

# Midiendo velocidades supersónicas utilizando Youtube



Pablo Núñez<sup>1</sup>, Silvia Calderón<sup>2</sup> y Salvador Gil<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Industrias de la Universidad Nacional de Gral. Sarmiento, Buenos Aires;  
Instituto San José de Morón, Buenos Aires.

<sup>2</sup>Instituto Superior del Profesorado J.V. González, Rivadavia 3570 –Buenos Aires.

<sup>3</sup>Universidad Nacional de San Martín, Campus Miguelete, M. de Irigoyen 3100,  
San Martín (1650), San Martín, Buenos Aires.

E-mail: sgil@unsam.edu.ar

(Recibido el 6 de Noviembre de 2008; aceptado el 29 de Diciembre de 2008)

## Resumen

En el presente trabajo se estudia el fenómeno de ondas de choque usando una cámara digital y una aplicación de este concepto para determinar velocidades de aviones supersónicos empleando videos de Youtube. Obtenemos la velocidad del avión midiendo la apertura del cono de la onda de choque. Esto es posible debido a la formación de una nube de vapor en forma de cono sobre el fuselaje del avión. Esta nube es consecuencia de la condensación que se produce por la descompresión adiabática al formarse la onda de choque. Asimismo, se recrea un experimento para ilustrar la física de la formación de ondas de choque para estudiantes principiantes. Las características geométricas de la onda de choque para un objeto que se desplaza sobre el agua a velocidades superiores a las de las ondas en ese medio, permite estudiar el modelo físico en toda su extensión.

**Palabras clave:** nuevas tecnologías, onda de choque, velocidad supersónica, videos de Youtube.

## Abstract

The present study analyzes the shock wave phenomena using a digital camera and an application of this concept to measure the speed of a supersonic jet using videos from Youtube. We determined the speed of the plane by measuring the aperture of the cone of the shock wave. When the plane exceeds the speed of sound, a conical cloud is clearly visible on its fuselage. This cloud is produced by the condensation of vapor produced by the adiabatic decompression that occurs on the trail of the shock wave. We also used a simple experiment to study the basic physics associated with the shock wave phenomenon accessible to beginners. The basic characteristics of the shock wave produced by an object moving on the water at a speed that is higher than the speed of the waves in this system are studied. The basic physics of the shock waves can be explored with this set up.

**Keywords:** New technology, shock wave, supersonic speed, Youtube Videos.

**PACS:** 01.50.Lc, 01.50.My, 01.50.Pa, 05.70.-a, 07.05.Hd, 47.40.Nm.

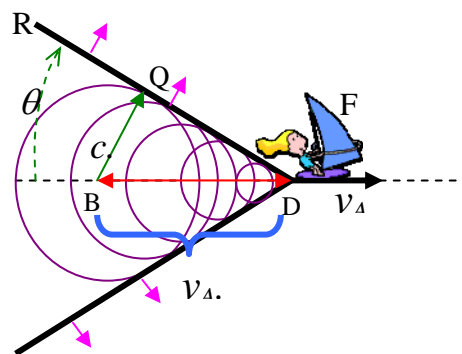
**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando un bote se desplaza a altas velocidades puede observarse tras de sí una estela en forma de delta. Este perfil se conoce como onda de choque o cono de Mach (ver figura 1). Geométricamente este cono corresponde a la envolvente de los frentes de ondas circulares individuales generados en el medio (agua) por la fuente en movimiento (bote). En la línea que delimita el cono todas las ondas se superponen en fase, por lo tanto sobre esta línea la amplitud es considerablemente mayor que en otros puntos alcanzados por las ondas. Este es el origen de la estela característica que se observa cuando un bote se mueve a gran velocidad en el agua [1].

En particular este fenómeno ocurre cuando la fuente se desplaza a una velocidad mayor que la onda en ese medio. En el caso de ondas sonoras, la onda de choque se conforma como la superficie del cono que envuelve a los

frentes esféricos de las ondas sonoras generados por la fuente que se desplaza.



**FIGURA 1.** Se esquematiza el frente de onda de choque generado por una fuente F (bote).

También en este caso, la amplitud de la onda de presión es notablemente amplificada sobre el cono de Mach. Este fenómeno da origen a la explosión sonora o “boom” sónico que se produce cuando un avión sobrepasa la velocidad del sonido. También se produce un estruendo característico en explosiones, truenos o más comúnmente cuando se produce el latigazo al moverse la punta del látigo a velocidades superiores al sonido. En la figura 1, en el intervalo de tiempo  $t$  la fuente se mueve de B a D con una velocidad constante  $v_A$ , mientras que la onda se desplaza de B a Q y con velocidad  $c$ . De acuerdo con esto y considerando el triángulo rectángulo BQD (recto en Q), se verifica la relación:

$$\text{sen } \theta = \frac{c}{v_A} = \frac{1}{Ma} \quad (1)$$

Como  $0 \leq \text{sen } \theta \leq 1$  la validez de (1) está restringida para  $c \leq v_A$  o bien cuando  $Ma = v_A / c > 1$ , o sea que esta relación es sólo válida cuando la velocidad de la fuente ( $v_A$ ) es mayor que la de la onda en ese medio ( $c$ ). En otras palabras, las ondas de choque se producen cuando la velocidad del móvil ( $v_A$ ) supera la velocidad de las ondas  $c$  en ese medio. De allí la denominación de velocidad supersónica para el caso de fuentes que se desplazan a velocidades mayores que el sonido [1].

## II. EXPERIMENTO: ONDAS DE CHOQUE EN EL AGUA

Para este estudio utilizamos una bandeja transparente de 30 cm x 40cm x 4cm aproximadamente que contiene agua. El agua tiene una profundidad de un par de centímetros. Se coloca dicha bandeja sobre un papel donde se marcó una escala de dimensiones conocidas. Una cámara digital, en modo video colocada verticalmente sobre la bandeja, permite filmar los procesos que ocurren en la bandeja. Es útil disponer de un trípode para sostener la cámara a una distancia fija durante la filmación. La escala nos permite convertir las coordenadas en píxeles de los fotogramas obtenidos con una cámara digital en longitudes estándares [2, 3].

Con un peso atado a un hilo es simple generar ondas esféricas que se desplazan por el agua. En la figura 2 se muestra un fotograma donde se ven las ondas así producidas. En el mismo fotograma se observan las marcas negras usadas como referencia, colocadas a 10 cm entre sí. Si se filma este proceso es posible, observando el video cuadro a cuadro, seguir la evolución de un dado frente de ondas desplazándose sobre el agua [4, 5]. En cada fotograma podemos medir la posición ( $x,y$ ) de cualquier punto de mismo y al conocer el número de cuadros por segundo que filma la cámara ( $fps$ ) podemos determinar la velocidad  $c$  de las ondas [3, 4, 5]. La Figura 3 muestra la posición en un dado frente de onda en función del tiempo utilizando los fotogramas filmados.

Una vez determinada la velocidad de las ondas en el agua, sin modificar las condiciones del sistema tales como

las características del agua y su profundidad, procedemos a generar ondas de choque. Para generar dichas ondas en la bandeja se usa una pequeña tapa plástica arrastrada por un hilo, que se mueve manualmente sobre el agua. Resulta muy sencillo lograr una velocidad tal que visualicen las ondas de choque en forma de delta, como se ve en la figura 4. Cuando esta condición se logra, se procede a filmar el proceso. La velocidad  $v_A$  de la tapita se obtiene a partir de las coordenadas ( $x,y$ ) en cada instante  $t$  [2, 4, 5]. En la Figura 5 se muestra los resultados típicos para una corrida del experimento. Asimismo en cada fotograma se observan las ondas de choque, en forma de delta, como se ilustra en la figura 4. La imagen permite medir el ángulo  $\theta$ . Al conocer  $c$ ,  $v_A$  y  $\theta$ , es posible comprobar que la relación (1) se verifica en este caso.

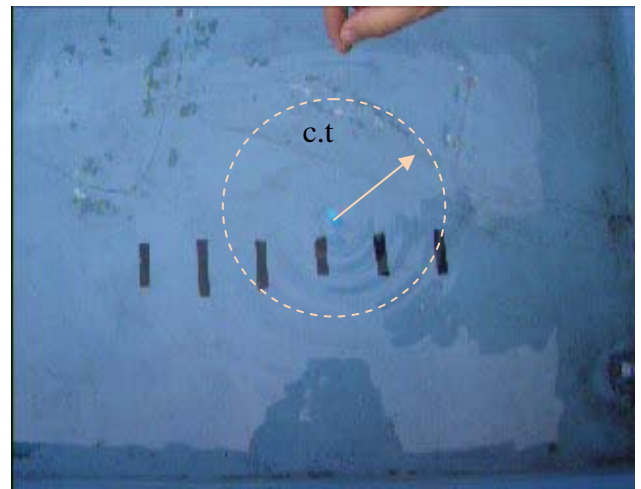


FIGURA 2. Fotograma correspondiente al video que permite determinar la velocidad de propagación  $c$  de las ondas en el agua. Las marcas negras se usaron para definir la escala en el fotograma.

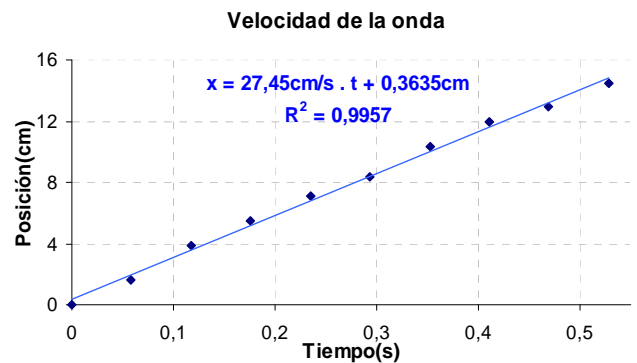
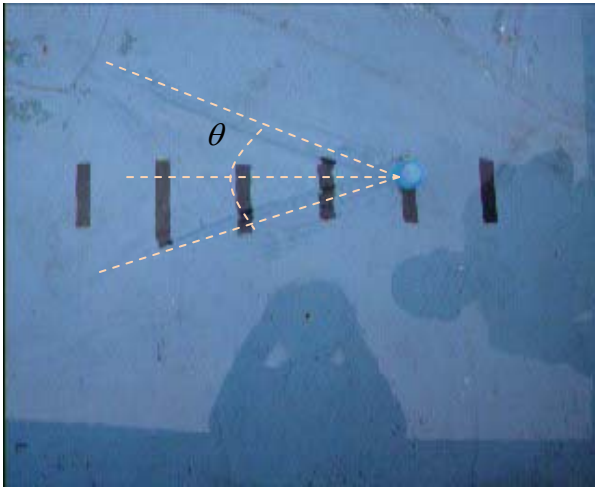
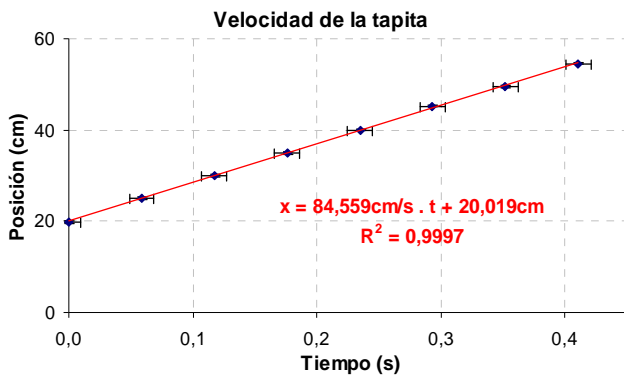


FIGURA 3. Posición de un dado frente de onda en función del tiempo, para una onda esférica en el agua (Fig. 2). Del ajuste lineal se obtuvo la velocidad  $c = (27,4 \pm 0,6) \text{ cm/s}$  de las ondas.



**FIGURA 4.** Fotograma de una tapita moviéndose a una velocidad  $v_A > c$ . Se observa la estela en forma de delta que deja la onda de choque generada por la tapita al desplazarse sobre el agua. De esta imagen es posible medir el ángulo  $\theta$  de la onda de choque. Esta imagen es un fotograma del video tomado por la cámara digital. Sobre el fondo se observan también las sombras de los experimentadores.



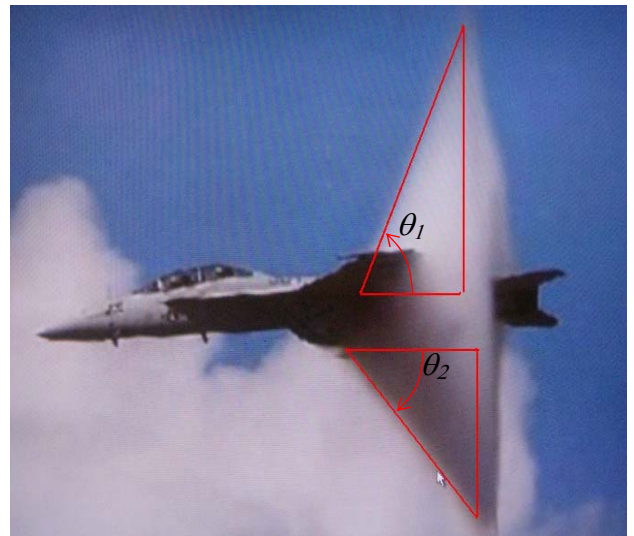
**FIGURA 5.** Gráfico de la posición en función del tiempo del bote. De la relación lineal se obtuvo la velocidad  $v_A = (84,6 \pm 0,6) \text{ cm/s}$ .

El valor del ángulo hallado es, para este caso,  $\theta = 18^\circ \pm 1^\circ$  y como la velocidad de la onda  $c = (27,4 \pm 0,6) \text{ cm/s}$ , la velocidad del bote calculada según la relación (1) es  $v_A = (90 \pm 12) \text{ cm/s}$ . Por su parte del estudio del video cuadro por cuadro, mostrado en la Figura 5, la velocidad del bote resultó  $v_A = (84,6 \pm 0,6) \text{ cm/s}$ . Considerando las incertezas en las mediciones, se observa que las velocidades del bote obtenidas por ambos métodos coinciden.

Luego de verificar la expresión (1) y familiarizarnos con la física del proceso de formación de ondas de choque, procedemos a aplicarlo al caso de un avión que se mueve a velocidades supersónicas, es decir  $v_A > 340 \text{ m/s}$  (1224 km/h). En este caso, observamos videos de aviones jets supersónicos en pruebas de demostraciones a bajas alturas que se muestran en Youtube [6]. Cuando este tipo de

*Midiendo velocidades supersónicas utilizando Youtube* aviones supera la velocidad del sonido, se produce una nube de vapor que tiene la forma de un cono característico de las ondas de choque. En el frente de la onda de choque (sobre el cono) se desarrolla una sobrepresión. Al pasar este cono por un punto, el aire sufre una rápida descompresión adiabática. En toda descompresión adiabática la temperatura disminuye. Este efecto es fácilmente observable cuando nos aplicamos desodorante. El tubo de desodorante está a temperatura ambiente, y al oprimir la válvula del aerosol, los gases contenidos en el tubo sufren una descompresión adiabática que lo enfría y es fácilmente percibida por nuestras axilas. En el caso del avión supersónico, al descomprimirse el aire húmedo y enfriarse, el vapor contenido en el mismo se condensa y se observa una nube que tiene la forma de la onda de choque y que acompaña al avión. Este fenómeno también se conoce como singularidad de Prandtl-Glauert [9]. En el apéndice se sugiere un experimento que permite observar formación de nube en una descompresión adiabática.

A partir de una imagen como la que se ilustra en la figura 6, obtenida de Youtube, se procedió a medir el ángulo  $\theta$  para el caso de un avión jet F-18. Se midió el ángulo en la parte superior e inferior del avión. Con el promedio de estos valores se estimó la velocidad del avión.



**FIGURA 6.** Aquí se observa a un avión F-18 con la formación de una nube de vapor de agua con forma geométrica de cono envolvente correspondiente a la onda de choque.

El valor medio resultó  $\theta = 56^\circ \pm 2^\circ$ . Tomando la velocidad del sonido  $c = (340 \pm 10) \text{ m/s}$ , adecuado para un avión en vuelo rasante como el estudiado en la imagen, se obtuvo la velocidad  $v_A$  del avión:

$$v_A = (15 \pm 1) \times 100 \text{ km/h} = (1.2 \pm 0.1) \text{ Ma}$$

Este resultado se halla dentro de los valores de especificación de este tipo de aeronave F-18 [9, 10].

### III. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra una aproximación constructivista para introducir el fenómeno de ondas de choque y una aplicación práctica de uso de estos conceptos para determinar velocidades de aviones supersónicos empleando videos de Youtube. Los experimentos utilizan nuevas tecnologías de fácil acceso y bajo costo, como son videos obtenidos en Internet, una cámara digital hogareña y programas de acceso libre para el estudio de imágenes cuadro por cuadro. Además, ilustran la física de las ondas de choque de manera accesible aun para estudiantes principiantes. Las características geométricas de la onda de choque para un objeto que se desplaza sobre el agua a velocidades superiores a las de las ondas en ese medio, permite estudiar el modelo físico en toda su extensión.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Asociación Física Argentina por la ayuda económica otorgada a través del Programa INVOFI, que sirvió para desarrollar la actividad presentada. También agradecemos a la Dra. A. Schwint por la atenta lectura del texto.

### REFERENCIAS

- [1] Tipler, P., *Física para la ciencia y la tecnología*. Vol 1, (Ed. Reverté, cuarta edición, España 1999)
- [2] Calderón, S. y Núñez, P. y Gil, S. *Cámara digital como instrumento de laboratorio - estudio del tiro oblicuo*, Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol.3,(1) Enero 2009.
- [3] Gil, S., Reisin, H. D. y Rodríguez, E., *Using a digital camera as a measuring device*, Am. J. Phys. **74**, 768, (2006).
- [4] *Data Point*, disponible como shareware en <http://www.stchas.edu/faculty/gcarlson/physics/datapoint.htm>. Consultado en junio de 2007, y en [http://www.fisicarecreativa.com/ajp/soft\\_sg.htm](http://www.fisicarecreativa.com/ajp/soft_sg.htm), consultado en octubre de 2008.
- [5] Physics ToolKit disponible en forma libre en <http://www.physicstoolkit.com>. Consultado en junio de 2008.
- [6] [www.youtube.com](http://www.youtube.com) Sitio de Internet que permite subir y ver videos por la web. Consultado en Junio de 2008.
- [7] Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Prandtl-Glauert\\_singularity](http://en.wikipedia.org/wiki/Prandtl-Glauert_singularity). Consultado en Septiembre de 2008.
- [8] Gil, S y Rodríguez, E., *Física re-Creativa. Experimentos de física usando nuevas tecnologías*, (Prentice Hall, Primera edición, Buenos Aires, 2001).
- [9] [www.higheronillustrations.com/aviation\\_specification/spec\\_f18.html](http://www.higheronillustrations.com/aviation_specification/spec_f18.html). Consultado en agosto de 2008.
- [10] [www.stanford.edu/~jrdx/shock.html](http://www.stanford.edu/~jrdx/shock.html). Consultado en agosto de 2008.

[11] Resnick, R., Halliday, D. Krane, K., *Física Vol. 1* (Ed. CECOSA, Cuarta edición, México, 1997).

### APÉNDICE

El fenómeno de la aparición de la nube atrás del cono de la onda de choque producido por un avión supersónico se debe a la descompresión rápida y adiabática del aire húmedo [1]. La descompresión adiabática de un gas hace descender la temperatura del mismo, ya que para expandirse el gas, debe realizar trabajo contra el medio circundante. El proceso es rápido y no hay intercambio de calor con el medio (adiabático) y el trabajo se hace a expensas de la energía interna del gas. Como la energía interna de un gas depende de su temperatura, al disminuir la energía interna baja la temperatura [11]. En el caso del aire húmedo, el descenso de temperatura provoca que se condense el vapor de agua.

Puede recrearse este fenómeno con una botella de plástico transparente, como los envases de agua con gas o soda de 1 ½ l, conteniendo un poco de agua en su interior. Tapamos la botella con un tapón de goma en el que se penetró un pico para inflar pelotas de fútbol. Se aumenta la presión en la botella, bombeando aire con un inflador de pelotas de fútbol. En este proceso es necesario tomar precauciones para evitar que el tapón de goma pueda golpear, cuando salte, a alguna persona incluyendo al experimentador. Si se filma el proceso, se observa claramente que cuando la tapa de la botella salta, expulsada por la sobrepresión en el interior de la misma, se genera una nube de vapor debido al enfriamiento provocado en la descompresión súbita y adiabática del aire contenido en la botella. Este efecto puede observarse en los fotogramas del video, que se muestran en la Figura 7. A la izquierda vemos la botella antes de que salte el tapón, y a la derecha la misma botella inmediatamente después de haber saltado el tapón de goma. La nube de vapor es claramente visible en este último fotograma (el de la derecha).



**FIGURA 7.** Botella de plástico con aire húmedo. A la izquierda vemos la botella presurizada antes de que salte el tapón de goma. A la derecha, la misma botella inmediatamente después que salta el tapón. La nube formada en la descompresión adiabática es claramente visible en el fotograma de la derecha.