

Aerodinámica de los aviones de papel: Maximizando la distancia recorrida

Juan Murcia, Adrian Montañez

*Escuela de Física
Facultad de Ciencias*

Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Abstract

El estudio de los aviones de papel es un área la cual representa una gran fuente de información de la dinámica de dispositivos aéreos de pequeñas dimensiones. En esta experimentación nos compete la caracterización y análisis de distintos tipos de avión, y como varía su desplazamiento en función de propiedades como su densidad y geometría, siendo sometidos a lanzamientos en ambientes controlados, de manera que fuese posible obtener información de su trayectoria y la máxima distancia alcanzada. De esta forma, bajo un modelo de partícula en presencia de rozamiento acoplada con un esquema de fuerzas en las interfaces, se determina cual modelo llegará más lejos y el por qué de dicho comportamiento.

Keywords: Tipo de avión, Aerodinámica, Dinámica de fluidos.

1. Introducción

A lo largo de la historia, los aviones de papel han sido visto como elementos de recreación personal los cuales han inspirado el diseño de modelos aeronáuticos. Debido a sus dimensiones, el uso de materiales livianos y su fácil elaboración y acceso los aviones de papel han sido objeto de estudio para la elaboración de dispositivos MAV, determinando la interacción, dinámica con los fluidos de alrededor, y las condiciones para que el movimiento sea sustentable.

2. Objetivo general

Determinar la distancia máxima que alcanza la trayectoria de vuelo de un avión de papel según se modifica su diseño y el tipo de papel.

2.1. Objetivos específicos

1. Determinar como afecta el diseño del avión de papel en la distancia de vuelo.
2. Definir como afecta el tipo de papel del cual esta hecho el avión en la distancia de vuelo.
3. Armar un modelo matemático que de la distancia de vuelo en función del diseño y tipo de papel del avión.

3. Estado del arte

En la actualidad, se han realizado distintos estudios donde se busca caracterizar la respuesta aerodinámica para distintos

diseños en los aviones de papel. Estos están enfocados en determinar el régimen del número de Reynolds acordes a los valores de operación de los MAV, de manera que se observe la turbulencia a la cual están sometidas las componentes del sistema al ser sometidos en un fluido, como lo es un tunel de viento o agua [1].

Así mismo, se han llevado a cabo experimentaciones donde se ha determinado como la trayectoria que recorre el avión está sujeta a las fuerzas de resistencia, sustentación y empuje; siendo factores clave a la hora determinar la estabilidad del sistema [2]. Por ello, se han caracterizado modelos de aviones los cuales son poseedores de los records mundiales de distancia, así como modelos convencionales, con tal de verificar esta relación [3].

Para el desarrollo de este tipo de problemas y la validación de resultados, se han propuesto modelos computacionales adaptados a la mecánica de fluidos sobre superficies. Estos modelos permiten resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que al ser modelos de ecuaciones diferenciales parciales no lineales, se abarcan por medio del método de volúmenes finitos. De esta forma, se busca resolver las interacciones dinámicas del fluido en el cuerpo (DFBI) para resolver la posición y orientación del cuerpo sujeto a un marco de referencia inercial [4].

4. Marco teórico

Para poder abordar el problema del movimiento de este tipo de móviles, se partió del análisis de dicho objeto considerando su interacción con el entorno semejante a la de una partícula con

Email addresses: juan2191322@correo.uis.edu.co (Juan Murcia),
adrian.ricardomontaez@gmail.com (Adrian Montañez)

rozamiento. Para ello, se parte de las ecuaciones de movimiento de dicho sistema dadas como

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \beta \vec{v} = \vec{F}(\vec{x}, \vec{v}, t). \quad (1)$$

En este caso, m representaría la masa del avión, \vec{x} su posición actual, \vec{v} su velocidad, β el parámetro de resistencia del aire y \vec{F} el término de fuentes de fuerza, donde se consideran todas aquellas fuerzas externas que perturben el movimiento de la partícula.

De esta forma, se consideran las fuerzas que actúan sobre las interfaces del avión, de forma que explique los fenómenos de empuje, arrastre, sustentación y elevación. Estas fuerzas pueden ser todas explicadas por medio del análisis del movimiento relativo entre el avión de papel, y la velocidad que posee el aire en el ambiente. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la acción de la fuerza gravitacional, permitiendo reescribir a 1 como

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \beta \vec{v} = -m\vec{g} + F_e(\vec{v}). \quad (2)$$

Solo resta caracterizar el comportamiento de F_e . Para ello, se considerará un marco de referencia el cual está montado sobre el avión. Dado que se considera el aire en reposo con respecto a la tierra, en este nuevo marco la velocidad del avión se vuelve cero, mientras que la velocidad del aire tomará el valor negativo de la velocidad del avión. Ahora, utilizando el teorema del trabajo y la energía, se tiene que

$$W = \Delta K = \int F_e dr \quad (3)$$

En este proceso, al impactar el aire con el avión, se considera que toda la energía cinética es transferida, quedando en reposo el fluido luego de la colisión. Con esto en cuenta, se puede realizar un análisis para pequeños desplazamientos, donde δ representa un desplazamiento infinitesimal a lo largo de la fuerza F_e resultando en la expresión 3 como

$$\int F_e dr \approx F_e \delta = \frac{1}{2} m_{aire} v^2. \quad (4)$$

Dada a que la superficie del avión se mantiene constante durante la trayectoria, es posible simplificar la expresión utilizando la relación entre el volumen desplazado de fluido con respecto a la masa de este mismo. Así se llega a la expresión

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{m_{aire} v^2}{\delta} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{aire} V v^2}{\delta} = \frac{1}{2} A \rho_{aire} v^2. \quad (5)$$

Finalmente, considerando que esta fuerza está proyectada sobre las componentes x y z , además de que en esta se tiene que tener en consideración la interacción de todas las superficies sobre el avión, de manera genérica se puede escribir las ecuaciones

de movimiento para la trayectoria de un avión en un plano 2D como

$$m \frac{dv_x}{dt} + \beta v_x = K_{xx} v_x^2 + K_{xz} v_z^2, \quad (6)$$

$$m \frac{dv_z}{dt} + \beta v_z = K_{zx} v_x^2 + K_{zz} v_z^2, \quad (7)$$

Obteniendo un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, donde los términos K están asociadas a las constantes obtenidas en 5, conteniendo así la información de la interacción del avión con el medio dada su geometría y su orientación. Para este primer supuesto, se consideró que dicha orientación no cambiar radicalmente durante la trayectoria del móvil.

5. Metodología

Primeramente se supuso que si se realizaban múltiples lanzamientos «a mano» se podría promediar los valores pero esto no ocurrió ya que el empuje al lanzarlos variaba mucho. Por lo tanto gran parte del tiempo se empleó en el diseño y creación de una lanzadera mecánica para los aviones que hiciera regular este empuje, por otro lado los diseños escogidos se sacaron de ganadores de competencias en distancia recorrida para los 3 tipos primarios de aviones: tipo *dart* o dardos 8, *glider* o planeadores, y de modelo híbrido 7, que está en el medio de los dos primeros. Finalmente por el tiempo tomado en elaborar cada avión y la capacidad de estos para soportar las pruebas solo experimentamos con el modelo híbrido creado por John Collins [5] para cada uno de los diferentes gramajes de papel. Pero incluimos varias observaciones cualitativas del modelo *Alkonost* [6] un dardo que se diseñó pero no se alcanzó a medir.

Para esta experimentación mediremos primero el efecto del peso del papel respecto a la distancia se dispuso del modelo híbrido de avión de papel, realizadas con 3 hojas de distintos materiales que, aunque todas mantuviesen un formato carta, diferían en los registros de su peso obtenidos por una gramera. Los valores de masa (sumando los refuerzos que ya se nombrarán) para los modelos 1, 2 y 3 corresponden a 4,7 [g], 9,8 [g] y 7,2 [g], respectivamente, donde nuestro objeto de medición tiene una incertidumbre de $\pm 0,1$ [g].

El valor numérico que caracteriza a cada modelo es el área superficial de las alas, para el avión medido es de 159.53 [cm²].

Una vez terminados los aviones se reforzaban en distintos puntos con cinta transparente de 1.5 [cm] de ancho y pegamento para madera. Primero se ponía el pegamento en el eje de doblez principal del avión para que no se fuera a abrir por los esfuerzos aplicados. luego se envolvía la punta y el lomo el avión con cinta para que no se abriera y finalmente en la parte trasera del avión, donde se hacía tracción con la liga elástica de la lanzadera se reforzaba el papel con cinta terminando de cerrar todas las aberturas posibles del avión.

Finalmente los lanzamientos se realizaron a un ángulo de 45° con la ballesta a altura de piso y se impulsaban con ligas elásticas de oficina 6.

6. Análisis de resultados

En los múltiples lanzamientos realizados por medio del uso de la ballesta casera adaptada para los aviones, se obtuvieron datos referentes a su vuelo y distancia máxima de llegada. En la figura ?? se registraron todos los datos referente al vuelo de los aviones para distintos materiales, donde los datos de color rojo corresponden a los aviones fabricados con *papel origami*, los datos azules a los aviones de *papel de dibujo* y los datos en verde a los datos de *cartulina*. Estos valores fueron obtenidos por medio de la herramienta de análisis de vídeos "TRACKER". En la figura 1 se muestra el comportamiento de cada grupo de aviones separándolos por colores y discriminando por tipo de línea.

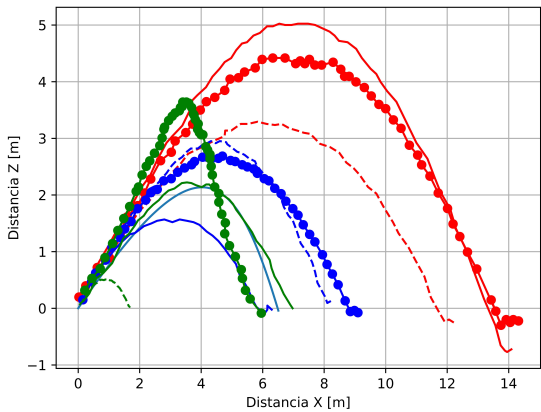


Figura 1: Observación de las múltiples trayectorias de los modelos de aviones de papel al ser lanzados en un ambiente aislado. Las líneas rojas, azules y verdes corresponden a las trayectorias de los materiales 1, 2 y 3, respectivamente.

Para corroborar que este lanzamiento obedece las ecuaciones de movimiento anteriormente propuestas, se hizo uso del método Runge Kutta de 4to orden (RK4) para evolucionar las variables bajo un esquema de euler. Es así como se sometieron los datos del primer lanzamiento del primer modelo de avión, reflejando la interpolación de su trayectoria en la figura 4, bajo la línea azul. De esta manera, el problema consiste en determinar los valores para los coeficientes β y K que lo dominaban.

Para obtener dichos coeficientes se hizo de los datos obtenidos por "TRACKER", de manera que se disponía de los valores de la posición, velocidad y aceleración del móvil de forma aproximada. De este modo, se reemplazaron los valores de las condiciones iniciales, y se dispuso a obtener los parámetros más óptimos para describir la trayectoria de vuelo. En la sección anexos 10 se pueden ver más ejemplos de estas interpolaciones y su coincidencia con los datos experimentales.

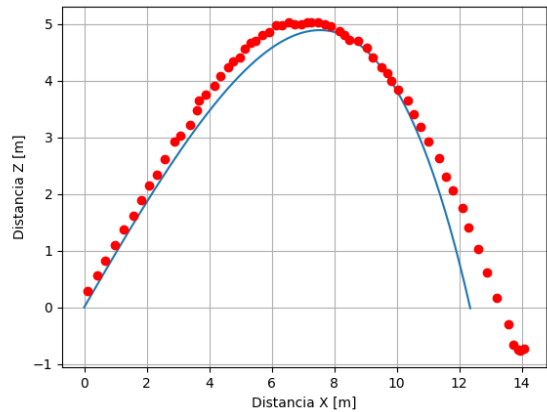


Figura 2: Gráfica referente a la trayectoria obtenida en el primer lanzamiento para el primer modelo por medio de la evolución de las variables bajo el método RK4. La línea azul continua representa la trayectoria dados los parámetros de resistividad y superficie, mientras que los puntos rojos corresponden a los datos obtenidos experimentalmente

7. Discusión de resultados

En primera instancia, cabe recalcar que en el desarrollo del experimento se tuvo en consideración las afectaciones que producía el equipamiento sobre el análisis del vuelo. Los elementos como la ballesta, los aviones de papel fueron realizados de forma casera, de manera que se adaptaron para su funcionalidad más óptima. Sin embargo, estos presentan bastantes alteraciones respecto al modelo ideal propuesto las cuales difícilmente pueden ser caracterizadas.

De los resultados se puede observar que, dado cada lanzamiento para aviones de distinto peso, se pudo apreciar que los aviones que presentaban mayor alcance fueron aquellos los cuales presentaban menor peso. Esto es coherente a el modelo de partícula propuesto dado que, como se puede apreciar en las ecuaciones 6 y 7, a medida que la masa aumenta, los efectos del rozamiento y de la presión sobre la interfaz son cada vez menos notorios. De esta forma, dado el ambiente en reposo, los aviones que presentarán mayor altura y, por ende, tiempo de vuelo, son aquellos que presenten una mejor relación entre su densidad respecto al fluido.

Por otra parte, se observo que aunque la trayectoria interpolada que siguen los aviones tuvo bastante cercanía con los datos experimentales, esta no fue del todo precisa. Adicional al error asociado a las herramientas, un supuesto del por qué de este comportamiento se le atribuye a los coeficientes de la presión en las interfaces. Durante el trayecto del avión, su orientación se ve afectada dados los torques que sobre este se imprimen, de manera que el vector normal a las interfaces también se verán rotados. De esta forma, aunque en nuestro modelo dicha orientación no cambia drásticamente, los coeficientes K no se mantienen constantes a lo largo de toda la trayectoria.

8. Observaciones Cualitativas

En el desarrollo del experimento observamos varias cosas que se salían de los parámetros que analizábamos y sugerimos tener en cuenta en futuras investigaciones:

1. El ancho del lomo (donde está el centro de masa del avión) crece de manera no lineal para tipo de papel usado, así en el papel de origami el lomo tenía como 3 hojas de ancho 0.3 [cm], en el de cartulina era alrededor de 1 [cm], por lo tanto el riel que daba dirección al avión podía causar rozamiento con los más anchos y por otro lado al ser tan ancho para los pequeños que no salían totalmente hacia adelante y en el vuelo se observaba una rotación que no tomamos en cuenta.
2. Se usó un tipo de liga elástica común en Colombia, al usar más de una en el lanzamiento los modelos de mayor peso funcionaban mejor pero el avión de papel origami sufría daños en su estructura al lanzarse y tenía un rendimiento bajo. Determinar el impulso neto máximo para cada avión es necesario.
3. Por el impulso producido al lanzarse las alas tienen que tener la rigidez suficiente para que no se cierren hacia abajo, esto se cumple para los modelos de dardos e híbrido, pero en pruebas con planeadores estos tienen la cualidad que las alas son bastante más flexibles, diseñadas para vuelos más lentos y el sustento es producido por el área de las alas, al montarlo en la ballesta las alas se cerraban al salir del riel y no volaba como debería.

9. Conclusiones

Con esta experimentación se llegó a corroborar la afectación de propiedades como la densidad del material y la geometría de su diseño a la hora de efectuarse el vuelo de un avión de papel. En base a estos, se obtuvo que cada diseño para un mismo material presentaban trayectorias diferentes, esto en base a que su interacción medio-interfaces se veía alterada por la superficie de las alas, la acción de la envergadura, los alerones y todas aquellas superficies que lo constituían. A su vez, para un mismo modelo, se realizaron lanzamientos de aviones los cuales diferían en densidad, y cuya interacción con el medio se determinaba en las tasas de transferencia de energía cinética de las moléculas de aire. De esta manera, la relación entre la densidad del medio y la densidad del avión determina cuanta es la eficiencia de la presión ejercida del medio sobre la superficie del avión.

Adicionalmente, se aprecia que en un principio, aunque este primer modelo no es preciso en su totalidad con respecto a los datos experimentales, permite obtener una primera aproximación del por qué está dada de esta forma la dinámica del avión. Así mismo, permite generar una primera propuesta la explicación dinámica del movimiento de un avión de forma simplificada adoptando el modelo de una partícula, pudiendo desarrollarse al calcular de forma exacta los coeficientes de presión K en base a la dinámica de fluidos sobre cada una de las interfaces, así como la introducción de ángulo de inclinación que modele la orientación del avión, y se vea afectado por los torques inducidos por las fuerzas externas.

10. Anexos

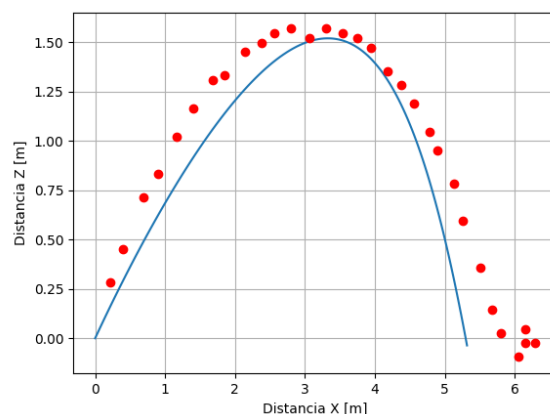


Figura 3: Gráfica referente a la trayectoria obtenida en el primer lanzamiento para el segundo modelo por medio de la evolución de las variables bajo el método RK4. La línea azul continua representa la trayectoria dados los parámetros de resistividad y superficie, mientras que los puntos rojos corresponden a los datos obtenidos experimentalmente

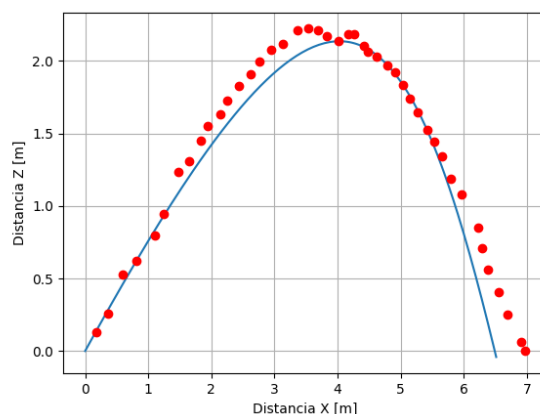


Figura 4: Gráfica referente a la trayectoria obtenida en el primer lanzamiento para el tercer modelo por medio de la evolución de las variables bajo el método RK4. La línea azul continua representa la trayectoria dados los parámetros de resistividad y superficie, mientras que los puntos rojos corresponden a los datos obtenidos experimentalmente

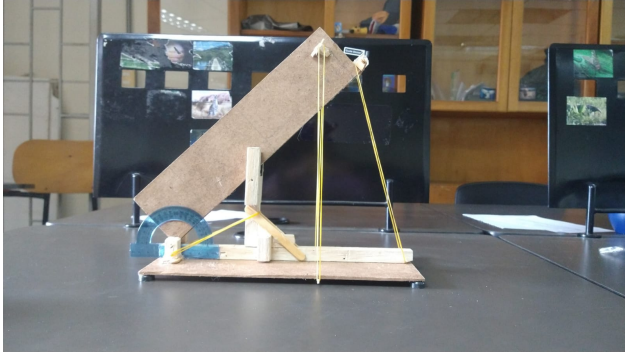


Figura 5: ballesta realizada para los experimentos

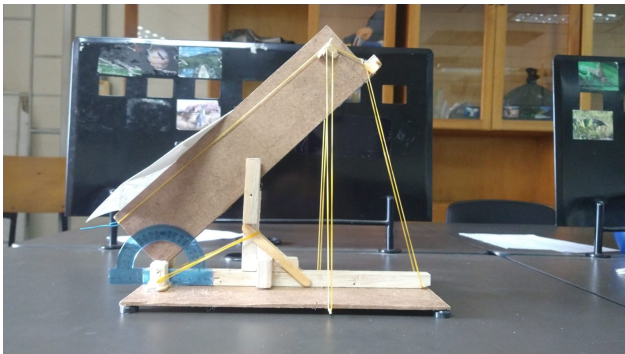


Figura 6: ballesta cargada en el instante antes de lanzar el avión



Figura 7: Los 9 aviones realizados para el experimento, de arriba a abajo: los amarillos son de papel origami, los blancos de papel de dibujo, y los verdes de cartulina.



Figura 8: modelo *Alkonost* para cada tipo de papel. Este modelo presenta más dificultad de armado para papeles gruesos por su reducido tamaño final.

Referencias

- [1] Bing Feng Ng, Qiao Mei Kng, Yin Yin Pey, and Jorg Schluter. On the aerodynamics of paper airplanes. In *27th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Reston, Virginia, 2009. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [2] Noor Iswadi Ismail, Zurriati Mohd Ali, Iskandar Shah Ishak, R M Noor, and Rosniza Rabilah. Aerodynamic performances of paper planes. *Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 77(1):124–131, 2020.
- [3] MD Hasibuzzaman and Md Hasan. Analysis of flight characteristics of paper airplanes. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 7:161–166, 01 2023. doi: 10.33564/IJEAST.2023.v07i09.024.
- [4] S Gurnani and M Damodaran. Computational aeromechanics of paper airplanes. *J. Aircr.*, 56(5):2070–2079, 2019.
- [5] Foldable Flight. New WORLD RECORD paper airplane! how to make the BEST paper airplane for distance!, September 2022.
- [6] Foldable Flight. TOURNAMENT CHAMPION — how to make the BEST paper airplane for distance — over 150 feet — alkonost, May 2023.