

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE AIRE DENTRO DE UNA TORRE VORTICOSA*

Ricardo A. Bastianon

Servicio Naval de Investigación y Desarrollo

y

Luis Lorenzo

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Resumen

Este trabajo describe las experiencias realizadas en túneles de viento con el modelo de una torre cilíndrica con vórtice confinado, para el aprovechamiento de la energía eólica.

El estudio fue realizado para dos configuraciones distintas de la entrada de aire: a través de discos con un orificio central y con un embudo. Se analizaron los distintos parámetros que influyen en el funcionamiento, como son la posición de las aletas laterales, tamaño del orificio de los discos, posición del piso que representa al terreno y el número de Reynolds.

La visualización de los ensayos fue obtenida mediante inyección de humo e hilos adheridos en distintos puntos del modelo. Estas observaciones y otras mediciones efectuadas fueron analizadas para explicar el complejo comportamiento del fluido dentro de la torre.

Finalmente, se estableció la existencia de una gran cantidad de variables interdependientes que deben ajustarse cuidadosamente si se desean lograr condiciones adecuadas de funcionamiento.-

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR FLUX IN A VORTEX TOWER

Abstract

This paper describes experiments made in wind tunnels with a cylindrical tower model with confined vortex for the use of wind energy.

The study was performed for two different configurations of air entrance: through discs with a central hole, and through a funnel. The different parameters which influence the functioning were analyzed, such as position of the vertical vanes, size of the hole of the discs, position of the floor, and Reynolds' number.

The visualization of the tests was obtained through smoke injection and threads adhered in different parts of the model. These observations and other measurements made were analyzed in order to explain the complex behaviour of the fluid in the tower.

Finally, the existence of a great number of interdependent variables was established which should be carefully adjusted if adequate functioning conditions are to be obtained.

* Este trabajo ha sido desarrollado con subsidio de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.

1. Introducción

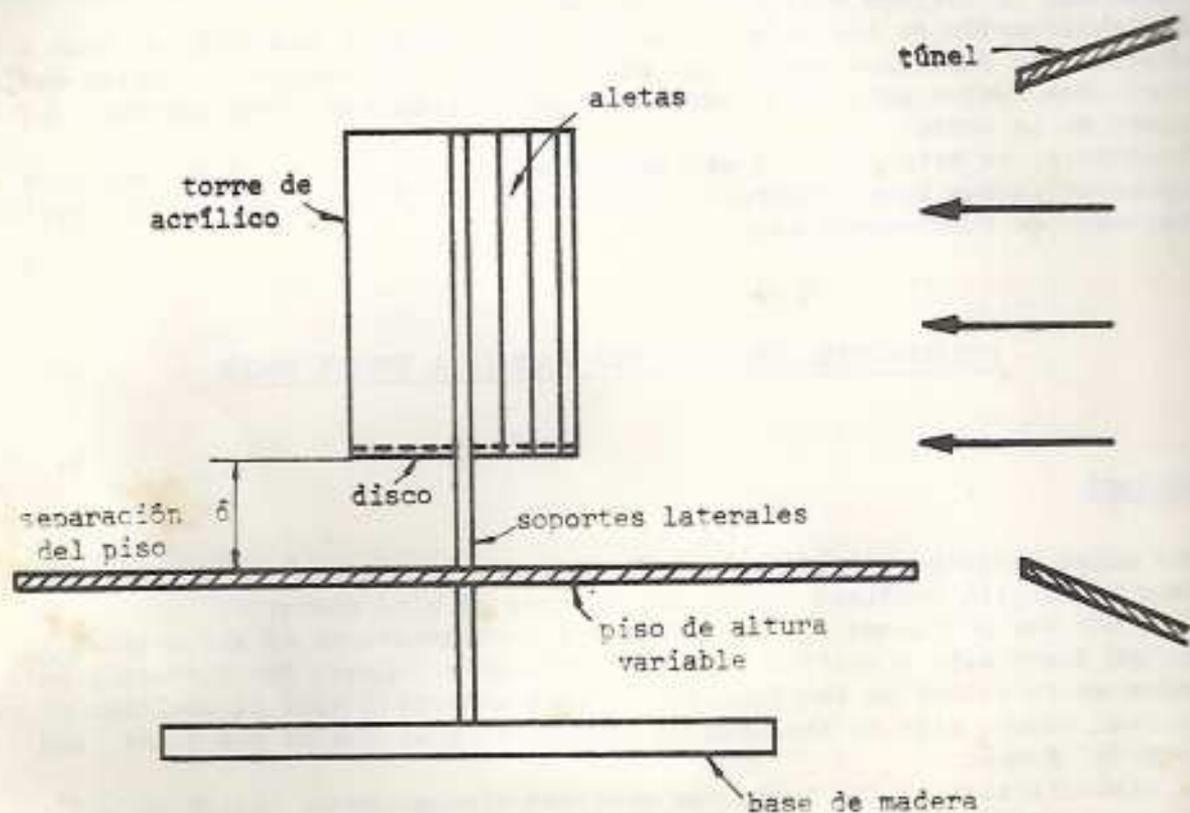
El aprovechamiento de la energía eólica ha motivado el estudio de una torre cilíndrica, con entrada de viento por ventanas laterales. Esta torre genera en su interior un vórtice confinado con un núcleo de baja presión que succiona aire a alta velocidad a través de una toma en la base inferior del cilindro, donde se encuentra colocada una hélice.

Este sistema actúa como un concentrador de energía con una serie de ventajas potenciales, las cuales han sido descriptas en las Refs. 1 a 3.

Para investigar el comportamiento del flujo de aire dentro de la torre y determinar la influencia de los parámetros de diseño, se ha construido un modelo en material acrílico y se lo ha ensayado en el túnel aerodinámico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. (Ref. 4).

2. Descripción del Aparato

El equipamiento construido y que se muestra esquemáticamente en la Figura 1, consta de un cilindro de 18cm de diámetro y 35cm de alto.



Esquema del aparato

Figura 1

En su parte anterior, enfrentando la corriente de aire, dispone de ventanillas longitudinales que pueden orientarse manualmente y fijarse en una posición determinada.

Se han ensayado dos tipos de aletas, de 5cm y 2,5cm de ancho, según se indica en la figura 2.

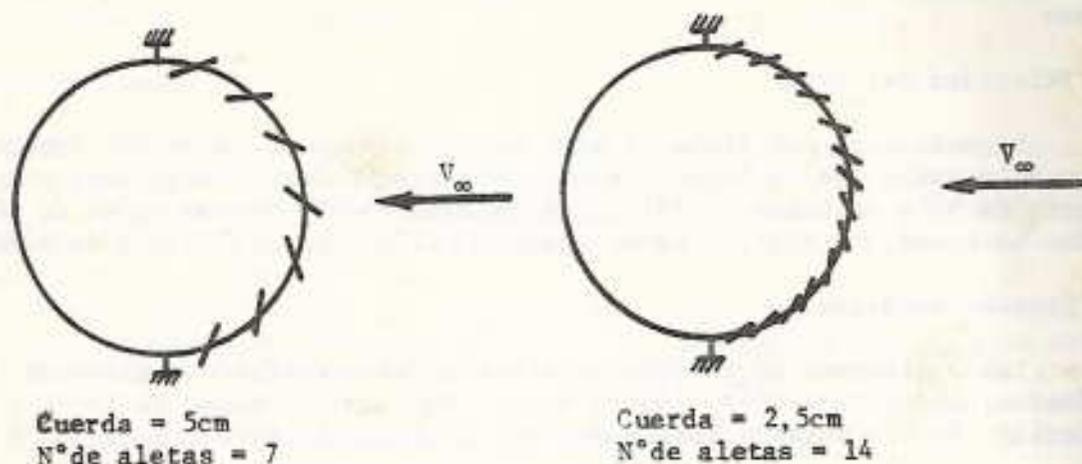


Figura 2

Este cilindro de acrílico es abierto en su parte superior, mientras que en la base lleva colocado un disco con un orificio central. Con el fin de analizar el efecto producido por el tamaño del orificio, se han construido 4 discos con distintos diámetros del agujero central. La medida de estos diámetros son 4, 6, 8 y 10 cm.

Estos discos también pueden ser reemplazados por un embudo construido en madera y cuya forma y dimensiones se muestran en la Figura 3. Los perfiles interno y externo del embudo corresponden, aproximadamente, a una parábola.

El cilindro de acrílico está soportado por barras verticales que se apoyan sobre una base de madera, permitiendo su instalación en el túnel de viento.

Entre este soporte de madera fijo en el túnel y la base inferior del cilindro, se ha colocado un piso horizontal, el cual puede desplazarse hacia arriba o hacia abajo a fin de poder estudiar el efecto suelo.

3. Instrumentación

3.1. Túnel de Viento

El túnel de viento empleado es marca SIAP, de sección abierta y circuito cerrado. Está provisto de un motor Schrage de velocidad variable, lo cual permite regular la velocidad del aire en la sección de pruebas, alcanzándose valores máximos de 32 m/s, que es suficiente para los vientos considerados.

3.2. Visualización del Flujo

A los efectos de estudiar cualitativamente el comportamiento del flujo del aire, se han adherido una serie de hilos a la pared interna del cilindro, en la

cara interior del disco inferior, en los labios del orificio central y también se han pegado filamentos sobre ambas caras de las ventanillas longitudinales.

Además se ha instalado un generador de humo de cantidad considerable, para poder visualizar la corriente de aire aún con vientos de elevada intensidad.

La inyección de humo se logra a través de una manguera plástica de 4,5 cm de diámetro, que puede orientarse y desplazarse según los requerimientos del ensayo.

3.3. Velocidad del aire

La velocidad del flujo de aire no perturbado se ha medido frente de la torre a la salida de la boca impelente del túnel. Se ha usado para ello un anemómetro de hilo caliente portátil, marca ANEMOTHERM, con un rango de 10 a 3000 m/min. La sonda del aparato es de sección cilíndrica de 0,635 cm de diámetro.

3.4. Presión estática

Las mediciones de presión estática se han realizado utilizando un micromanómetro, marca FLOW CORPORATION, modelo MM3, con un rango de 2" de líquido manométrico. En los ensayos realizados se usó alcohol isobutílico.

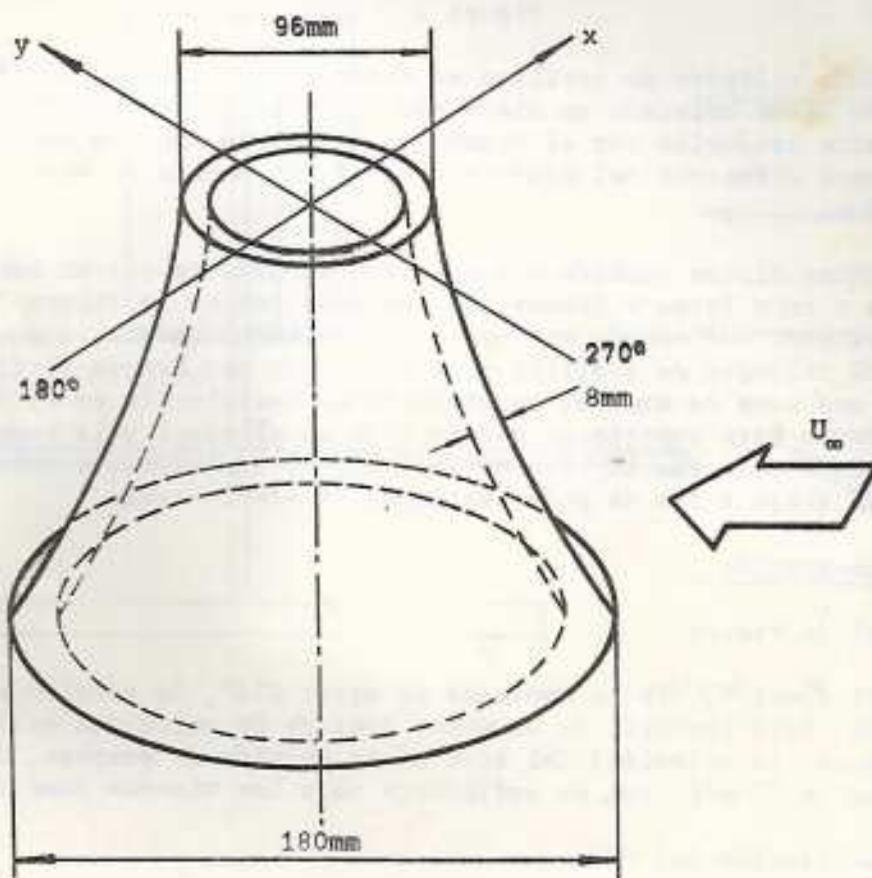


Figura 3

4. Análisis de los Ensayos con Discos de Distintos Orificios

Debido a la existencia de varios parámetros, como son posición de aletas, tamaño del orificio de los discos y posición del suelo, se ha tratado de variar sólo uno de ellos en cada ensayo, manteniendo a los otros en posiciones intermedias.

Analizaremos a continuación la influencia de cada variable.

4.1. Posición de aletas

La orientación de las aletas es sumamente importante ya que, según que su ángulo con respecto a la corriente sea positivo o negativo, el vórtice rotará en un sentido o en otro y si las aletas se mantienen paralelas a la corriente, en el interior de la torre no se genera ningún vórtice definido y sólo puede apreciarse un flujo desordenado.

Orientando todas las aletas en un sentido, el vórtice puede observarse claramente en el interior de la torre cilíndrica. El método más eficaz para esta observación consiste en suspender una pequeña masa metálica con un hilo e introducirla por la boca superior abierta del cilindro. La rotación de la pesa muestra la existencia de un flujo que rota y la violencia de rotación de la pesa revela la intensidad del vórtice confinado.

Usando un disco intermedio de 6cm de diámetro de orificio y una posición del suelo a 1,5cm de la base de la torre, se ubican las aletas individualmente con una orientación que indique la mayor rotación de la pesa suspendida del hilo. Para variaciones grandes en la posición de cada aleta, el efecto sobre la rotación es notable. Sin embargo, alrededor de la posición óptima y para variaciones angulares pequeñas pero no despreciables, es difícil evaluar su efecto. En estas circunstancias, la observación de los filamentos adheridos en ambas caras de cada aleta permite el ajuste más fino. En lo posible, si bien no siempre se logra, los hilos deben permanecer apoyados contra la cara de la aleta y sin flamear.

Aún en estas condiciones, resulta un poco difícil apreciar el comportamiento del flujo interno debido a que se forma una zona turbulenta en la parte inferior del cilindro, en la cual, el nivel de turbulencia aumenta a medida que nos acercamos al disco.

Es posible apreciar claramente el vórtice en la parte superior del cilindro y que la intensidad del mismo aumenta a medida que se cierran las aletas.

4.2. Tamaño de las aletas

Se ensayaron los dos tipos de aletas mencionadas. Con las de menor cuerda, se aprecia un mejor comportamiento de la torre con un vórtice más intenso. Se advierte además una mayor simetría de rotación.

Al aumentar el tamaño de las aletas, se destruye la simetría axial del vórtice y debido a este hecho, se advierte un desplazamiento notable del eje del vórtice en el tercio inferior de la torre (Figura 4), con salida de aire entre aletas en el tercio inferior del cilindro (Figura 5 y 6).

Este efecto desaparece con las aletas de menor cuerda y el eje del vórtice en este caso es aproximadamente coincidente con el eje del cilindro, existiendo succión de aire exterior, en lugar de salida de aire del interior del cilindro, (Figura 7).

4.3. Tamaño del Orificio

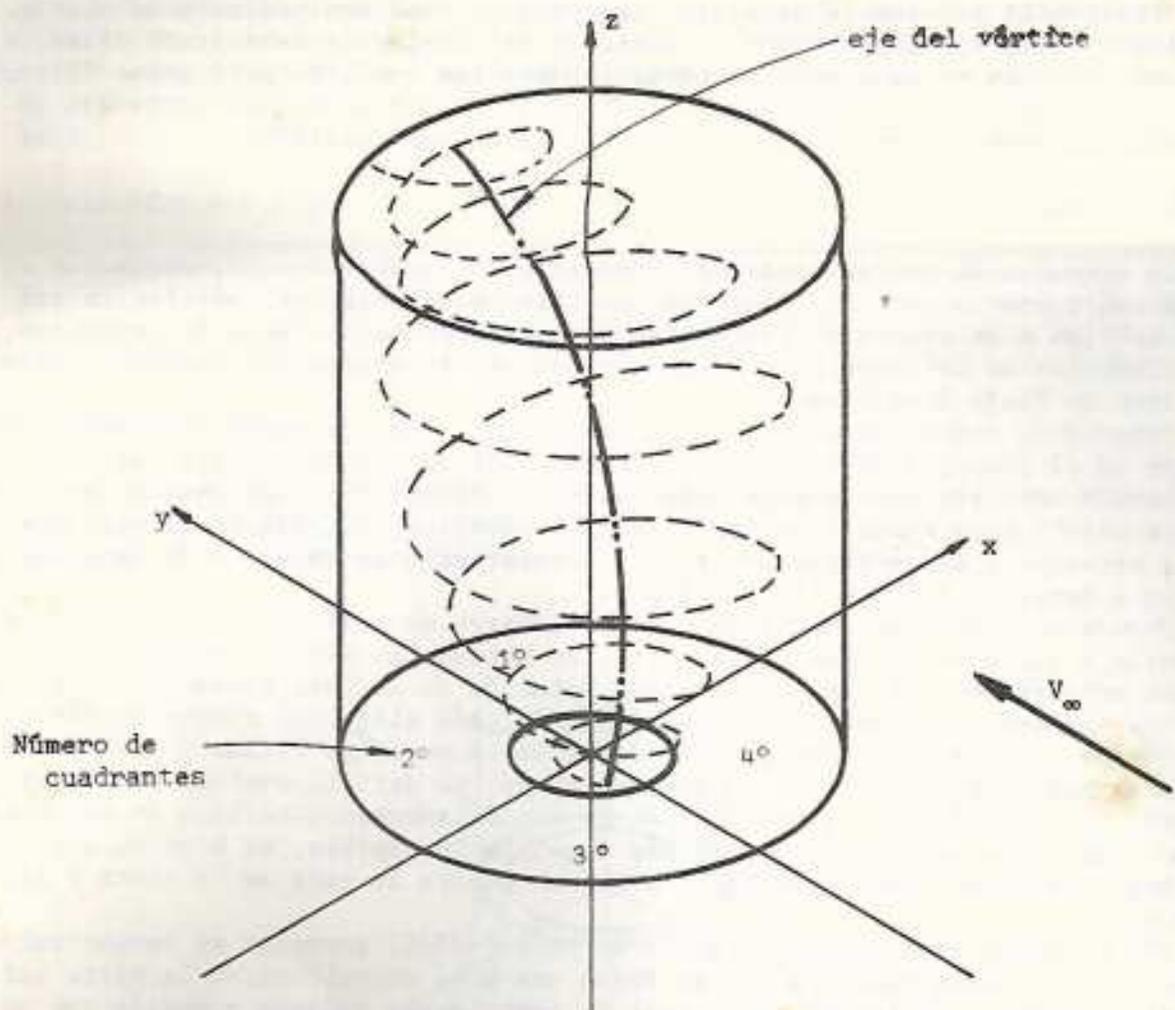


Figura 4

Se probaron los 4 discos con distintos diámetros de orificio central. A medida que el orificio del disco seleccionado disminuye, el nivel de turbulencia interna aumenta, siendo mayor en la periferia del cilindro. Además, la turbulencia en la zona inferior del cilindro disminuye al alejarse del disco.

El eje del vórtice sufre los desplazamientos indicados anteriormente, siendo esta desviación más acentuada cuanto mayor es el diámetro del orificio.

Como se sabe, el vórtice genera en las proximidades de su centro, una zona de alta velocidad de rotación y consecuentemente una baja presión que produce succión.

Sin embargo, en estas experiencias, la succión que pudo advertirse con los distintos discos fue mínima notándose un comportamiento más favorable con el orificio de 6cm de diámetro. Parecería que la agitación turbulenta existente en la parte inferior del cilindro impidiese la formación definida del vórtice, con la consiguiente disminución de la succión.

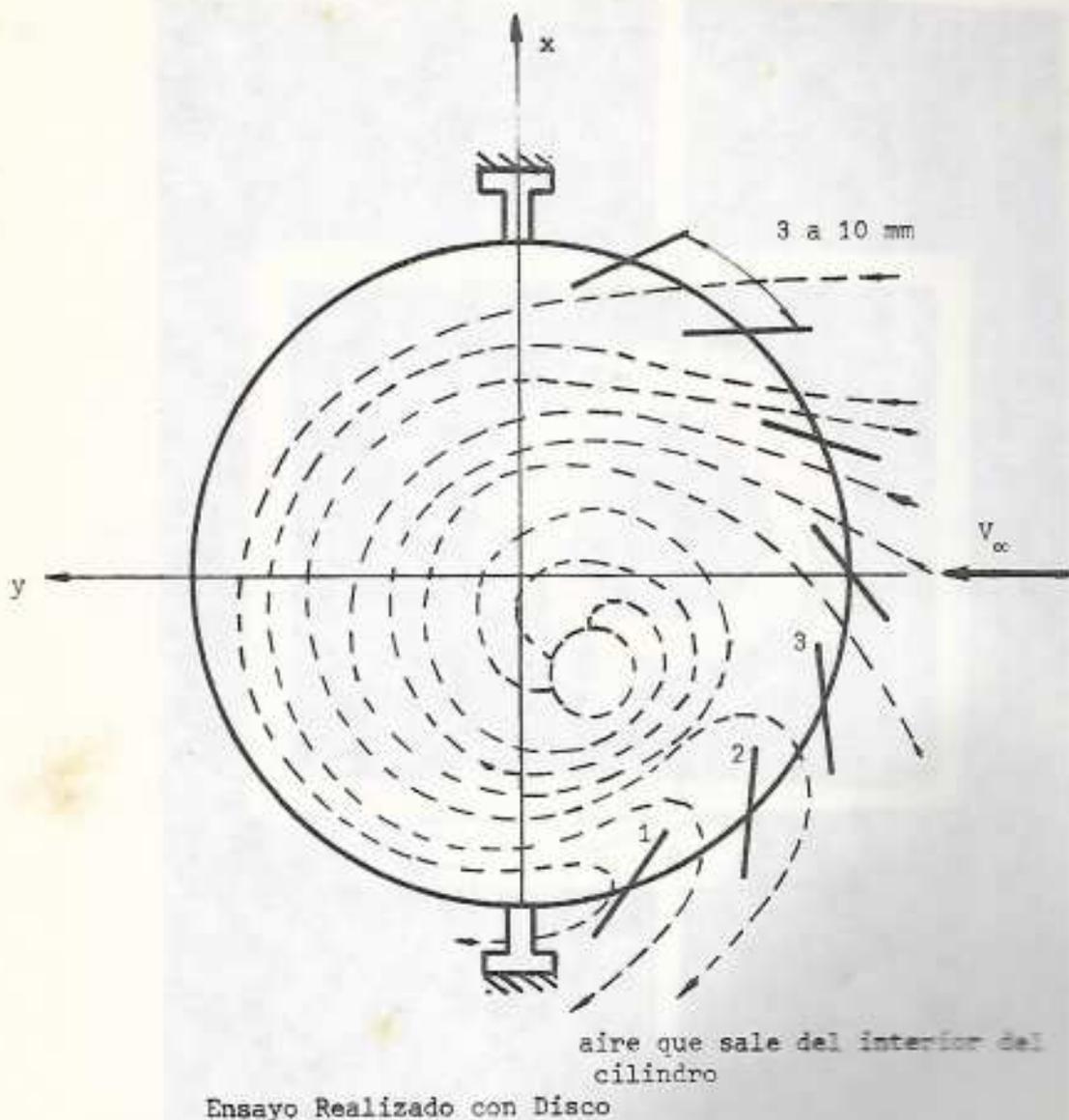


Figura 5

Mediante los hilos pegados en el borde del orificio, pudo observarse que existe succión en el tercer cuadrante y un flujo descendente en el primero. El segundo y cuarto cuadrantes contribuyen parcialmente en ambas direcciones (Figura 8).

Este fenómeno es más notorio cuanto mayor es el diámetro del orificio

En la zona superior del cilindro se advierte un vórtice bien definido y se aprecia perfectamente el efecto chimenea.

4.4. Posición del suelo

Se hicieron pruebas variando la posición del suelo para distancias $\delta = 0,5$

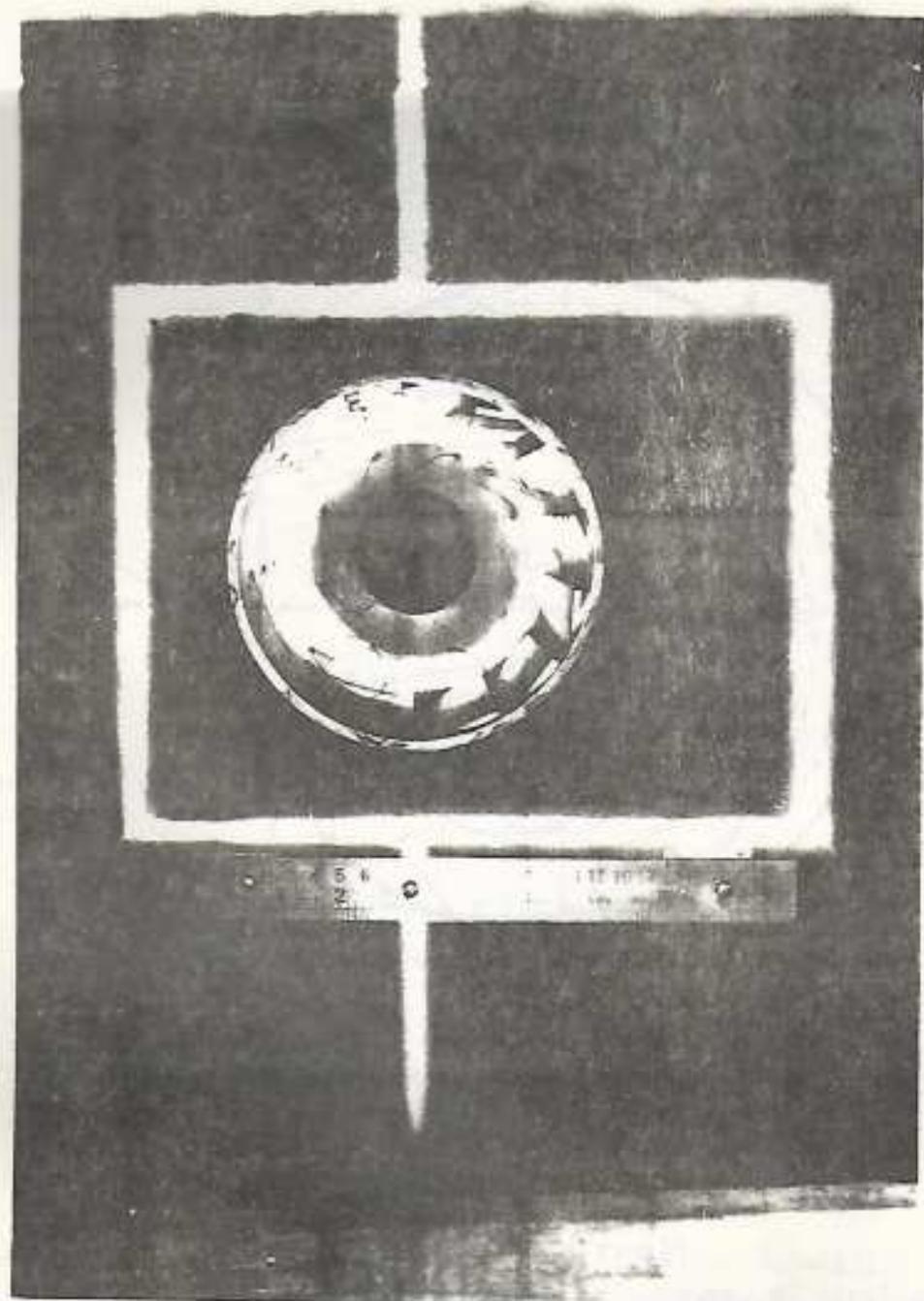


Figura 6

$\delta = 1,5\text{cm}$, $\delta = 2\text{cm}$ y se observó que el flujo ascendente es muy sensible con respecto a la posición del peso, si bien en ningún caso la succión es significativa. Para valores pequeños de δ ($0,5\text{cm} \leq \delta \leq 1\text{cm}$) se observa la mayor succión; (Figuras 9 y 10)

4.5. Velocidad de la corriente libre

A medida que aumenta la velocidad, se observa que la intensidad del vórtice .

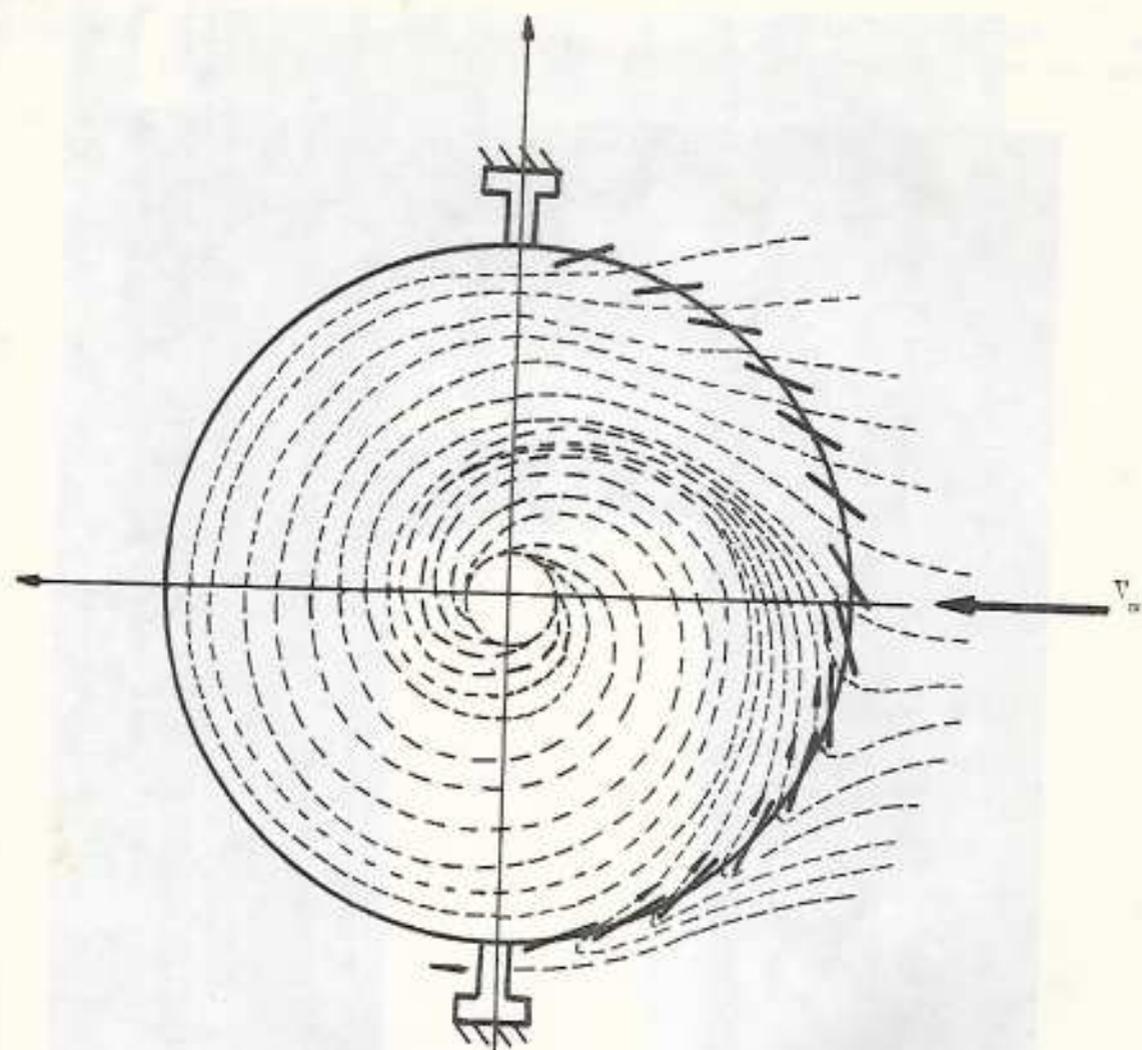


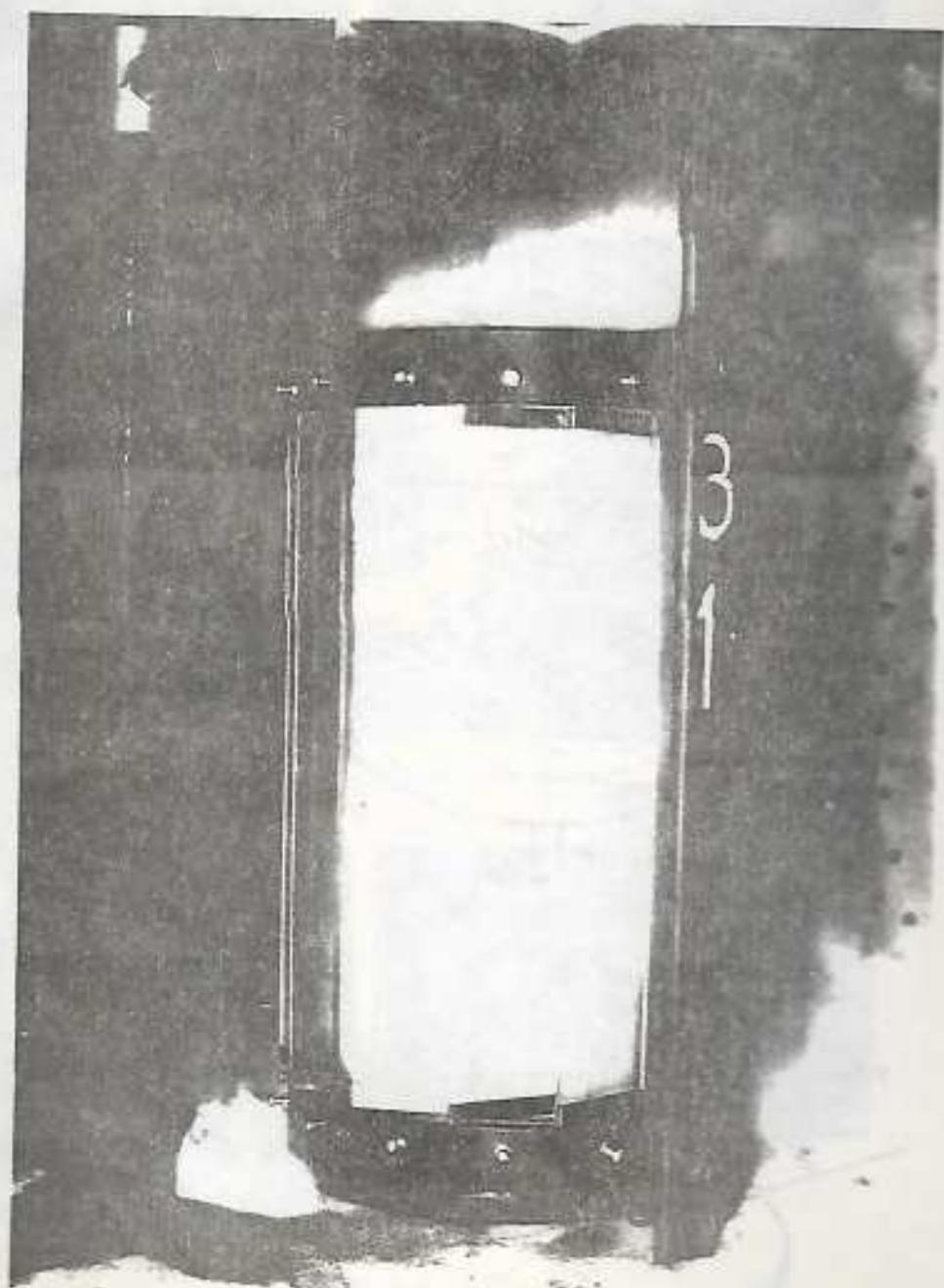
Figura 7



Orificio del Disco

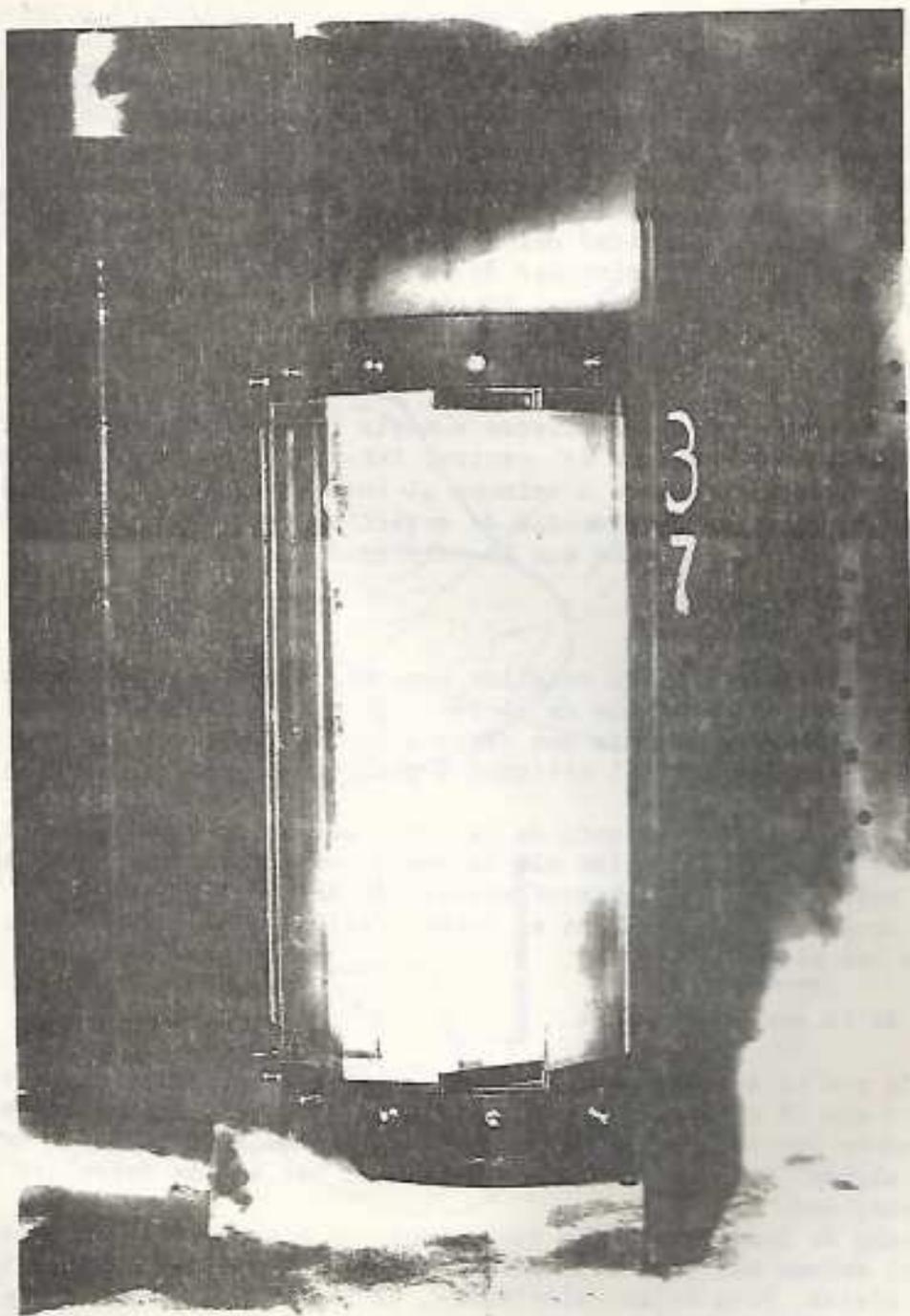
Figura 8

aumenta, la desviación del eje del vórtice se circunscribe a la zona más próxima al disco, estando en la parte superior del cilindro alineado con el eje del viento.



Separación del piso $\delta = 0,5\text{cm}$
Velocidad del Viento $V_{\infty} = 6\text{m/seg}$
Orificio del disco $\phi = 6\text{cm}$
Cuerda de aletas $c = 5\text{cm}$

Figura 9



Separación del piso $\delta = 2,5\text{cm}$
Velocidad del viento $V_{\infty} = 6\text{m/seg}$
Orificio del disco $\delta = 6\text{cm}$
Cuerda de aletas $c = 5\text{cm}$

Figura 10

5. Análisis de los ensayos con embudo

La segunda parte de los ensayos fue realizada reemplazando los discos por el

embudo de madera. El embudo, tal como fue colocado, permite el pasaje de aire por su interior alimentando el ojo del vórtice.

Al efectuar estos ensayos con el embudo, se notan cambios apreciables en el comportamiento del flujo en el interior del cilindro. Se advierte un vórtice bien definido no existiendo zonas de turbulencia. Se aprecia claramente el flujo axial, así como también el efecto chimenea.

La característica más notable que se puede observar es la marcada succión producida y la mayor sensibilidad del flujo frente a las variaciones de posición de aletas, tipo de aletas y velocidad de la corriente libre. Además, el embudo favorece la orientación del eje del vórtice

5.1. Posición de las aletas

A medida que se cierran las aletas aumenta la intensidad del vórtice con un incremento del flujo ascendente del centro. Este flujo central ascendente es helicoidal y el paso de la hélice disminuye al incrementarse la intensidad del vórtice. Esto significa que la velocidad de rotación en la periferia del ojo del vórtice aumenta en mayor proporción que la velocidad axial.

5.2. Tamaño de las aletas

Las variaciones no son tan notables como en el caso de los discos, debido a que el embudo orienta el flujo en el interior del cilindro. Si bien con las aletas de mayor cuerda se aprecia una pequeña desviación en el eje del vórtice ésta ocurre a la altura media del cilindro y disminuye cuando aumenta la intensidad del vórtice

Sin embargo el comportamiento de la torre mejoró, al disminuir el tamaño de las aletas. Se aprecia un vórtice más intenso, con mayor flujo ascendente y mayor simetría de rotación y no se observó desviación del eje del vórtice.

En las pruebas efectuadas, no se apreció salida de aire del interior del cilindro entre las aletas.

5.3. Velocidad de la corriente libre

A medida que se aumenta la velocidad, la intensidad del vórtice aumenta, pero se observa que el efecto de succión varía en función de la posición de las aletas, creándose una interrelación muy estrecha entre incremento de velocidad y posición de aletas. Para obtener máxima succión, las aletas deben ser reguladas para cada velocidad.

En el caso de los discos, las variaciones no son muy grandes, pero cuando se utiliza el embudo hay grandes cambios según se varíe la velocidad V_{∞} o la posición de las aletas. Para bajas velocidades, se logra mayor succión con un vórtice intenso, el cual se obtiene cerrando las aletas. Para altas velocidades, se consigue máxima succión con las aletas parcialmente abiertas.

5.4. Posición del suelo

Se advierte que hay succión para cualquier posición del piso, pero varían ampliamente las características del flujo ascendente en función de la distancia suelo-borde inferior del embudo.

Se efectuaron ensayos para una posición de aletas fija, que fue determinada para obtener máxima succión a la velocidad V_{∞} del ensayo, dado que la misma permaneció constante durante su desarrollo.

Cualitativamente se observa que aumenta el flujo ascendente a medida que el

piso se acerca al borde inferior del embudo. El flujo en el embudo, cuando el piso están lo suficientemente alejado como para que no introduzca interacciones en él, está esquematizado en la Figura 11, donde se advierte que en el cuarto cuadrante el flujo sale del embudo y vuelve a entrar en el segundo, iniciando su movimiento helicoidal. Este efecto queda anulado cuando el piso se acerca a la boca inferior del embudo, con lo cual se logra que el paso de la hélice del flujo ascendente sea menor cuanto menor es la distancia δ .

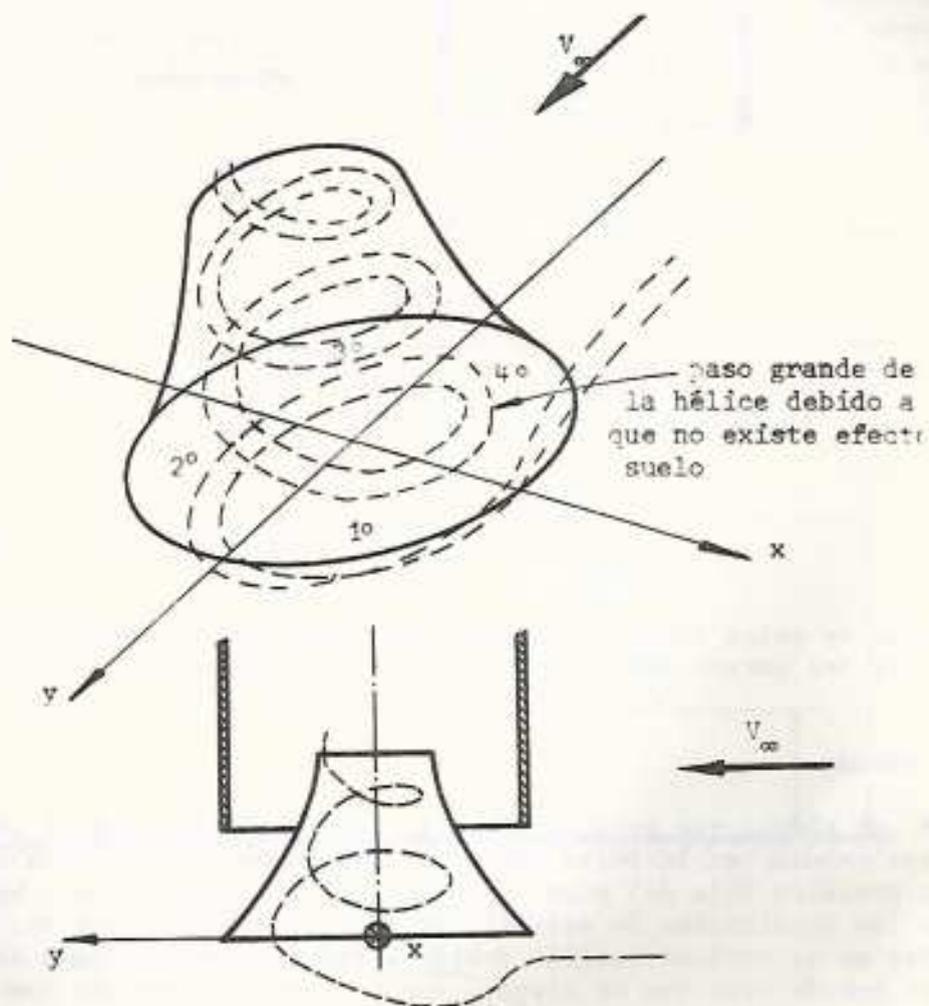


Figura 11

5.3. Posición del Embudo

Se adoptó una velocidad $V_{\infty} = \text{cte.}$ y se posicionaron las aletas para obtener máxima succión, acorde a dicha velocidad ($V_{\infty} = 14 \text{ m/s.}$).

Se hicieron ensayos para determinar el comportamiento del flujo ascendente a medida que se variaba la posición del embudo respecto a la torre, manteniendo la distancia entre el piso y el borde inferior de la torre constante.

Se observó que el flujo ascendente aumenta a medida que se introduce el embudo dentro del cilindro. Se comenzó el ensayo con la boca del embudo en el borde inferior de las aletas y se fue subiendo hasta que la boca estuviese a 50mm del mismo.

Se comprobó, con inyección de humo, que en el orificio anular que queda en-

entre el borde inferior del cilindro y el embudo, hay penetración del flujo solamente en la parte frontal, mientras que el resto rodea al embudo y escapa por la parte posterior, como indica la Figura 12

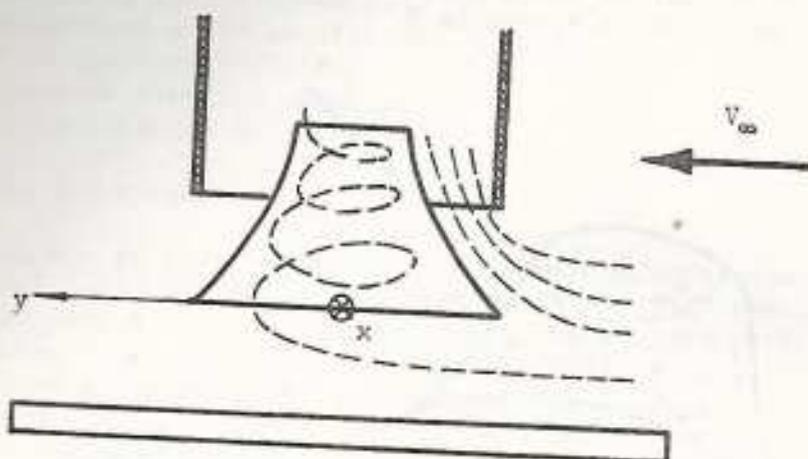


Figura 12

Según surge de estos ensayos, la posición óptima aproximada se lograría con la boca superior del embudo dentro del cilindro y a 4cm del borde inferior de las aletas.

5.6. Cierre del Embudo

Se probó el efecto que produce tpar el paso de aire entre el piso y el borde inferior del embudo, en la parte posterior del mismo, como indica la Figura 13

Para una posición fija del piso y del embudo, se observa que a bajas velocidades mejoran las condiciones de estabilidad del corazón del vórtice, pero a altas velocidades no se produce succión debido a que el aire que pasa sobre el piso no entra al embudo sino que se desvía, comportándose el embudo como si fuese un obtáculo.

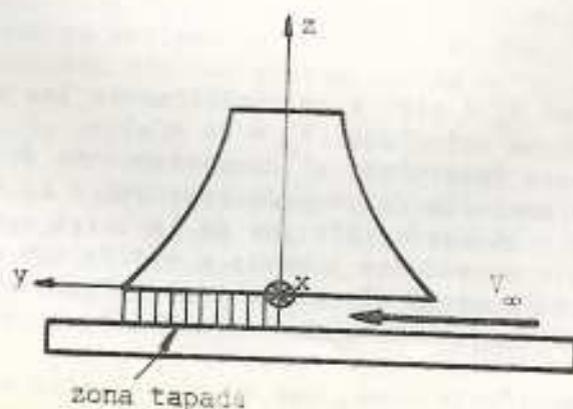


Figura 13

6. Mediciones Efectuadas

A los efectos de estudiar el comportamiento del flujo de aire en el interior del embudo, se relevó la curva de distribución de presión estática en la pared del mismo.

En base a los resultados descriptos precedentemente se utilizaron las aletas de 2,5cm de cuerda.

Se posicionaron las aletas, el piso y el embudo de tal modo que el funcionamiento del sistema generara el vórtice de mayor intensidad. Se mantuvieron constantes $\delta = 1\text{cm}$, $a = 11\text{cm}$, $b = 7,5\text{cm}$. Se midió la presión estática en los puntos de la pared indicados en la Figura 14 para tres valores de velocidad de la corriente libre 8,13; 12,70; 16,26 m/s, correspondientes a los siguientes números de Reynolds 92964; 145256 y 185928.

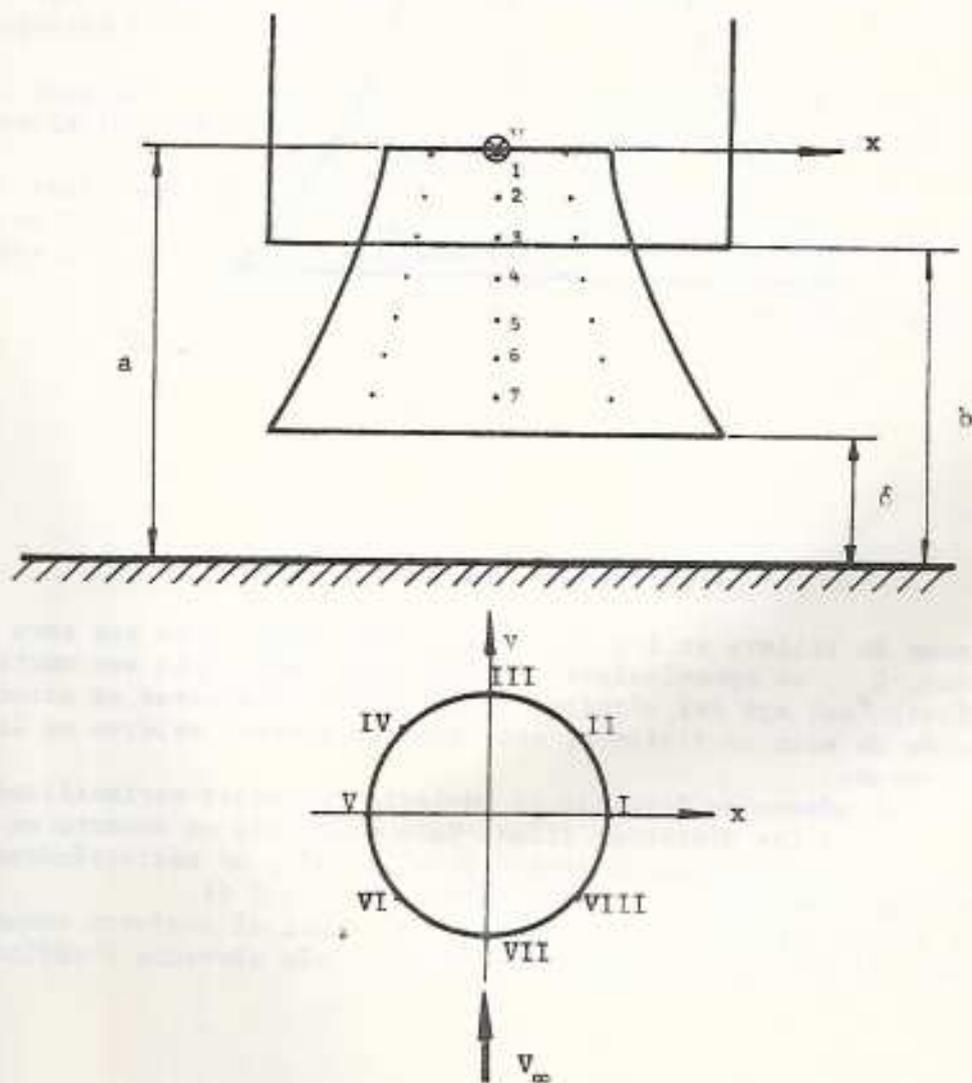


Figura 14

Se repitieron los ensayos para $a = 11\text{cm}$, $b = 50\text{cm}$ y $\delta = 1\text{cm}$.

Las presiones medidas se refirieron a la presión dinámica de la corriente libre, $\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2$. Se graficó el coeficiente de presión, C_p , sobre la cara interna

del embudo a 3 alturas distintas; boca superior (fila 1), altura intermedia (fila 3) y boca de entrada inferior (fila 6). Gráficos 1 al 6.

El análisis cualitativo, mediante inyección de humo evidenció que el flujo dentro del embudo está compuesto por una parte ascendente y otra descendente, como se indica en la figura 15.

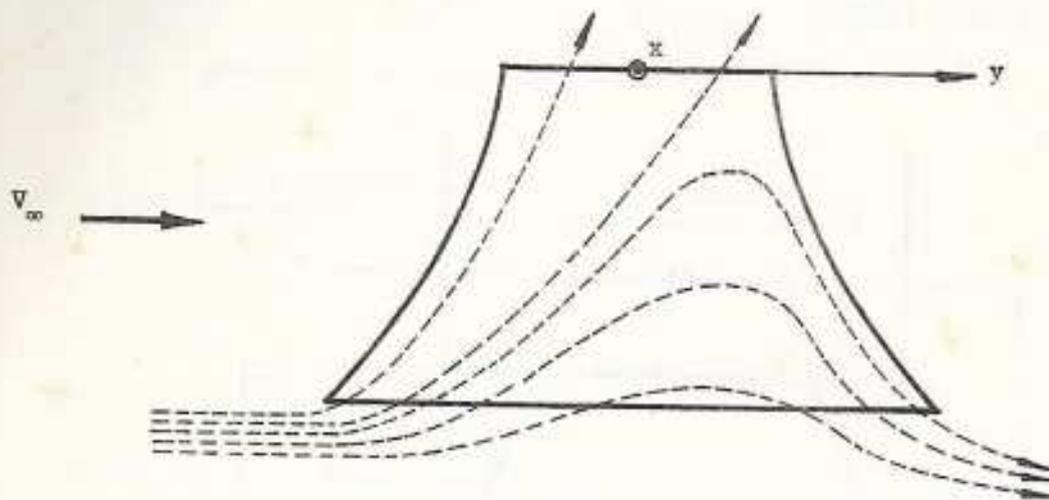


Figura 15

Esto se pone de relieve en los gráficos, donde puede verse que para las filas superiores, C_p , es aproximadamente constante, debiéndose sus variaciones al corrimiento P del eje del vórtice. En las filas inferiores se aprecia una gran variación de este coeficiente, observándose mayores valores en la parte frontal del embudo.

Al aumentar el número de Reynolds se advierte una menor variabilidad de los valores de C_p para las distintas filas. Esto evidencia un aumento en la componente de rotación del flujo en el interior del embudo, no registrándose el mismo aumento en la componente axial (Gráficos 1 y 3, 4 y 6).

Asimismo, se incrementó el flujo aspirado al subir el conjunto embudo-piso, respecto del cilindro, para números de Reynolds más elevados (Gráficos 1 y 4, 3 y 6).

7. Conclusiones

Los ensayos realizados muestran una gran cantidad de variables en juego, que requieren un delicado proceso para su optimización. Esto indica que el diseño de una torre vorticosa para el aprovechamiento de la energía eólica, no es una tarea fácil.

Se ha comprobado que la torre no actúa como un centro de baja presión que absorbe aire de la corriente libre, sino más bien como un obstáculo poroso, con penetración parcial del flujo incidente sobre el área frontal, siendo el resto desviado lateralmente hacia el exterior del cilindro. Asimismo, la zona inferior del embudo no se comporta como un centro de alta presión, razón por la cual se registran bajos caudales de flujo ascendente.

La tarea actual consiste en lograr que un mayor caudal sea captado por el cilindro generando un vórtice de mayor intensidad que, como consecuencia, produzca mayor succión a través del embudo.

Referencias

1. R. A. Bastianon, "Posibilidades actuales de la Energía Eólica", Industria Argentina, N°11, 1978.
2. J. T. Yen, "Tornado-Type Wind Energy System", Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1975.
3. R. A. Bastianon, "El Viento como Recurso Energético", 10° Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, San Juan 1979.
4. R. A. Bastianon y H. Erramuspe, "Características de una Torre Vorticosa Ensayada en Túnel de Viento", 4° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, La Plata, 1978.-

$$C_p = f(\epsilon) \quad C_p = \frac{p - p_m}{\frac{\rho}{2} v^2}$$

Gráfico 1

Re = 92944
 a = 110mm
 b = 75mm
 d = 10mm

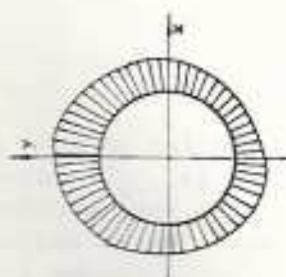
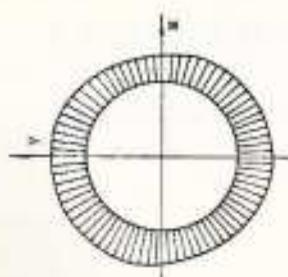
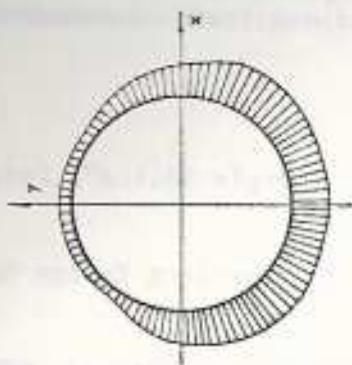
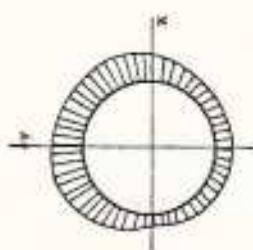
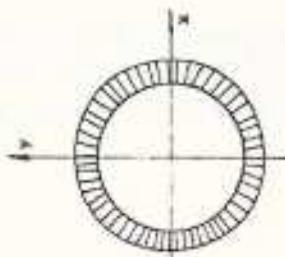
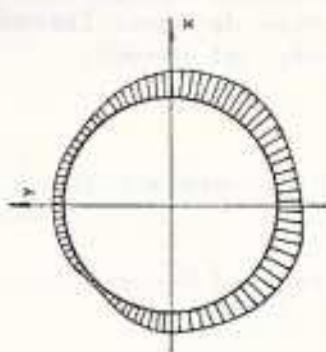


Gráfico 2

Re = 145256
 a = 110mm
 b = 75mm
 d = 10mm



Fila 1

Fila 3

Fila 6

En todos los casos $C_p < 0$

Esc. Long. = $\frac{1cm}{1cm}$ Esc. $C_p = \frac{1}{1cm}$

$$C_p = f(r) C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

Gráfico 3

Re = 185928
 $a = 110\text{mm}$
 $b = 75\text{mm}$
 $\delta = 10\text{mm}$

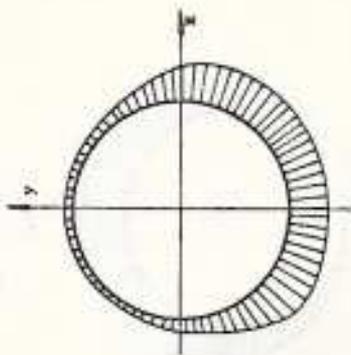
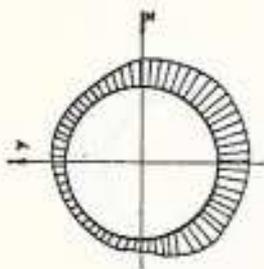
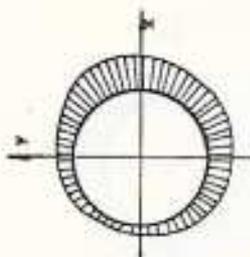
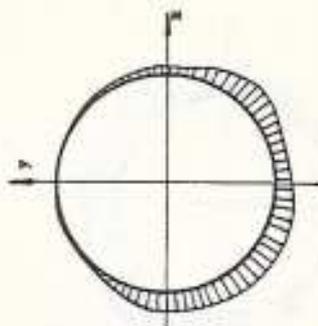
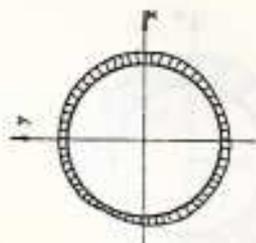
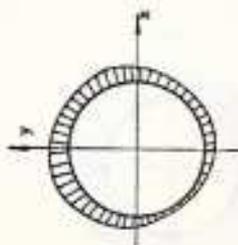


Gráfico 4

Re = 92964
 $a = 110\text{mm}$
 $b = 50\text{mm}$
 $\delta = 10\text{mm}$



Fila 1

Fila 3

Fila 6

En todos los casos $C_p < 0$

Esc. Long. = $\frac{300}{1\text{cm}}$ Esc. $C_p = \frac{1}{1\text{cm}}$

$$C_0 = f(r) C_p = \frac{p - p_m}{\frac{1}{2} \rho V_m^2}$$

Gráfico 5

$Re = 145256$
 $a = 310mm$
 $b = 20mm$
 $\delta = 10mm$

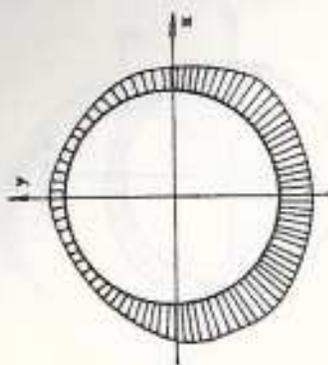
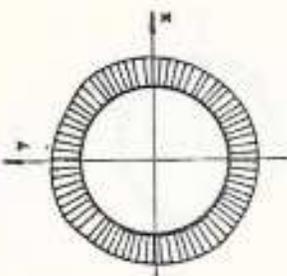
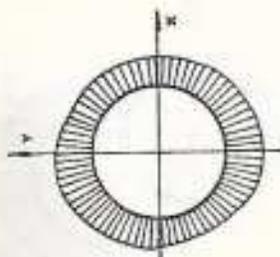
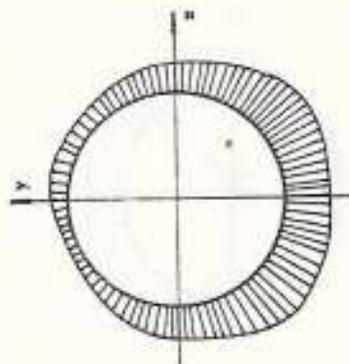
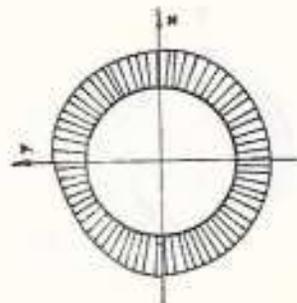
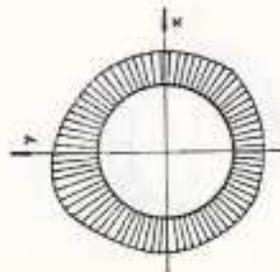


Gráfico 6

$Re = 195178$
 $a = 117mm$
 $b = 50mm$
 $\delta = 10mm$



Fila 1

Fila 3

Fila 6

$$Esc. Long. = \frac{3cm}{1cm} \quad Esc. C_p = \frac{1}{1cm}$$

En todos los casos $C_0 < 0$