGURA 2. Túnel de viento modificado.

muestra los instrumentos de ensayo.

Transductores: Los ensayos para efectuar con modelos de molinos de viento implican la medición de dos fuerzas: la resistencia axial T del modelo y la fuerza F_0 que produce el torque y que es la fuerza de reacción de la carcasa del freno con respecto al tambor del freno, aplicada a una distancia arbitraria. Se utilizaron transductores (deformímetros) de fuerza para medirlas.

Termómetro de mercurio: Se utiliza para medir la temperatura del aire que circula dentro del túnel.

Manómetros diferenciales: Se usaron dos manómetros diferenciales para medir la presión dinámica, como lo muestra la foto 3.

Indicador de deformaciones: La finalidad de este instrumento es formar el puente de Wheatstone en el cual el deformímetro del transductor constituye una resistencia del circuito. Se utilizó un indicador de deformaciones tipo 3107, marca Yokogawa. La foto 2 muestra el indicador con el estroboscopio.

EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

En la experimentación se trabajó a Reynolds de 10^4 a 10^5 debido a la estabilidad del sistema y al peligro de que las aspas se rompieran a un número mayor de 5.000 RPM.

Se hicieron las correspondientes correcciones por efecto de la cámara cerrada debido a que los ensayos son realizados en una corriente de aire restringida por las paredes de la sección de ensayo.

En todos los ensayos los modelos deben ser impulsados con una velocidad del viento relativamente alta y con una apertura total del freno para

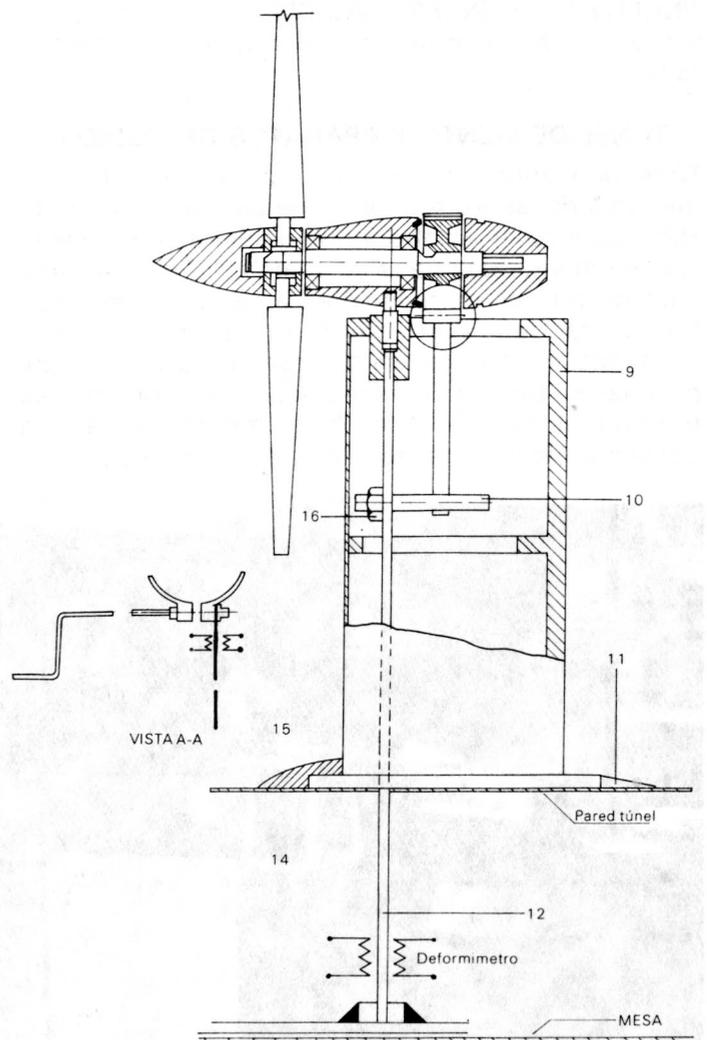


FIGURA 3. Montaje del modelo en donde se muestran la posición de los deformímetros.

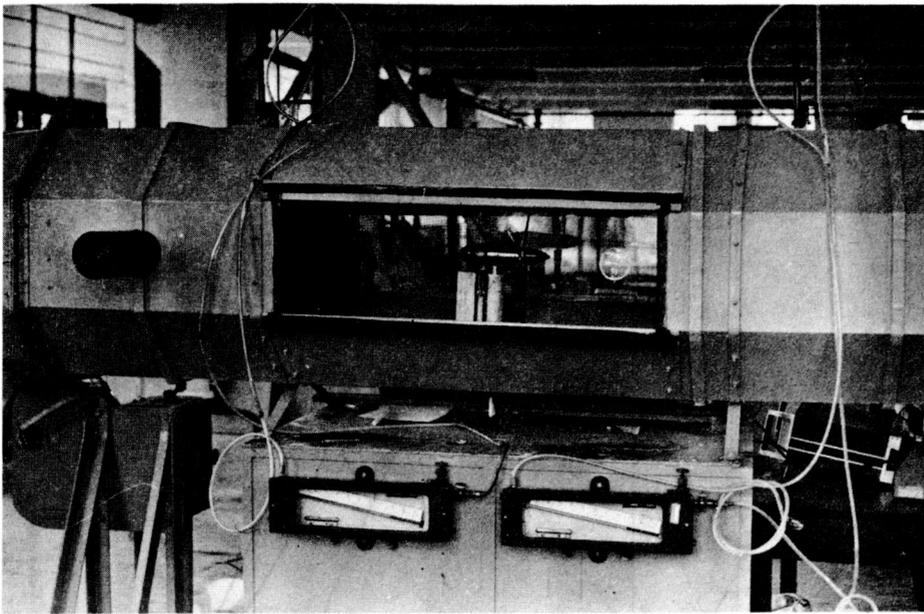


FOTO 3. Vista general del montaje del modelo en el túnel de viento.

lograr el arranque del modelo a las velocidades de ensayo. Posteriormente se disminuye la velocidad para evitar que el modelo se desboque.

Se empieza con lambdas altos observándose una relativa estabilidad del modelo; a medida que disminuimos, hay un aumento de la vibración y el modelo se vuelve inestable. El freno se recalienta, lo que obliga a detener el experimento y esperar que las zapatas se enfríen. Por otra parte, la inestabilidad obliga a tomar los datos de una manera instantánea. Las medidas obtenidas con lambdas de 4 y 2 aspas

resultaron incoherentes por la alta inestabilidad del modelo, por lo que se desecharon en el informe final. Las figuras 4 al 9 muestran los resultados obtenidos de C_p VS λ para los diferentes modelos. De dichos gráficos inferimos que los mejores modelos para esos Re y lambdas son los NACA de 4 y 3 aspas siguiendo las velas triangulares y por último las que tienen peores condiciones son los perfiles tipo vela. Los modelos diseñados con lambda 5 muestran su máxima C_p entre lambdas de 3.5 a 4.5 ajustándose más al diseño los NACA. Los tipo Vela tienden a tener su mejor eficiencia en lambdas de 3 a 3.5, los C_p menores son los tipo Vela con cualquier lambda y

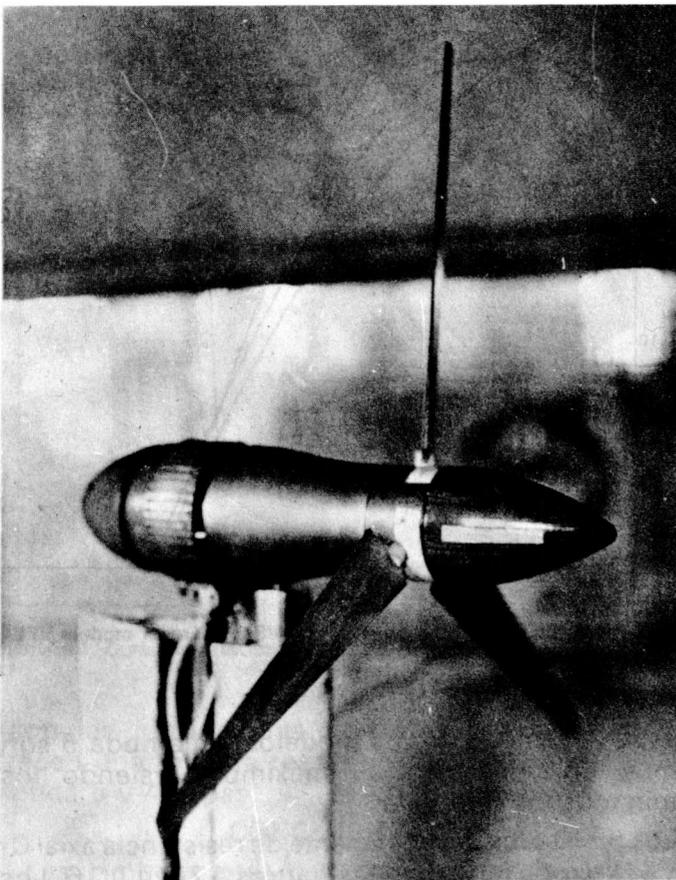


FOTO 4. Modelo montado con el freno de Prony.

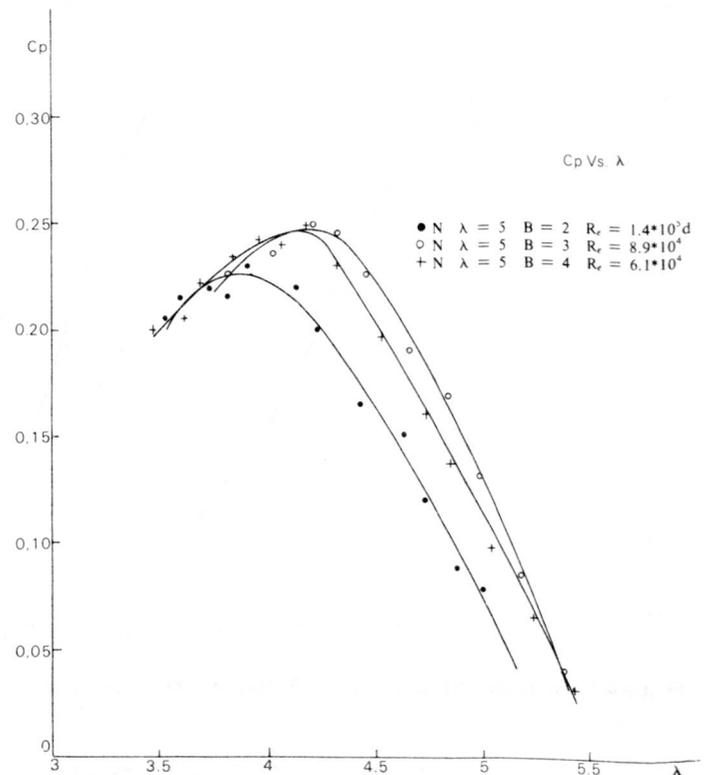


FIGURA 4. Curva característica de C_p VS λ para el modelo NACA 4412.

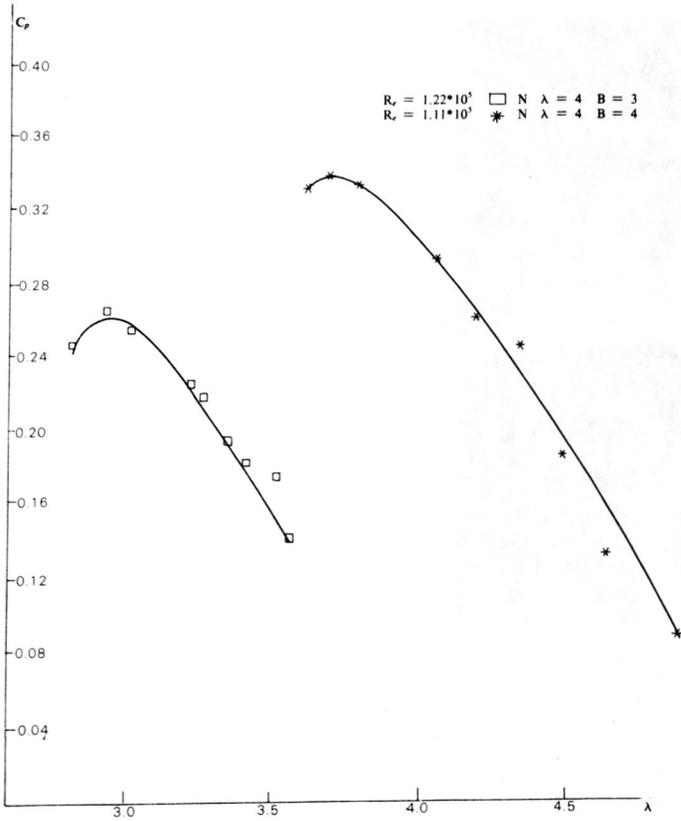


FIGURA 5. Curva característica de C_p VS λ para modelos tipo NACA 4412.

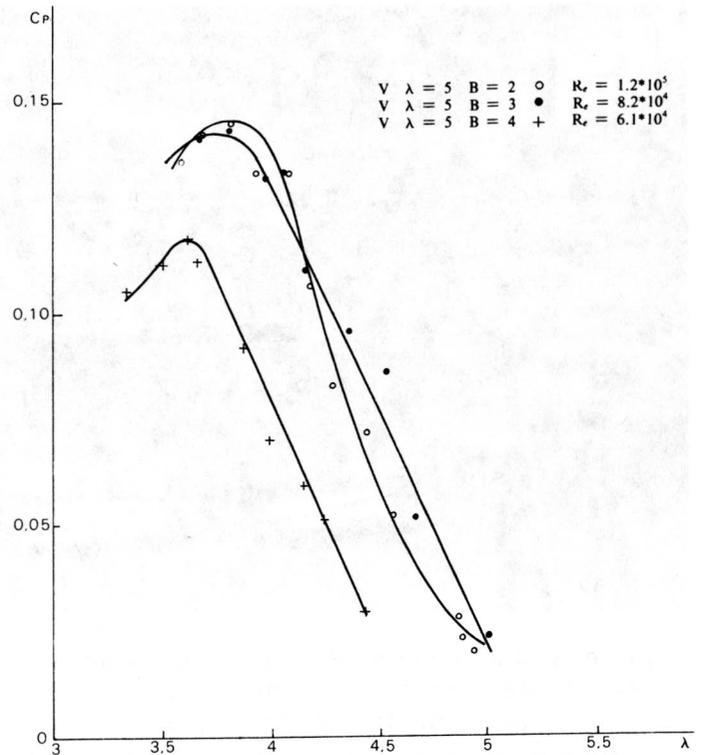


FIGURA 6. Curva característica C_p VS λ para el modelo VELA

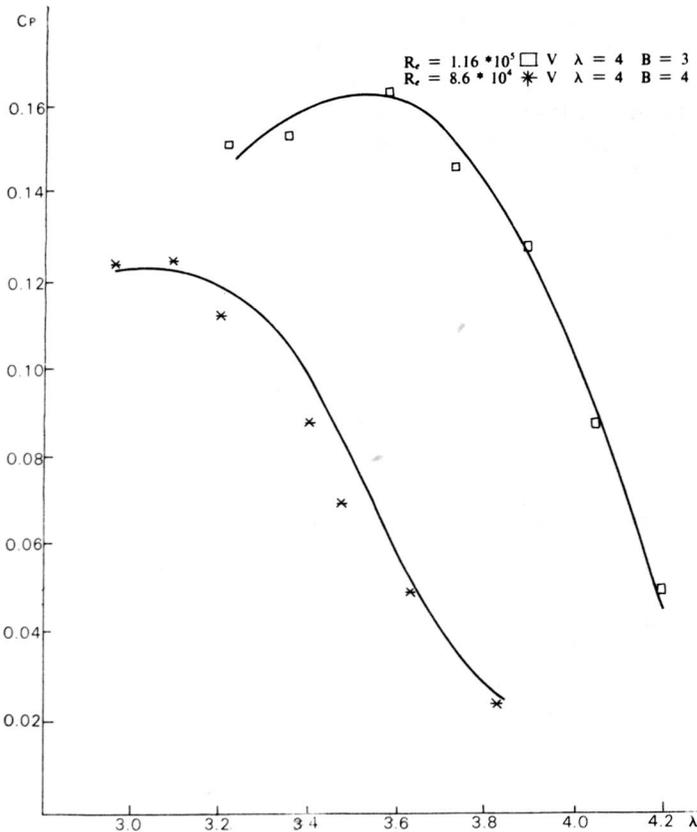


FIGURA 7. Curva característica C_p VS λ para modelos tipo VELA.

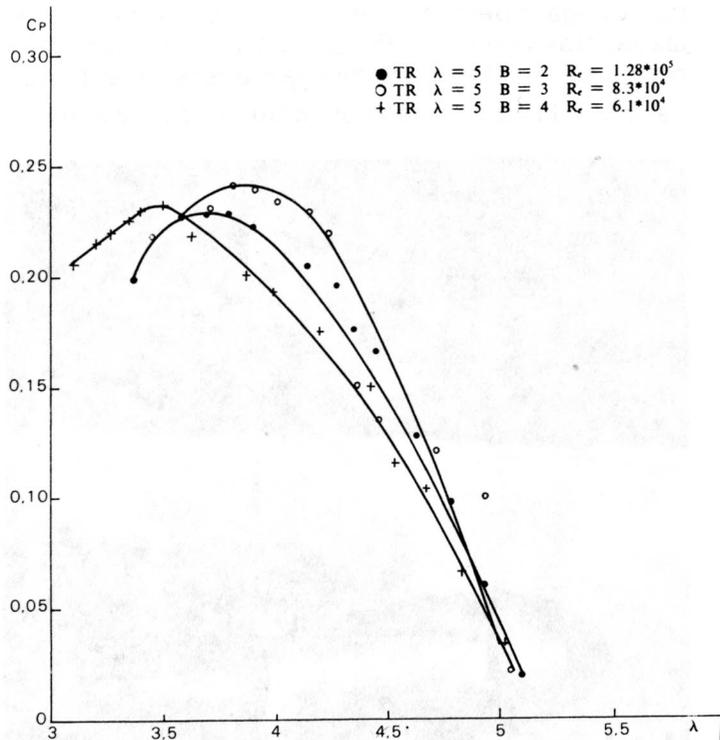


FIGURA 8. Curva característica de C_p VS λ para el modelo VELA TRIANGULAR.

aspas y lambda 4. Los modelos de lambda 5 son muy uniformes en su máximo C_0 siendo los mínimos los tipo Vela.

Los resultados del coeficiente de resistencia axial C_T VS λ se observan en las figuras 12, 14 y 16. Los mayores C_T se obtienen con modelos tipo vela

número de aspas. Las figuras 10, 13 y 15 muestran los resultados de C_0 VS λ . Los mayores coeficientes de torque son alcanzados por NACA de 3 y 4

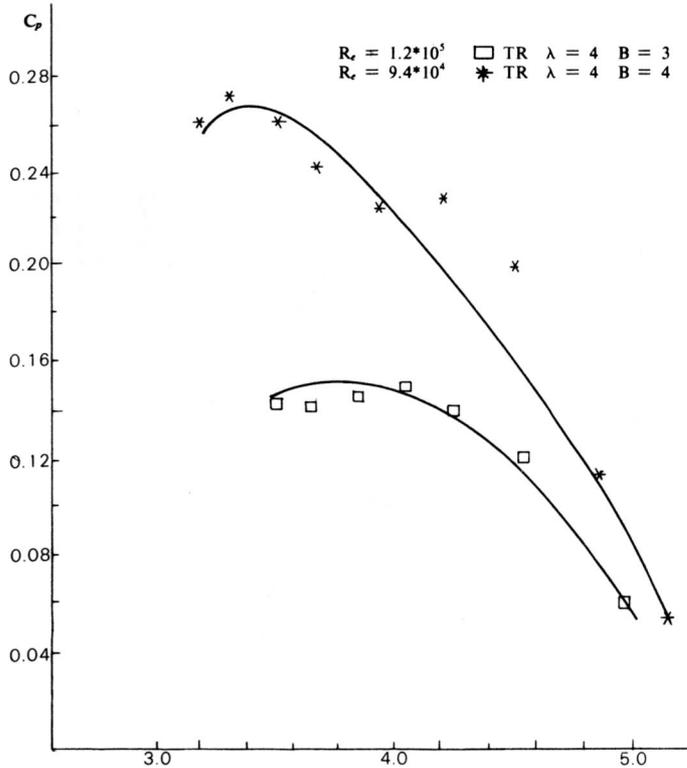


FIGURA 9. Curva característica C_p VS λ para modelos tipo Vela triangular.

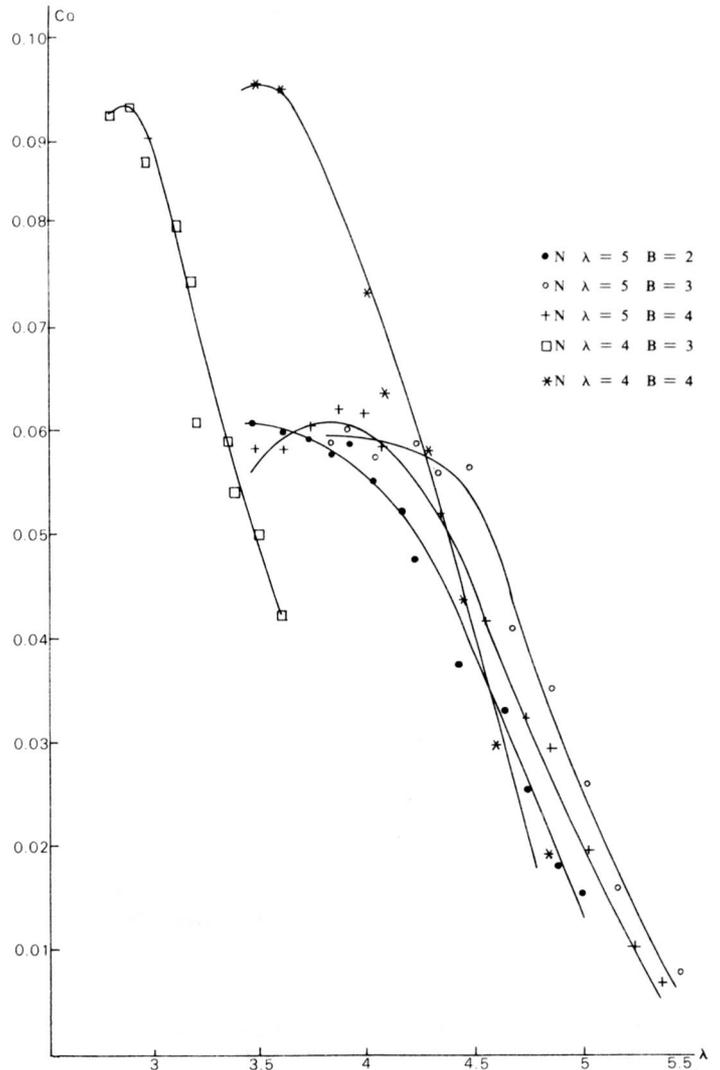


FIGURA 10. Curva característica de C_o VS λ para modelos tipo NACA 4412.

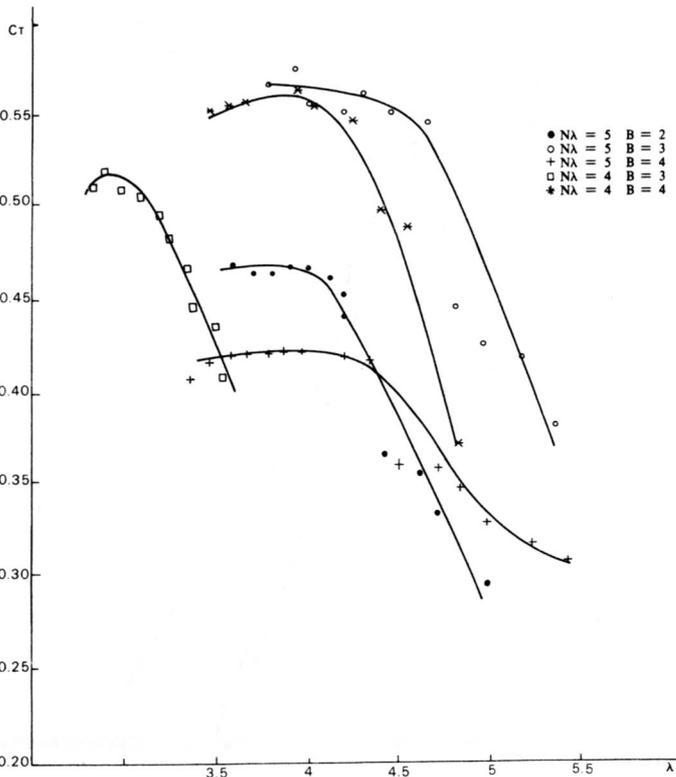


FIGURA 11. Curva característica de C_t VS λ para modelos tipo NACA 4412.

triangular con lambdas de 4 y 4 aspas. Los que ofrecen una mínima resistencia son los modelos lambda 5 y 4 aspas.

CONCLUSIONES

1- Las lambdas obtenidas en el túnel de viento están comprendidas entre 2.5 y 5.0. Esto es

debido a las características del túnel de viento, al tamaño del modelo y a la sensibilidad del freno de Prony. Debido a esto, no se pudo hacer toda la curva característica del modelo.

- 2- Se observa la influencia del número de Reynolds en los resultados. Analizando las curvas C_p VS λ de todos los modelos se concluye que los mayores C_p se obtienen con Re altos. Esto se debe a que los perfiles tomados como muestra trabajan mejor a dichos Re. Para obtenerlos habría que aumentar la velocidad del viento en la cámara de pruebas o aumentar las revoluciones en el modelo que no es posible.
- 3- Para los NACA se alcanzaron C_p cercanos a 0.34 con $\lambda = 4$ y $B = 4$ lo que se acerca a los resultados experimentales estándares.
- 4- En los modelos tipo Vela la similitud de comportamiento a Re parecidos es más evidente. El C_p sin embargo, es menor que los NACA.
- 5- Para los modelos tipo Vela triangular se observa que trabajan mejor para Re de 10^4 y no de 10^5 .

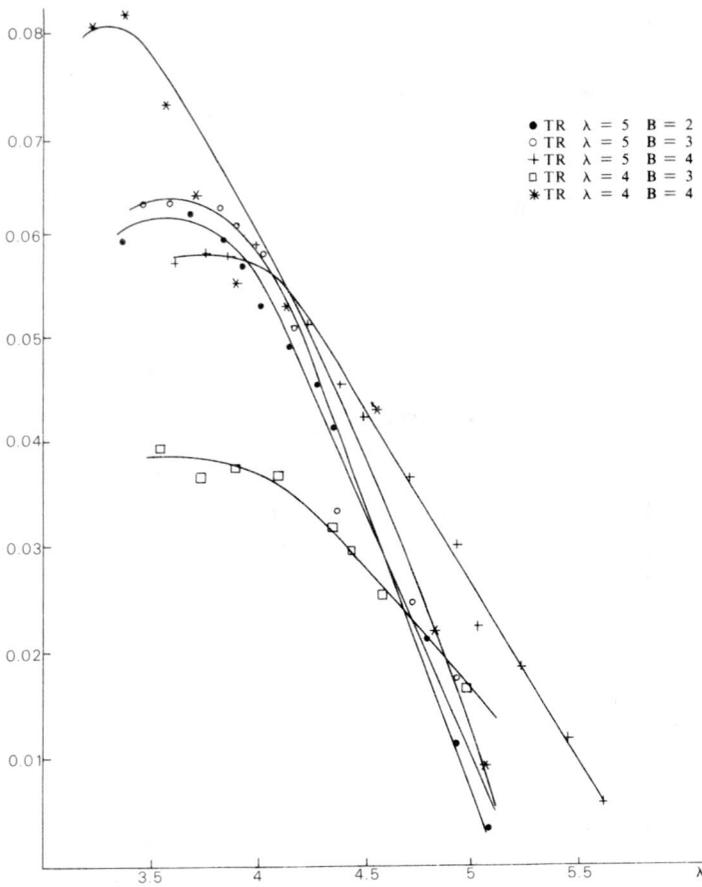


FIGURA 12. Curva característica C_p VS λ para modelos tipo Vela triangular.

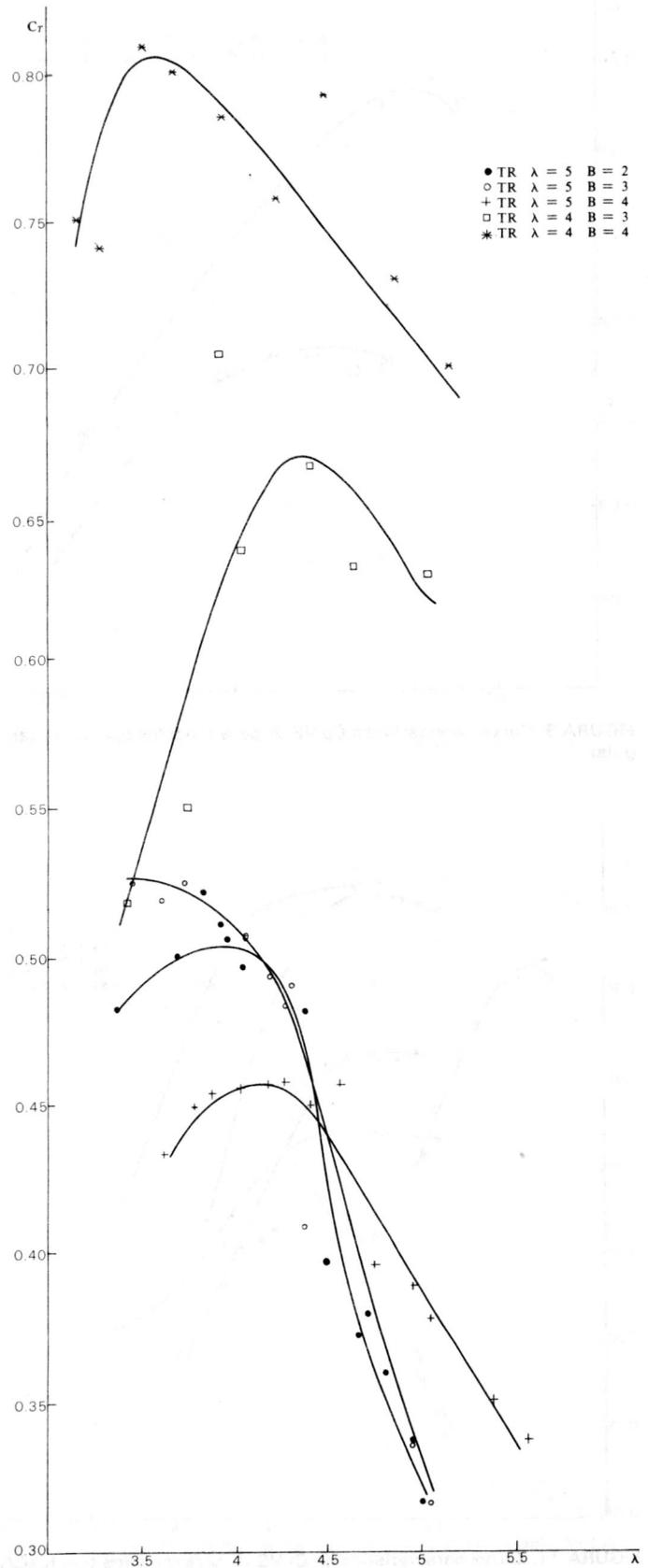


FIGURA 13. Curva característica C_t VS λ para modelos tipo Vela triangular.

A Re de 10^4 trabajan mejor que los NACA estando su C_p máximo a 0.28.

6- Hay un corrimiento entre los λ óptimos (lambdas para el máximo C_p en cada gráfica) y los λ de diseño (tomados en los cálculos teóricos).

Las curvas en las que ambos lambdas están cercanos indican que es el mejor diseño. Son los NACA $\lambda = 4$, $B = 4$, Vela Triangulares $\lambda = 4$, $B = 4$.

7- En las figuras de las curvas características del coeficiente de torque muestran que los modelos mejores son los de menor lambda y generalmente los de 4 álabes. Esto se ajusta a la teoría, pues los molinos usados para bombeo se diseñan con lambdas bajos y número de álabes altos. Los molinos para aerogeneración se diseñan con lambdas altos y número de álabes bajos, pues lo importante es la potencia y no el torque.

8- Los coeficientes de empuje axial (C_T) son menores en los NACA y Vela. Se observa también una relación entre el valor de C_T y el número de Reynolds aumentando al incrementarse éste.

El coeficiente es importante al diseñar la torre y las fuerzas que el viento ejerce sobre los álabes.

9- La gran inestabilidad de los modelos observada en las pruebas impide obtener los puntos con mayor precisión.

10- En general, las diferencias de los datos obtenidos con las pruebas realizadas a nivel internacional son debidas al tamaño reducido del modelo (errores en escala y precisión), por la inestabilidad y las vibraciones y por la

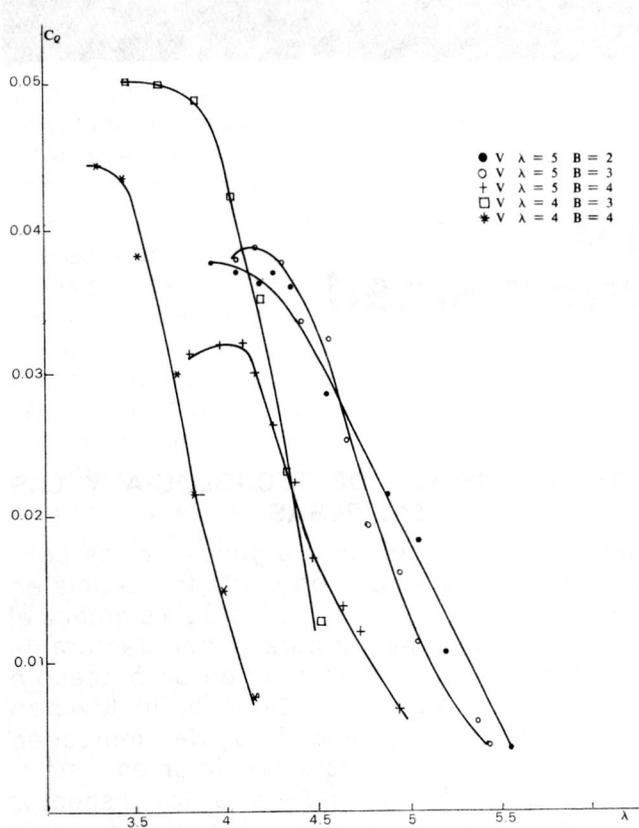


FIGURA 14. Curva característica Co VS para modelos tipo Vela.

calidad del aparato para medir el torque. Por su tamaño y por las revoluciones que tiene que soportar, hacen de la toma de datos algo muy difícil.

11- A pesar de todo, se obtienen resultados que, dejándolos en el campo comparativo y no tomando su valor absoluto, pueden ser de gran

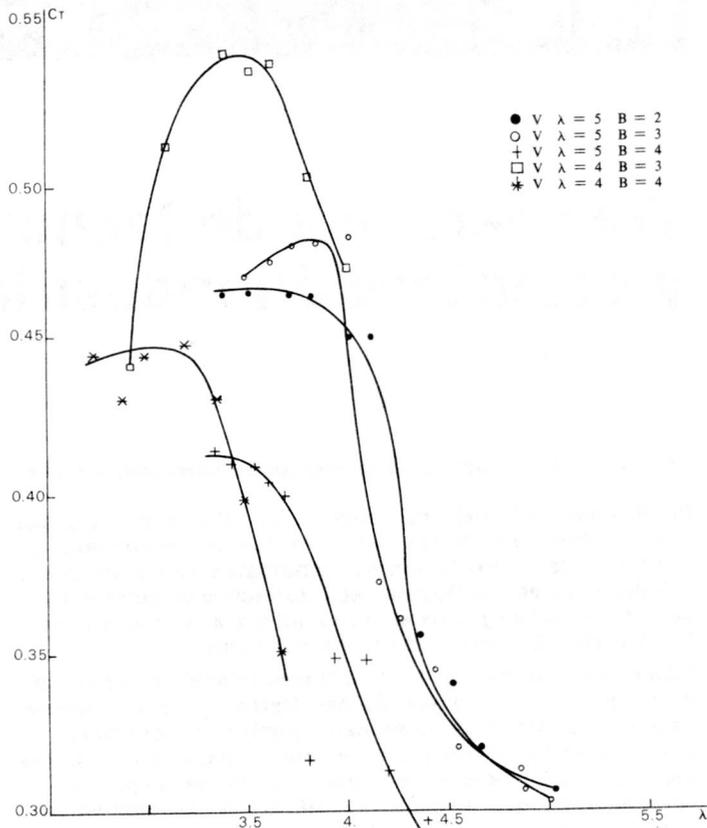


FIGURA 15. Curva característica CT VS para modelos tipo Vela.

ayuda para la escogencia del modelo que se requiere.

12- Es necesario, si se quiere trabajar con un mayor rigor científico y para obtener valores confiables de Cp, Co y CT, el construir un túnel de viento de mayores dimensiones, lo que permitiría ensayar mayores modelos, a diferentes Reynolds y velocidades del viento.

BIBLIOGRAFIA

W. A. M. Jansen y P. T. Smulders. **Rotor Design for Horizontal Axis Windmills**. Steering Committee for Wind energy in developing countries. Amersfoort, the Netherlands.

W. A. M. Jansen. **Horizontal-Axis for Running Wind Turbines for Developing Countries**. Steering Committee for wind energy in developing countries. Amersfoort, the Netherlands.

O. de Vries. **Wind-Tunnel Tests on a two-blade Horizontal-Axis**. Netherlands Energy Research Foundation.

José V. Fierro y Joaquín López C. **Diseño y construcción de un molino de viento, II Parte**. Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería

Mecánica, Universidad Nacional, Bogotá, 1982.

Fernando A. Merino. **"Diseño y Construcción de un Aerogenerador, Modelos II**. Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional, Bogotá, 1983.

Fernando Rey Romero. **Diseño y Construcción de un Aerogenerador, Modelos II**. Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional, Bogotá, 1983.

André Hageman. **Catalogue of Aerodynamic Characteristics of airfoils in the Reynolds number range 10⁴ - 10⁶**. Technische Hogeschool Eindhoven. Wind Energy Group.