

## ANÁLISIS DEL EFECTO MAGNUS EN CUERPOS CILÍNDRICOS CON ALETAS DE DIFERENTE CUERDA

### Autores

Pezzotti, Santiago; Nadal Mora, Vicente J.; Sanchez, Hadrian; Piechocki, Joaquín

### Lugar de ejecución del trabajo

Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria, UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Email: [santiago.pezzotti@ing.unlp.edu.ar](mailto:santiago.pezzotti@ing.unlp.edu.ar)

Palabras claves: efecto Magnus, túnel de viento, visualización del flujo

### INTRODUCCIÓN

El efecto Magnus es un fenómeno físico en el que un cuerpo en rotación sumergido en una corriente de fluido experimenta una fuerza de sustentación, además de la fuerza de resistencia aerodinámica. La fuerza de sustentación es perpendicular tanto al eje de rotación, como a la dirección de la corriente libre.

Este efecto fue nombrado en reconocimiento a Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), quien fue el primer investigador en estudiar este fenómeno, en 1851. A lo largo de los años, diversos autores han publicado trabajos relacionados con el efecto Magnus [1-14] debido a la gran importancia de sus aplicaciones.

El efecto Magnus puede afectar significativamente el movimiento de un cuerpo en rotación desplazándose en un fluido. Es la causa de la desviación en la trayectoria de proyectiles giratorios y pelotas deportivas, como balones de fútbol, pelotas de golf, pelotas de béisbol, etc. [15-18]. Así mismo, ha sido estudiado para cuerpos en vuelo libre afectados por el viento donde su trayectoria se ve modificada, producto de la rotación [19-24].

En la UIDET GTA-GIAI estudiamos el efecto Magnus desde el año 2009, ya que despertó nuestro interés la importancia de este fenómeno por sus múltiples aplicaciones. En el contexto de esta línea de investigación, que incluye la caracterización de diferentes cuerpos en rotación inmensos en una corriente de fluido, el presente trabajo comprende el estudio experimental del efecto Magnus en un túnel de viento sobre 3 cilindros circulares en rotación, provistos de aletas de diferentes tamaños; allí se midieron fuerzas de sustentación y resistencia aerodinámicas generadas por los cilindros, así como también se realizaron visualizaciones del flujo en el entorno de los modelos.

### DESARROLLO Y DISCUSIÓN

En primer lugar, para los ensayos que se presentan, se utilizó un túnel de viento con el objetivo de medir las fuerzas aerodinámicas en función de la velocidad de rotación de los diferentes cuerpos y la velocidad de la corriente de aire. Este túnel, utilizado por Pezzotti [25–26] en el desarrollo de la investigación del efecto Magnus en cuerpos cilíndricos de secciones transversales diversas, es un túnel de viento abierto, cuya área de pruebas es de sección rectangular de 0,2 x 0,2 m, y una extensión longitudinal de 0,3 m. El mismo fue construido exclusivamente para la realización de ensayos asociados al efecto Magnus, por lo que su diseño es acorde a los ensayos de medición de fuerzas y visualización de flujo alrededor de cuerpos en rotación. Se encuentra equipado con una balanza, un motor con un

variador para controlar la velocidad de giro a los cuerpos, y un sistema generador de humo con una luz estroboscópica y cámara fotográfica para la realización de las visualizaciones.

### MODELOS

Se construyeron 3 cuerpos de teflón en un torno CNC y se les realizó un acanalado cada 120° mecanizado con una fresa, donde se montaron las diferentes aletas de madera balsa. Así mismo, cada cuerpo posee un extremo roscado donde se atornilla el eje del motor que será el encargado de imprimirles el movimiento de rotación. Los mismos poseen las siguientes características:

- El largo de los 3 cuerpos es de 180 mm
- Diámetro del cilindro: 26 mm
- Aletas cada 120° a lo largo del cilindro
- Espesor de las aletas: 3 mm
- Cuerda de aletas:
  - Cuerpo 1: 3 mm
  - Cuerpo 2: 6 mm
  - Cuerpo 3: 9 mm



**Figura 1** – Cuerpos para ensayo en el túnel de viento

### ENSAYOS

Se realizaron dos tipos de ensayos. Uno correspondiente a la medición de fuerzas de sustentación ( $L$ ) y resistencia ( $D$ ) aerodinámicas en función de la velocidad de la corriente libre ( $v$ ) y la velocidad de rotación del cuerpo ( $\omega$ ).

Por otro lado, se realizaron ensayos de visualizaciones de flujo en el entorno de los cuerpos mediante la utilización de humo y una cámara fotográfica, con el objeto de conocer el patrón del flujo, caracterizarlos y entender la variación de las fuerzas aerodinámicas generadas.

#### Ensayos de medición de fuerzas:

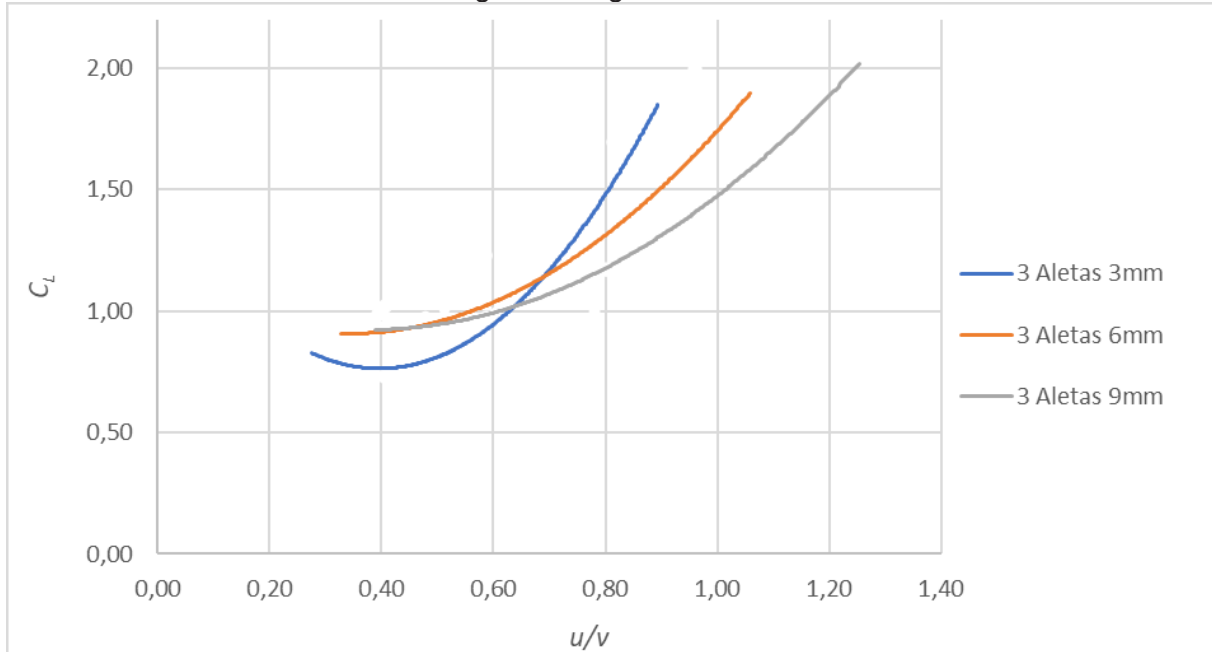
Los ensayos para determinar los parámetros mencionados para los 3 modelos se realizaron a las velocidades de rotación de los cuerpos de 1950, 2310, 2520 y 2725 rpm; para las velocidades de la corriente de aire de 5, 8, 10 y 12 m/s.

Los coeficientes aerodinámicos se determinaron según las ecuaciones:

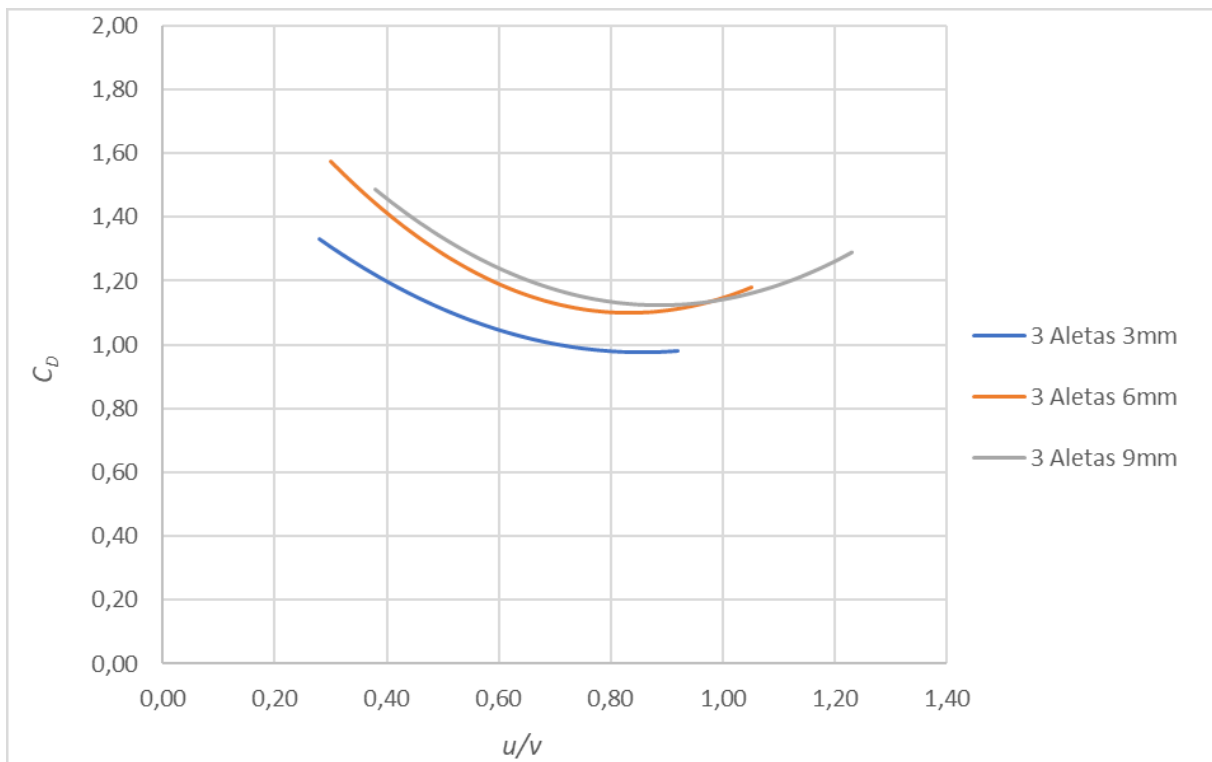
$$C_L = \frac{2L}{\rho S v^2} \quad C_D = \frac{2D}{\rho S v^2}$$

donde:  $L$  es la sustentación,  $D$  la resistencia,  $\rho$  la densidad del aire,  $S$  el área transversal del cuerpo y  $v$  la velocidad de la corriente; mientras que las velocidades se adimensionalizaron según la relación  $\omega R/v$ , siendo  $\omega$  la velocidad de rotación y  $R$  el radio del cuerpo.

Los resultados se resumen en las siguientes figuras:



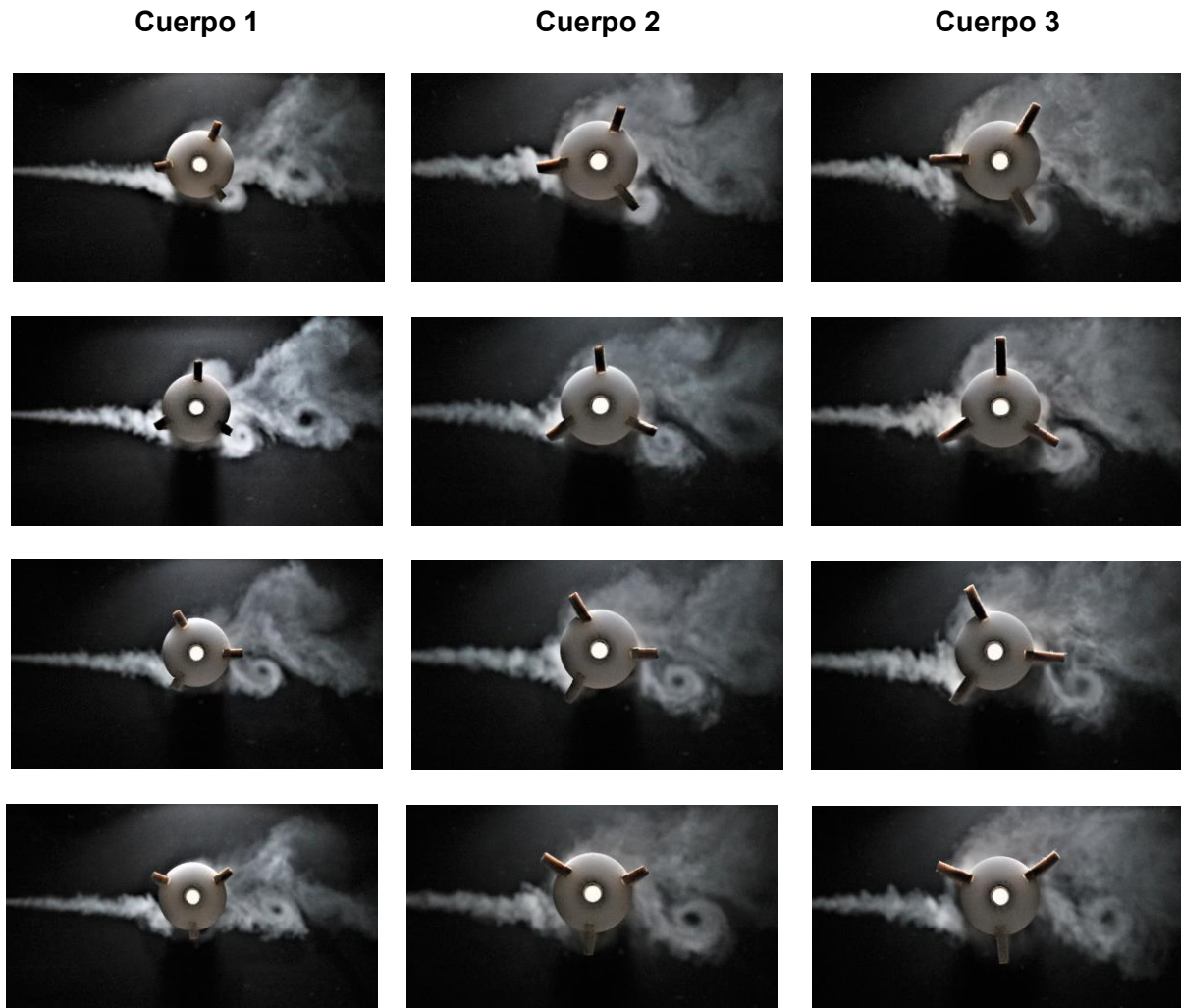
**Figura 2** – Curvas de  $C_L$  versus  $u/v$  para cada cuerpo



**Figura 3** – Curvas de  $C_D$  versus  $u/v$  para cada cuerpo

### Ensayos de visualizaciones

Los ensayos de visualización del flujo alrededor de los cuerpos se realizaron a una velocidad de la corriente libre de  $v=5$  m/s y una velocidad de giro de los cuerpos de  $\omega=1950$  rpm. A continuación se muestran imágenes de los tres cuerpos ensayados en esas condiciones y se visualiza el flujo en sus entornos para la misma posición angular de cada cuerpo (conjunto de fotos en cada línea horizontal).



**Figura 4** – Visualizaciones de flujo de los tres cuerpos para la condición de  $v=5$  m/s y  $\omega=1950$  rpm (sentido de giro contrario a las agujas del reloj)

### CONCLUSIONES

En relación al coeficiente de sustentación se observó que al aumentar el tamaño de las aletas se obtuvo un valor similar de  $C_L$  para los 3 cuerpos, pero para mayor relación de velocidades  $u/v$ . Es decir, que para obtener un mismo valor de  $C_L$  se requirió mayor velocidad de rotación, cuando se aumentó el tamaño de las aletas respecto al cuerpo con aletas más pequeñas.

En cuanto al comportamiento de la resistencia aerodinámica se puede ver que para los cuerpos con aletas de 6 y 9 mm los valores son similares, mientras que el cuerpo con aletas de 3 mm presenta valores de  $C_D$  inferiores a estos.

La configuración del flujo alrededor de estos tres cuerpos es similar. El tamaño de los remolinos y su localización diferencian el patrón de flujo entre todos los cuerpos. Mientras más largas son las aletas, más grandes son los remolinos y más grande la estela, esto explica el aumento de la resistencia. En todos los casos estudiados, el remolino inferior está claramente definido y su tamaño aumenta con el tamaño de la aleta y con la relación de velocidades, lo que explica la ganancia de sustentación entre los cuerpos. Con el aumento de la relación de velocidades, la estela se desvía más hacia la parte superior, lo que evidencia el fenómeno de generación de sustentación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Seifert, J., "A review of the Magnus Effect in Aeronautics". Progress in aerospace sciences, 55, p: 17 – 45. 2012.
- [2] Betz, A., "The Magnus effect - the principle of the Flettner rotor", Technical Memorandums National Advisory Committee for Aeronautics. No. 310. 1925.
- [3] Miller, C. "Wind Tunnel Measurement of the Surface Pressure Distribution on a Spinning Magnus Rotor". Journal of Aircraft. Vol. 16. No. 12, p: 815 – 822. 1979.
- [4] Cuevas, J. C., Ocaña, O., Hurtado, A., & Hidalgo, S. "El efecto Magnus y La paradoja de D'Alembert: consideraciones del flujo Potencial." Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 4. No. 2, p: 394 - 398. 2010.
- [5] Mittal, S., Kummar, B. "Flow Past a rotating cylinder". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 476, p: 303 – 334. 2002.
- [6] Ericcson, L. E., Beyers M. E. "Flat Spin of a Circular Cylinder". Journal of Aircraft. Vol. 33. No. 4, p: 722 - 729. 1996.
- [7] Ericcson, L.E. "Circular Cylinder Response to Kármán Vortex Shedding". Journal of Aircraft. Vol. 25. No. 9, p: 769 - 775. 1988.
- [8] Polhamus, E., "Effect of flow incidence and Reynolds number on low-speed aerodynamic characteristics of several noncircular cylinders with applications to directional stability and spinning". Technical Note National Advisory Committee for Aeronautics. No. 4176. 1958.
- [9] Pamadi, B.N., Pordal, H.S. "Effect of Strakes on the Autorotational Characteristics of Noncircular Cylinders". Journal of Aircraft. Vol. 22. No. 2, p: 84 – 97. 1987.
- [10] Skews, B.W., "Autorotation of many-sided bodies in an airstream". Letters to nature. Vol 352, p: 512 – 513. 1991.
- [11] Ozgoren, M., "Flow structure in the downstream of square and circular cylinders". Flow Measurement and Instrumentation 17, p: 225 - 235. 2006.
- [12] Power, H., Iversen J. "Magnus Effect on Spinning Bodies of Revolution". AIAA Journal. Vol. 11. No. 4, p: 417 – 418. 1973.

- [13] Liang, L., Zhao, P., Zhang, S., Yuan, J., & Wen, Y. "Simulation and analysis of Magnus rotating roll stabilizer at low speed". *Ocean Engineering*, 142, 491-500. 2017.
- [14] Gupta, Y., Dumon, J., & Hably, A. "Modeling and control of a Magnus effect-based airborne wind energy system in crosswind maneuvers". Elsevier. *IFAC-Papers On Line*, 50(1), 13878-13885. 2017.
- [15] Bahill, A. T., Bladwin, D. G., Ramberg, J. S. "Effects of Altitude and Atmospheric Conditions on the flight of a Baseball". *International Journal of Sports Science and Engineering*. Vol. 3. No. 2, p: 109 – 128. World Academic Press, World Academic Union. 2009.
- [16] Alaways, L., Hubbard, M. "Experimental determination of baseball spin and lift". *Journal of Sport Sciences*. Vol. 19, p: 349 – 358. 2001.
- [17] Barber, S., Chin S. B., Carré M. J. "Sports ball aerodynamics: A numerical study of the erratic motion of soccer balls". *Computers & Fluids*. 38, p: 1091 – 1100. 2009.
- [18] Tai, C., Chao, C., Leong, J., Hong, Q., "Effects of golf ball dimple configuration on aerodynamics, trajectory, and acoustics". *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. Vol. 14. 2007.
- [19] Minami, S., Azuma, A. "Various flying modes of wind-dispersal seeds". *Journal of Theoretical Biology*. 225, p: 1 – 14. 2003.
- [20] Nguyen, S. N., Greenhalgh E. S., Olsson R., Iannucci L. "Modeling the lofting of Runway Debris by Aircraft Tyres". *Journal of Aircraft*. Vol. 45.No. 5, p: 1701 – 1714. 2008.
- [21] Holmes, J.D. "Trajectories of spheres in strong winds with application to wind-borne debris". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 92, p: 9 – 22. 2004.
- [22] Lin, N., Letchford C., Holmes J.D. "Investigation of plate-type windborne debris. Part I: Experiments in wind tunnel and full scale". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 94, p: 51 - 76. 2006.
- [23] Baker, C. J. "The Debris Flight Equations". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 95, p: 329 - 353. 2007.
- [24] Skews, B. W., "Autorotation of Polygonal prisms with an upstream vane". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. No. 73, p: 145 - 158. 1997.
- [25] Tesis Doctoral "Estudio experimental del efecto Magnus en cuerpos cilíndricos de secciones transversales diversas", Santiago PEZZOTTI, Facultad de Ingeniería, UNLP. (2016)
- [26] Pezzotti, S., Mora, V. N., Andrés, A. S., & Franchini, S. "Experimental study of the Magnus effect in cylindrical bodies with 4, 6, 8 and 10 sides". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197, 104065. (2020)