

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO PARA DEMOSTRAR Y EXPERIMENTAR CON EL EFECTO MAGNUS

Tiburcio Fernández Roque

Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME, del Instituto Politécnico Nacional, IPN, México

José Arturo Correa Arredondo

Maestro en Ingeniería Aeronáutica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME, del Instituto Politécnico Nacional, IPN, México

Jorge Sandoval Lezama

Maestría en Sistemas de Control por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME, del Instituto Politécnico Nacional, IPN, México

Alejandro Mejía Carmona

Ingeniero en Aeronáutica, Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Desarrollo de la Educación por el Instituto Politécnico Nacional, IPN, México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Aeronáutica, de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), del Instituto Politécnico Nacional, México, deben comprender el fenómeno de la generación de la fuerza de sustentación aerodinámica, explicada por diversas teorías tales como el principio de Bernoulli o la ley de la conservación de la cantidad de movimiento o el teorema de Kutta-Joukowski. La comprobación experimental de dichas teorías complementa el aprendizaje por lo que es frecuente encontrar prácticas de laboratorio con base en modelos de alas y túneles de viento. Sin embargo, éstas no son la única forma de producir sustentación aerodinámica. Aprovechando el invento “Aparato propulsor para vehículos terrestres y/o marítimos basado en el Efecto Magnus” y con la idea de mostrar otra forma poco común pero no menos importante de producir la sustentación aerodinámica, se presenta el desarrollo de un prototipo funcional de un banco de pruebas basado en dicho efecto para experimentar y estudiar la generación de fuerzas aerodinámicas de sustentación y resistencia al avance.

Palabras clave: Efecto Magnus, sustentación, aerodinámica, banco de pruebas.

INTRODUCCIÓN

La figura 1 muestra a Heinrich Gustav Magnus, químico y físico alemán, (1802/1870), [1], a quien se debe el nombre del Efecto Magnus que consiste en la creación de una fuerza de sustentación a partir de la rotación de un cilindro o esfera inmersa en un flujo rectilíneo.



Figura 1- Heinrich Gustav Magnus.

Esta fuerza es perpendicular al plano que forma el eje de rotación del cuerpo y la dirección del flujo rectilíneo, como se muestra en la Fig. 2. En esta figura, V_{∞} es la velocidad del flujo de aire, ω es la velocidad de rotación del cilindro, R el radio del cilindro, L es la fuerza de sustentación y D la fuerza de arrastre generado por el cilindro girando. El efecto Magnus es un fenómeno simple que tiene una gran eficiencia desde el punto de vista de creación de una fuerza de sustentación o de tracción, dependiendo de la dirección del flujo de aire rectilíneo. De este fenómeno se han derivado una gran cantidad de desarrollos tecnológicos que, desafortunadamente, no han sido prácticos ni eficientes lo cual es contradictorio ya que el efecto Magnus puede producir una fuerza de sustentación mucho mayor que la que produce el ala de una aeronave convencional de la misma área en planta [2].

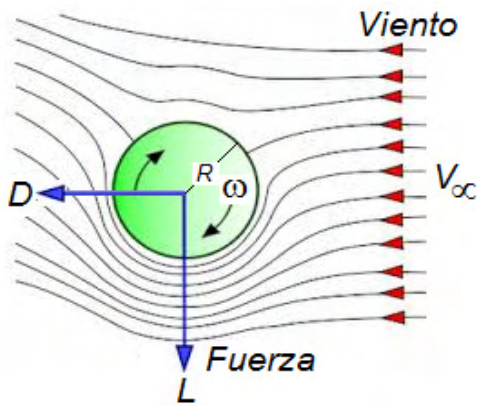


Figura 2- Cilindro girando sobre su eje y bañado por un flujo transversal.

Gustav Magnus fue el primero en describir este efecto en un artículo escrito en 1852. Su trabajo experimental estableció que se desarrolla una fuerza de sustentación cuando un cilindro giratorio se coloca en un flujo de aire. Este fenómeno es la explicación de por qué los proyectiles (balas y misiles) cuando giran se desvían de su trayectoria y el porqué de las espectaculares trayectorias curvas que siguen los balones empleados en los deportes más populares como el fútbol (figura 3), el béisbol y el tenis [3].

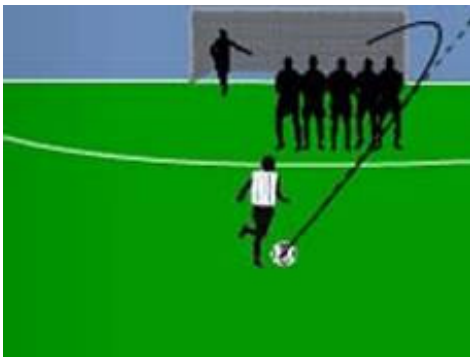


Figura 3- Desviación de la trayectoria del balón provocada por el efecto Magnus.

TEOREMA DE KUTTA-JOUKOWSKI

Teóricamente, la fuerza que genera el efecto Magnus se determina a partir del teorema de Kutta-Joukowski, el cual se obtiene a partir de la superposición de tres flujos potenciales:

un flujo rectilíneo, un doblete y un vórtice. La superposición de los tres flujos simples produce el flujo alrededor de un cilindro bidimensional que gira y además se desplaza inmerso en un fluido. El teorema de Kutta-Joukowski es el siguiente [4].

$$L = \rho V_{\infty} \Gamma \quad (1)$$

En donde L es la fuerza de levantamiento o tracción, ρ es la densidad del fluido, V_{∞} es la velocidad del viento relativo y Γ es la intensidad del vórtice o circulación producida por el cuerpo en rotación. La circulación generada por un cilindro giratorio se determina con la siguiente expresión:

$$\Gamma = -V_{\theta} (2\pi R) \quad (2)$$

En donde $V_{\theta} = \omega R$ es la velocidad tangencial en la superficie del cilindro cuyo radio es R y su velocidad angular es ω en rad/s.

ECUACIÓN EMPÍRICA

Experimentalmente, la magnitud de la fuerza de levantamiento o tracción, L , que genera el efecto Magnus depende de la magnitud de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, V_{∞} , de la superficie en planta del cuerpo, S , de la densidad del fluido, ρ , y del coeficiente de sustentación, C_L . La magnitud de la fuerza se determina con la siguiente fórmula obtenida a partir de un análisis dimensional [5].

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S C_L \quad (3)$$

El valor de C_L que produce el efecto Magnus depende del valor de α .

$$\alpha = \omega R / V_{\infty} \quad (4)$$

La ecuación (4) representa la relación entre la velocidad tangencial y la velocidad de traslación. Se ha demostrado experimentalmente para un cilindro, que su C_L puede ser mayor que el que produce un ala

de avión aún con aletas hipersustentadoras, aunque el coeficiente de resistencia al avance, C_D que produce es bastante grande comparado con el C_D que produce el mismo cilindro sin girar.

El avance en la tecnología de los materiales y los métodos de fabricación está permitiendo cada día una mayor aplicación del efecto Magnus, aunque de una manera experimental, en la propulsión de vehículos tanto aéreos como marítimos. Las figuras 4 y 5 muestran un aeromodelo y un barco respectivamente, propulsados con base en cilindros que, al girar y desplazarse transversalmente, producen, el primero, una fuerza de sustentación y el segundo fuerzas de empuje.



Figura 4- Aeromodelo con cilindro giratorio que sustituye al ala.



Figura 5- Embarcación que logra el empuje con cilindros verticales sobre su cubierta.

PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Aeronáutica es importante comprender cómo se generan las reacciones

aerodinámicas cuando interactúa un objeto sólido inmerso en un fluido en movimiento. Existen diversas teorías para su explicación tales como el principio de Bernoulli o la ley de la conservación de la cantidad de movimiento o a través de diversas prácticas de laboratorio desarrolladas para tal fin, como la medición de la distribución de presión estática alrededor de un perfil de un ala; la medición de los perfiles de velocidad vertical tanto arriba como abajo del perfil de un ala y a lo largo de la cuerda del mismo o la medición directa de dicha fuerza empleando una balanza.

Otra teoría que explica la generación de la sustentación es el teorema de Kutta-Joukowski que es precisamente el modelo matemático que resulta al analizar idealmente el efecto Magnus, es decir mediante la teoría de flujo potencial superponiendo un flujo uniforme, un doblete y un vórtice. Por lo anterior, resulta natural que el tema del efecto Magnus o de los flujos potenciales se incluya en los programas de estudio de los cursos de Aerodinámica o de Dinámica de Fluidos relacionados con la carrera de Ingeniería Aeronáutica. Sin embargo, a diferencia de las otras teorías empleadas para explicar la generación de la sustentación, las cuales utilizan para su comprobación modelos de alas y túneles de viento, no existen equipos didácticos para comprobar el teorema de Kutta-Joukowski ni para experimentar con el efecto Magnus, por ello y dada la importancia que tienen dicho efecto y teorema para los estudiantes de ingeniería Aeronáutica, se diseñó y construyó el prototipo aquí presentado.

Los elementos principales que componen el prototipo, conforme a la figura 6 son: (A) el cilindro apoyado en uno de sus extremos en un rodamiento y en el otro en un motor que lo hace girar con una velocidad controlada. (B) un ventilador compuesto por un motor y una hélice de aeromodelismo. Ambos elementos, cilindro y ventilador conforman el aparato

propulsor. (C) un sistema de rieles que sostiene y permite el desplazamiento libre y longitudinal del conjunto cilindro/ventilador o aparato propulsor. (D) en el interior del contenedor, una fuente de alimentación eléctrica para los motores y circuitos de control. (E) el sistema de control centralizado en una plataforma de procesamiento Raspberry que opera junto con una tarjeta Arduino e interfaces de control para los motores y para la celda de carga (F). La operación del equipo se realiza a través de la pantalla táctil Touch-Berry, (G). El prototipo queda contenido en un mueble compacto que permite replegar al elemento propulsor cuando el equipo no está en uso.

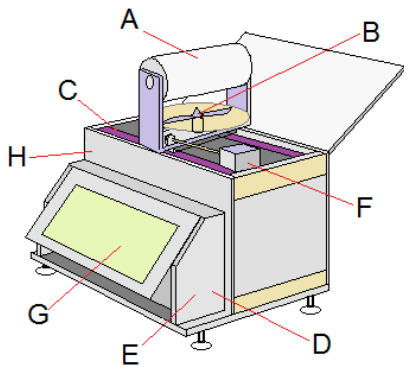


Figura 6- Principales componentes del prototipo.

DISEÑO

La figura 7 presenta un diagrama de bloques con el cual se propone la lógica y el método de diseño y construcción del equipo, así como el del sistema de control, medición e interfaz gráfica lógicos en paralelo para trabajar con la plataforma Raspberry y la plataforma Arduino [6].

El control de ambos motores es mediante Python y RPi a través de la terminal de Raspbian la cual es fácil de localizar y abrir una vez encendida la ventana de la Touch-Berry, dicho control se realiza mediante líneas de comandos, las cuales debe insertar el usuario en tiempo real y sin complicaciones de

escritura, lo que facilita el control de velocidad de los motores y en un caso dado la detención de estos para evitar posibles accidentes.

El control de los motores se realiza con una interfaz gráfica la cual cuenta con un botón de calibración de los controladores de velocidad, así como un botón de paro de emergencia.

Se considera un sistema de adquisición de datos procedentes de la celda de carga y de los cálculos de las variables que intervienen en el equipo, como son la velocidad de flujo, las RPM's de los motores, el coeficiente de levantamiento y la relación de velocidades entre otros.

Durante el diseño se realizaron pruebas con el Arduino para simular una adquisición de datos analógicos (mediante su monitor serial) provenientes de la celda de carga, y luego enviarlos a la RPi para ser evaluados por esta mediante su algoritmo de programación. Cabe destacar que los datos de lectura no siempre son exactos debido a diferentes parámetros como pueden ser del hardware, la temperatura, la presión ambiente, o incluso la densidad del aire que pueden afectar la calibración de la celda de carga, o pueden ser parámetros de programación como el envío y recepción de datos, la velocidad de transmisión, la decodificación de llegada de los datos, o algún error de conversión en el código, etc.

Finalmente, todos los datos enviados por el Arduino y la RPi se almacenan en una base de datos, en formato .xls, por lo que se instalaron los paquetes de la librería "libre office" los cuales proporcionan a la RPi la posibilidad de utilizar el editor de texto, hojas de cálculo, presentaciones, etc., aunque solo se utilizarán hojas de cálculo. Los datos se almacenan en formato .xls automáticamente y cuentan con un orden adecuado en cada hoja por lo que en cada prueba de n cantidad de mediciones realizadas se guardan los datos en una hoja de Excel y al realizar otra prueba, se guardan

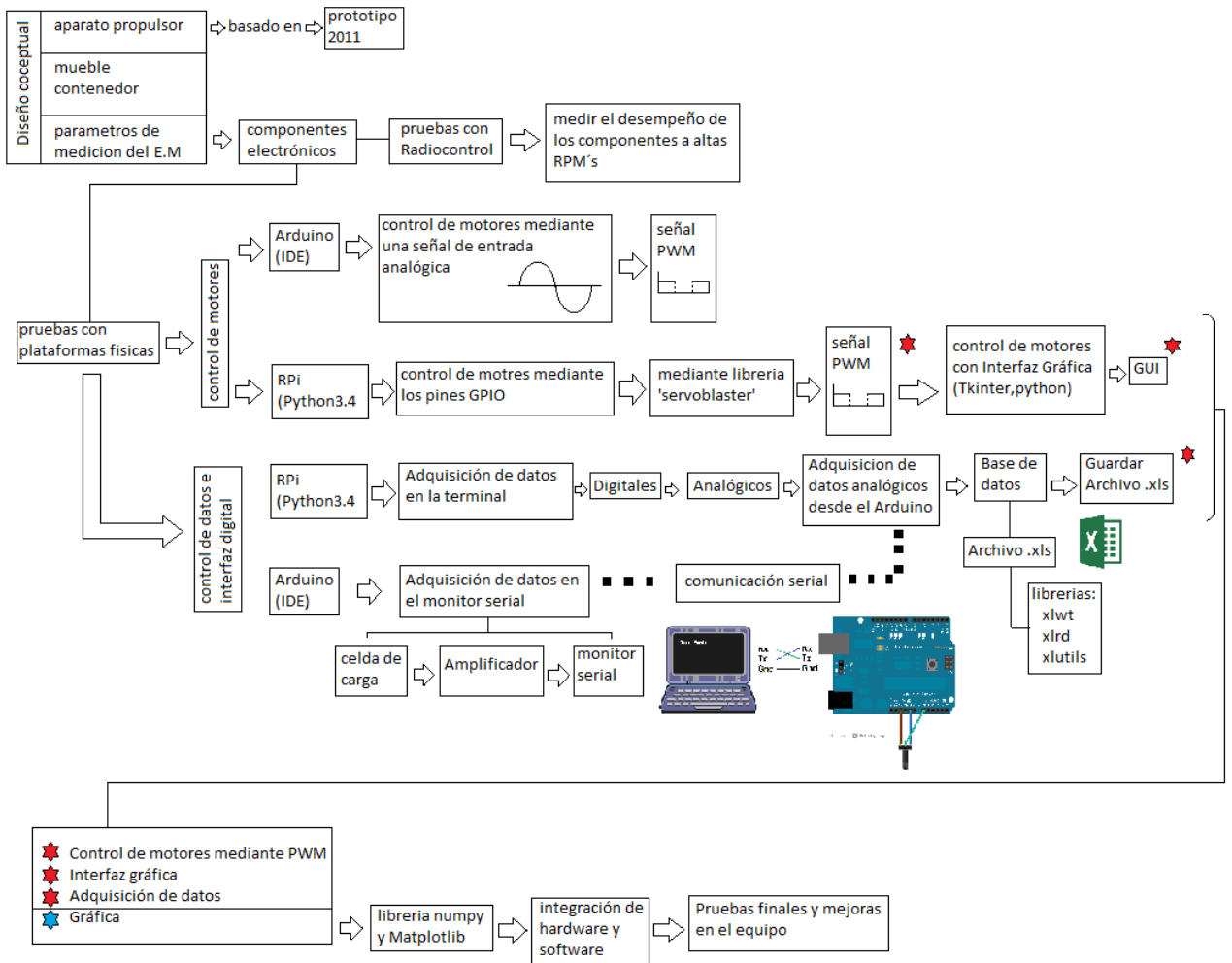


Figura 7- Propuesta de diseño con base en el diagrama a bloques.

los datos en una nueva hoja, así se tendrá n cantidad de hojas con los datos correctamente guardados y ordenados dependiendo del número de pruebas hechas.

También como se puede ver en el diagrama de la figura 7, se consideró desplegar una gráfica de α vs C_L la cual brinda información detallada sobre el comportamiento del experimento realizado en términos del efecto Magnus.

Por último, a continuación, se resumen las principales características del equipo:

- El control de RPM's de ambos motores (hélice y cilindro), es mediante una interfaz gráfica con la que el usuario puede interactuar fácilmente y sin complicaciones.
- El almacenamiento y ordenamiento de datos mediante un archivo .xls es automático.
- El programa cuenta con una opción para graficar dichos datos y por ende una opción para guardar la gráfica para uso posterior del usuario.
- El equipo es seguro, transportable y de fácil manejo.

ESTIMACIÓN DE LA FUERZA GENERADA POR EL APARATO PROPULSOR.

La velocidad del flujo de la hélice se determina considerando el coeficiente de tracción estática que produce una hélice APC sport de 7x6 a 7002 RPM con $C_{T0} = 0.0953$.

Empleando la siguiente ecuación, se determina la tracción estática de la hélice [7]:

$$T_0 = \rho n^2 D^4 C_{T0} \quad (5)$$

En donde:

ρ es la densidad del aire, se considera de 0.9 kg/m^3 para la Ciudad de México.

n son las revoluciones por segundo de la hélice, 392.85 rps.

D es el diámetro de la hélice, que es de 7 plg = 0.1778 m.

Con lo anterior se obtiene la tracción estática:

$$T_0 = 13.229 \text{ N}$$

La velocidad inducida por la hélice, V , se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = \left(\frac{T_0}{\rho A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

En donde:

A es el área del círculo generada por la hélice, por lo que:

$$V = 24.331 \text{ m/s}$$

Velocidad Tangencial del Cilindro.

La velocidad tangencial del cilindro se calcula considerando una velocidad de giro de 12000 RPM, por lo que:

$$V_T = \omega R \quad (7)$$

En donde:

ω es la velocidad angular del cilindro en rads/s , igual a 1256.64 rads/s

R es el radio del cilindro, cuyo valor es 0.0375 m.

Por lo cual, la velocidad tangencial es:

$$V_T = 47.124 \text{ m/s}$$

La fuerza generada por el aparato propulsor, F , se determina con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (8)$$

En donde:

S es la superficie en planta del cilindro, su longitud de 0.17 m, y el área en planta es de 0.01275 m^2 .

C_L es el coeficiente de levantamiento del efecto Magnus y se obtiene mediante la figura 8, [8].

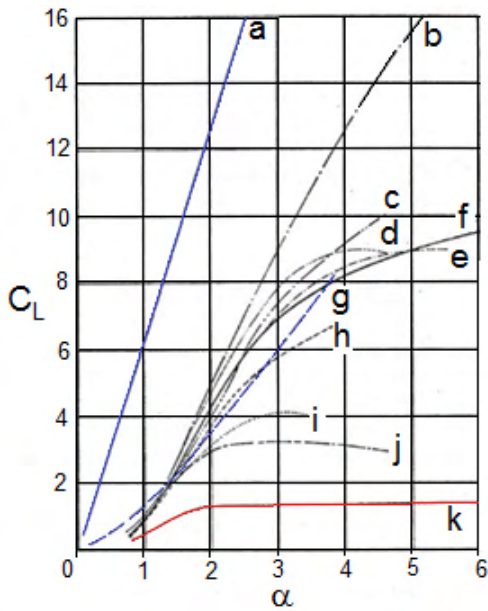


Figura 8- Ángulo de ataque, α vs C_L .

Se emplea la curva k que corresponde a un alargamiento de 2 y un número de Reynolds de 5×10^4 que son los valores más aproximados a los que operará el aparato propulsor del equipo didáctico. El alargamiento del cilindro del aparato propulsor es de 2.267 y el número de Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (9)$$

En donde:

μ es la viscosidad dinámica del aire la cual se toma como $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m s}$.

Por lo tanto:

$Re = 91241.25$ del cilindro.

$\alpha = 1.94$ es la relación de la velocidad tangencial del cilindro respecto a la velocidad del flujo de la hélice.

De la figura 8 se obtiene:

$C_L = 1.32$

Por lo que la fuerza máxima generada por el aparato propulsor en estas condiciones es:

$F = 4.4835 \text{ N}$.

ERGONOMÍA

En la figura 9 se muestra el aspecto general del prototipo. El aparato propulsor se posiciona en la parte superior del mueble, desde donde se aprecia la operación del sistema completo, cuando el conjunto cilindro/ventilador se desplaza sobre sus rieles y es retenido por un eslabón que lo conecta con la celda de carga la cual censa la fuerza de sustentación, en este caso como un empuje producido en el cilindro por el efecto Magnus. Por seguridad, se interpone una pantalla transparente de policarbonato, considerando que el cilindro y la hélice giran a altas velocidades de hasta 10000 y 23000 RPM's respectivamente.

Por debajo del aparato propulsor se ubica la pantalla táctil desde la cual se controlan los experimentos, variando velocidades del cilindro y de la hélice, la adquisición y almacenamiento de datos hasta su despliegue en la pantalla.



Figura 9- Aspecto final del prototipo con el aparato propulsor desplegado.

El equipo es portátil y por seguridad, el aparato propulsor, con sus rieles y la celda de carga se pueden plegar dentro del mueble

(figura 10), para su fácil transportación y resguardo mientras no se utilice.

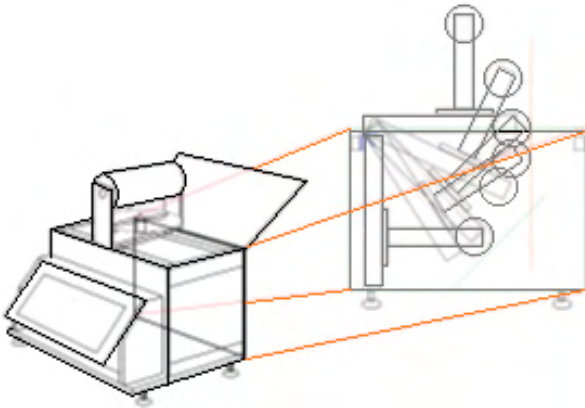


Figura 10- El elemento propulsor se pliega dentro del mueble cuando el equipo no se usa.

PRUEBAS FUNCIONALES

Al poner en marcha el ventilador se genera un flujo de aire que baña al cilindro. Y al hacer girar el cilindro, su velocidad tangencial interactúa con el flujo de la hélice produciéndose una fuerza de empuje que desplaza horizontalmente al elemento propulsor sobre sus rieles.

A continuación, se presentan 3 corridas realizadas para medir las fuerzas de empuje y con ellas calcular los coeficientes de sustentación C_L , para elaborar las gráficas de C_L vs α . El programa permite guardar cada gráfica generada como formato de imagen jpg o png dentro del sistema Raspbian. Los valores registrados se muestran en las figuras 11-13.

Para obtener las gráficas de las figuras 11-13, se utilizó una velocidad de 8000 RPM's en la hélice y se fue variando la velocidad del cilindro, con la finalidad de mantener el número de Reynolds constante. Se comprobó con un tacómetro óptico digital que las revoluciones ingresadas en el programa correspondieran a las devueltas por cada motor. Para cada lectura se dio un intervalo de 40 segundos dando oportunidad a que la velocidad del cilindro se estabilizara.

La teoría indica que la magnitud del C_L

debe ser directamente proporcional con el ángulo de ataque. La gráfica de la figura 11 es consistente. Las otras gráficas, figuras 12 y 13, tienen puntos que se alejan del comportamiento esperado, pero en todos los casos la tendencia general se cumple.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró diseñar y construir el primer prototipo de un equipo con el potencial para experimentar con el efecto Magnus. Es un equipo didáctico, compacto y portátil para ser utilizado en un laboratorio o en un aula. Su operación es segura y su mantenimiento es barato. Sin embargo, durante las pruebas funcionales se detectaron puntos que deben ser corregidos y otros que pueden ser mejorados.

Con respecto a la electrónica, los cables de los controladores presentan un arrastre sobre el aparato propulsor lo cual puede afectar las lecturas de la celda de carga. También se recomienda sustituir en lo posible el cableado por vías impresas, reduciendo ruido, peso y volumen del equipo.

A valores altos de RPM's el aparato propulsor presenta vibraciones lo cual puede afectar también las lecturas de la celda de carga. Se requiere mejorar el balanceo estático y dinámico, especialmente en el cilindro.

Se recomienda rediseñar el ventilador con dos hélices en contra rotación para eliminar el torque y con ello reducir la fricción sobre las paredes de los rieles en los que corre el aparato propulsor.

Aún falta aprovechar al máximo la pantalla táctil, tarea en la que se está trabajando y por ahora, el usuario necesita abrir el programa mediante una serie de comandos en la terminal y además necesita un ratón y un teclado externo lo que limita el control completo desde la Touch-Berry.

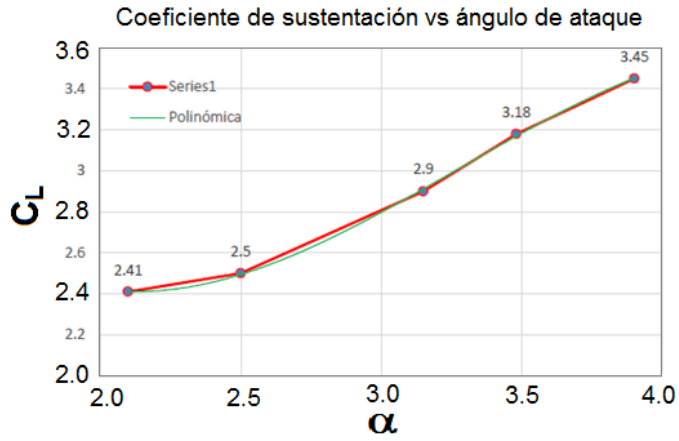


Figura 11. Corrida 1.

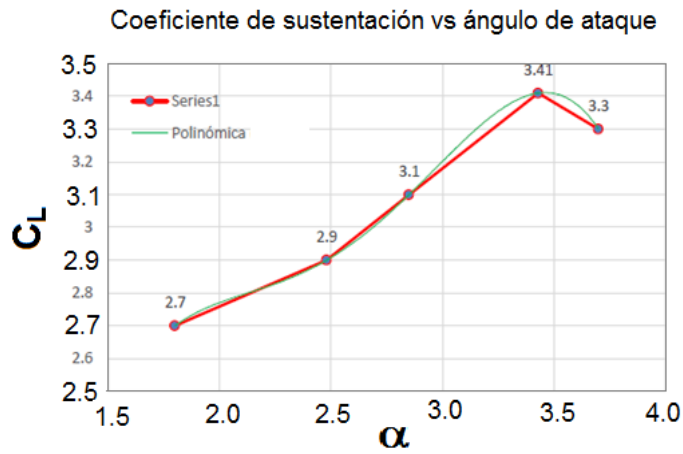


Figura 12. Corrida 2.

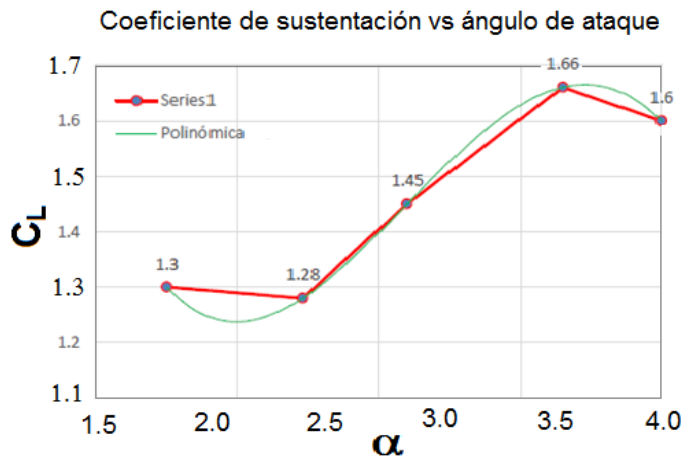


Figura 13. Corrida 3.

REFERENCIAS

- [1] (2018). Magnus, Heinrich Gustav. 29 mayo 2018, de Encyclopedi.com Sitio web: <http://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/physics-biographies/heinrich-gustav-magnus>
- [2] Naval Sea System Command, Magnus Effect. An overview of its Past and Future Practical Applications, Volume I and II, Department of the Navy, Washington D. C., 1986.
- [3] Fernández Roque, T., Vázquez Flores, J. F., & Mejía Carmona, A. *Aparato Propulsor para Vehículos Terrestres y/o Marítimos Basado en el Efecto Magnus*. XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Plata, Argentina, 2013.
- [4] Anderson, John D. Jr., *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw Hill, 3a edición, New York, 2001.
- [5] Frank M. White, *Mecánica de fluidos*. Ed. McGraw Hill, México, 2000.
- [6] Lomas Rodríguez R.G. Tesis *Diseño y construcción de un equipo de laboratorio didáctico para medir la fuerza de empuje generada por el efecto Magnus*. IPN, ESIME Ticoman, Cd. de México, 2016.
- [7] Dommasch D. O. *Airplane aerodynamics*. Ed. Pitman. New York, USA. 1986.
- [8] W. M. Swanson, *The Effect Magnus: A Summary of Investigations to Date*, Journal of Basic Engineering, 1961.