

# Nuestra Facultad

## RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL:

### INTERACCIÓN DE ONDAS DE CHOQUE CON FLUJOS INHOMOGÉNEOS

#### INTRODUCCIÓN

Una onda de choque es una onda compresiva que viaja a través de un fluido y cambia las magnitudes termo-dinámicas del medio de forma abrupta, es decir, la presión, la densidad y la temperatura son distintas a ambos lados de la onda. A efectos globales, la onda puede considerarse como una discontinuidad, ya que el espesor es del orden del camino libre medio entre colisiones atómicas (distancia media entre dos colisiones moleculares), y éste es mucho menor que cualquier longitud característica del problema bajo estudio. La intensidad de la onda de choque se determina por el número de Mach ( $M$ ), que es la relación entre la velocidad de la onda ( $D$ ), y la velocidad del sonido del fluido sin comprimir ( $c_0$ ),  $M = D/c_0$ . La onda de choque es siempre supersónica, es decir  $M > 1$ . Las ondas de choque pueden aparecer en la naturaleza en contextos muy diversos:

- *Aerodinámica*: en la parte exterior del fuselaje de aviones supersónicos (ver Figura 1-izquierda) y

dentro de los propios reactores de propulsión. En balística (ver Figura 1-derecha).

- *High-Energy-Density Physics*: en la Fusión por Confinamiento Inercial (FCI), donde varias ondas de choque concéntricas viajan a través del material nuclear con el propósito de comprimir el combustible y alcanzar así las condiciones necesarias para la fusión termonuclear.
- *Astrofísica*: en la explosión de supernovas las ondas de choque atraviesan zonas en donde hay gas interestelar inhomogéneo.

En cada una de las situaciones expuestas anteriormente, las condiciones que caracterizan la onda de choque son muy diferentes, y el estudio particular de cada ejemplo es un problema completamente independiente y muy complejo. En un caso idealizado, el fluido a través del cual se propaga la onda está en reposo y, por lo tanto, la onda viajará libremente sobre dicho medio. Sin embargo, en situaciones más realistas, existen muchos factores que nos alejan de la idealidad inicial, como por ejemplo: que la onda de choque no sea plana, que el medio sea reactante (detonaciones) o que exista turbulencia. En nuestro caso, nos centramos en estudiar cómo las inhomogeneidades presentes en el fluido, por ejemplo debido a turbulencias, pueden afectar a la dinámica



Figura 1. Ondas de choque producidas por un avión supersónico (izquierda) y por el disparo de un proyectil (derecha).

de la onda de choque y también a la cinemática del fluido comprimido.

El problema de la interacción de flujos turbulentos con ondas de choque se había comenzado a estudiar durante el siglo pasado, en la década de los 50, motivado principalmente por ruido acústico generado por los aviones supersónicos. El estudio comenzó con las herramientas disponibles en aquel entonces, esencialmente el modelado analítico desarrollado por Ribner [1]. Más tarde, y gracias a la llegada de las supercomputadoras, las posibilidades de una exploración numérica detallada de la interacción permitieron estudiar este fenómeno con otras técnicas [2-3]. En la tesis aquí presentada, y en las publicaciones que la completan (ver referencias [4]), se muestran por primera vez expresiones *analíticas cerradas* que permiten desentrañar el comportamiento de las magnitudes turbulentas en el fluido comprimido como función del número de Mach ( $M$ ) y del índice adiabático ( $\gamma = c_p / c_v$ ).

### MODELO TEÓRICO

El modelo presentado en la Tesis tiene como objetivo el estudio básico de la interacción de la onda de choque plana con flujos inhomogéneos. En particular, se pretende caracterizar de forma analítica dichas interacciones con los tres modos independientes de perturbación: vorticidad, entropía y modo acústico. El modelo presentado es un primer paso necesario para abordar problemas más complejos, en los cuales el flujo turbulento puede estar compuesto por una combinación de los tres modos.

Como ejemplo ilustrativo mostramos la amplificación de la energía turbulenta a través de una onda de choque plana, es decir, nos situamos en un escenario donde una onda de choque de intensidad  $M$  viaja a través de un gas turbulento. Suponemos que la turbulencia del fluido sin comprimir es isotropa y está esencialmente formada por perturbaciones de vorticidad. Descomponemos el campo de vorticidad en sus modos de Fourier y asumimos que cada modo interacciona de forma independiente con el choque (hipótesis válida para una teoría lineal). Por lo tanto, podemos usar los resultados obtenidos de la interacción con un campo mono-modulado de vorticidad (una sola frecuencia espacial característica) para ser después generalizados en el estudio de la 2D como en 3D, a través de los promedios estadísticos correspondientes.

La amplificación de la energía cinética turbulenta predicha por el modelo (ver curva azul en la Figura 2-izquierda) coincide con los resultados experimentales de Barre *et al.* [3] y numéricos de Lee *et al.* [2] existentes.

Por otra parte, el modelo teórico permite obtener valores para cualquier valor de  $M$  y  $g$  con sólo implementar la fórmula analítica (ver Figura 2-derecha). Una ventaja añadida del modelo es la posibilidad de obtener leyes de escala completamente analíticas en los límites de choque débil ( $M - 1 \ll 1$ ), choque fuerte ( $M \gg 1$ ) y gas muy compresible ( $\gamma \rightarrow 1$ ). Junto con la amplificación de la energía cinética turbulenta se han obtenido los promedios de las amplitudes de vorticidad y densidad detrás del choque, así como la energía del flujo acústico irradiado por el choque.

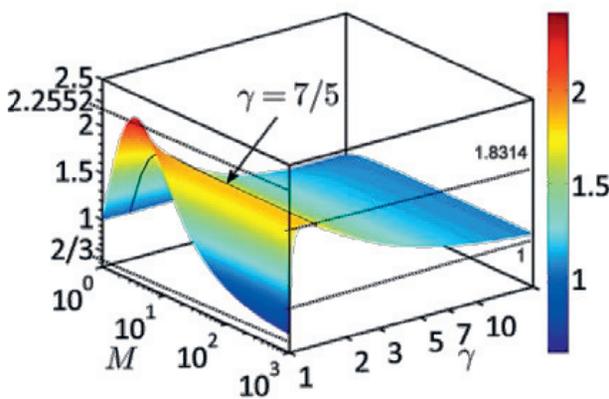
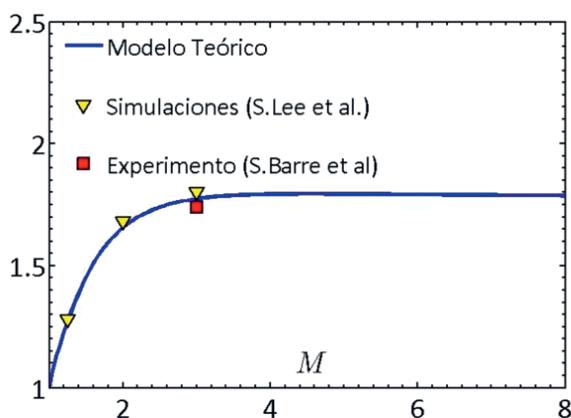


Figura 2. Amplificación de la energía turbulenta a través del choque para aire ( $\gamma = 7/5$ ) (izquierda), y para un  $g$  arbitrario (derecha).

## CONCLUSIONES

La interacción lineal de ondas de choque planas con flujos turbulentos es un tema importante en diferentes áreas de la física y de la ingeniería. El trabajo presentado añade una nueva referencia en dicho campo, proporcionando nuevas técnicas analíticas para el estudio de la interacción de ondas de choque aisladas con perfiles perturbados de vorticidad, entropía u ondas acústicas, y flujos turbulentos en general. Los promedios pueden ser obtenidos de forma analítica, en términos de funciones elementales y los límites para choques débiles/fuertes y fluidos altamente compresibles son también proporcionados de forma exacta. Detalles en referencia [4].

## REFERENCIAS

- [1] H. S. Ribner, "Shock-turbulence interaction and the generation of noise", NACA TN-3255 (1954).
- [2] S. Lee, S. K. Lele and P. Moin, *J. Fluid Mech.* 251, 533 (1993).
- [3] S. Barre, D. Alem and J. P. Bonnet, *AIAA J.* 34, 968 (1996).
- [4] J.G. Wouchuk, C. Huete and A.L. Velikovich, *Phys. Rev. E* 79, 066315 (2009), *Phys. Rev. E* 83, 056320 (2011) and *Phys. Rev. E* 85, 026312 (2012).

César Huete Ruiz de Lira  
*Doctorando*