

4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIV Congreso de Ingeniería de Organización
Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010

La analogía entre burbujas en perfiles aeronáuticos y burbujas económicas

Félix Calvo Narváez¹, Carlos Rodríguez Monroy²

¹ Dpto. de Tecnologías Especiales Aplicadas a la Aeronáutica. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica. Universidad Politécnica de Madrid. Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid. felix.calvo@upm.es

² Dpto. de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística, Área de Administración de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. crmonroy@etsii.upm.es

Resumen

Sabemos que hay fenómenos físicos que son explicables a la luz de otros fenómenos que ya han sido bien estudiados anteriormente. Sólo en algunas ocasiones un fenómeno físico sirve para explicar comportamientos socio-económicos.

El objetivo que se persigue es el de identificar las distintas variables que intervienen en el problema físico, y buscar sus equivalentes para los mercados.

Si se parte de uno de los efectos observados en cualquier mercado podemos llegar a determinar cuáles son las causas que lo han provocado, y para aplicar nuestra analogía entre burbujas, bastará con sustituir la inversión por la fuerza de sustentación conseguida.

Palabras clave: Burbujas, analogía, capa límite, desprendimiento.

1. Introducción

Se sabe que hay fenómenos físicos que son explicables a la luz de otros fenómenos físicos que ya han sido suficientemente estudiados con anterioridad. Sólo en contadas ocasiones uno de estos fenómenos físicos sirve para explicar comportamientos sociales o económicos. Por ejemplo, un volcán entra en erupción y las cenizas volcánicas producen un accidente aéreo, por lo que inmediatamente la compañía aérea del avión siniestrado baja su cotización bursátil, además en el medio plazo la compañía de transporte aéreo perderá pasajeros, y en el largo plazo verá como las empresas de seguros elevan sus pólizas de seguros. El fenómeno físico habrá desencadenado toda una serie de comportamientos socio-económicos.

Este es el caso que nos ocupa, y ni siquiera se oculta que ambos se denominan de igual manera. Tanto el fenómeno físico de formación de burbujas de aire, pongamos por caso sobre el ala de un avión, como el comportamiento de algunos mercados, ya sea el bursátil, el de divisas, el inmobiliario, el crediticio, etc., en los que los precios se hinchan de forma desmesurada ante una fuerte demanda de esos activos, productos,... pensamos que se encuentran en esta situación.

Si se habla de las relaciones causa-efecto, la consecuencia del estallido de las burbujas de aire en el ala de una aeronave es una pérdida importante en el valor de la fuerza sustentadora, así como un cambio súbito en el momento de cabeceo del ala, que podría ocasionar en determinadas circunstancias el “crash” de la aeronave. En el caso de tratarse del comportamiento de un mercado, ya sea de valores, de mercancías u otros, la explosión de la burbuja produce una desalineación de la oferta y de la demanda, provocando un importante reajuste en los precios, por lo que la economía tendrá que reestructurar oferta y demanda, y el efecto se puede prolongar en el tiempo.

Existen otros mercados, como el de la generación de energía eléctrica por vía eólica, que debido a que los precios a que se remunera a los productores están subvencionados por el Estado (en Europa en la mayoría de los países), con objeto de internalizar las externalidades de tipo medio ambiental y social (como consecuencia del conocimiento de una tecnología avanzada de origen nacional, o del aumento en la creación de empleo que produce esta forma de generación, o de la menor contaminación que provoca, o del aumento en el valor de la capacidad de generación de electricidad sin tener que realizar nuevas inversiones en grandes instalaciones de tipo convencional, etc.) que no son tenidas en cuenta en el precio al que se retribuye el KWh eólico por el propio mercado. El “crash”, o entrada en pérdida, de estos mercados puede ser motivado por una decisión política de retirar de manera inesperada o rápida esas primas con que se remunera esta energía de origen eólico.

El objetivo que se persigue es el de identificar las distintas variables que intervienen en el problema físico, y buscar sus equivalentes para los mercados objeto de estudio.

También, se puede hacer uso de los conocimientos que se tienen sobre el comportamiento de las burbujas de aire sobre un ala recta, como por ejemplo en el caso de que la burbuja se pueda readherir al perfil, para así sacar conclusiones análogas en los mercados citados.

Por último, hay una metodología típica en el estudio aerodinámico del fenómeno que utiliza el análisis dimensional, que busca reducir el número de variables a manejar empleando parámetros adimensionales, como el conocido número de Reynolds que representa el cociente entre las fuerzas convectivas y las fuerzas viscosas sobre el perfil, o el número de Mach que da la relación entre la velocidad del aire y la velocidad del sonido.

2. El problema físico de las burbujas de aire

En régimen estacionario de vuelo, la ecuación de equilibrio de fuerzas en dirección perpendicular a la velocidad del viento establece que la fuerza sustentadora coincide con el peso del avión. La expresión correspondiente a la fuerza de sustentación, L , está dada en función de la masa M del avión, ρ a la densidad del aire, V a su velocidad, S a la superficie del ala en planta (longitud por la cuerda), y C_L al coeficiente de sustentación del ala, que depende de los coeficientes de sustentación de los perfiles (C_{L_i}) que la conforman (siendo g la aceleración de la gravedad):

$$M g = L = (1/2) \rho V^2 S C_L \quad (1)$$

A velocidades pequeñas, para mantener el vuelo estacionario, será preciso aumentar el ángulo de ataque del ala para lograr mayor coeficiente de sustentación, y con ello aumentan los gradientes de presión adversos sobre los perfiles del ala, supuesta bidimensional, y de superar el valor del ángulo de ataque que corresponde al coeficiente

de sustentación máximo se produciría la entrada en pérdida. Además, es bien sabido que la sustentación del perfil se consigue a través de una mayor velocidad de la corriente incidente del aire por la parte superior del perfil (extradós) comparada con la velocidad a la que circula el viento incidente por la parte inferior del perfil (intradós).

Si se llama D a la cuerda del perfil (dimensión lineal que va en la dirección de la velocidad), y μ a la viscosidad dinámica del aire, se define el número de Reynolds, Re , como:

$$Re = \rho V D / \mu \quad (2)$$

Los aviones normales presentan unos Re en el orden de más de un millón. Con estos Re , la viscosidad se aprecia sólo en una delgada capa límite sobre el extradós del perfil, que comienza en el borde de remanso anterior que está próximo al borde de ataque, así como en la estela aguas abajo del perfil. La capa límite se caracteriza porque la presión es constante a lo largo de líneas perpendiculares a la superficie del perfil, y al avanzar aguas abajo de la superficie, la capa límite (supuesto que es delgada) se ensancha por: deceleración de las láminas fluidas como consecuencia de la resistencia por rozamiento, y por los gradientes adversos de presión que hacen decrecer la cantidad de movimiento. Cuando existe un gradiente adverso de presión las láminas fluidas más próximas al perfil se deceleran más que las alejadas, y las partículas próximas al perfil acaban por retroceder en lugar de avanzar, por lo que la capa límite sobre el extradós se encontrará desprendida. La capa límite puede ser laminar cuando las láminas se desplazan con orden, y sólo hay un intercambio viscoso de cantidad de movimiento. La capa límite turbulenta hace que las láminas se crucen entre sí, con un gran intercambio de cantidad de movimiento.

La capa límite laminar no perdura, y se comporta así sólo en la parte delantera del perfil. Una vez el perfil ha perturbado la corriente, la capa límite realiza su transición a turbulenta. La capa límite turbulenta produce un importante rozamiento en la pared, y es más insensible que la laminar ante gradientes de presión adversos.

El mecanismo por el que los perfiles entran en pérdida es básicamente el siguiente: a grandes ángulos de ataque se presentan picos negativos de presión (succión) en el extradós del perfil (que es la parte superior del mismo), cerca del borde de ataque del perfil, por lo que aguas abajo la presión aumenta, y se tendrá un gradiente de presión adverso, que puede provocar el desprendimiento de la capa límite y la entrada en pérdida del perfil. Al llegar al pico de presión, la capa límite es laminar, y aguas abajo se pueden presentar distintas situaciones en función del Re y de la forma en que se distribuye el campo de presiones. Se puede desprender la capa límite laminar, sin readherencia posterior. Puede haber desprendimiento laminar con readherencia a corta distancia, o bien aguas abajo del punto de desprendimiento a cierta distancia. Puede haber transición de la capa límite laminar a turbulenta, con posterior desprendimiento. Por último, se puede dar la transición de la capa límite, sin que exista desprendimiento.

Cerca del borde de ataque, la distribución de presiones potencial, sin considerar la viscosidad, depende de la forma que tenga el perfil y del ángulo de ataque que tenga. En perfiles gruesos, la forma del perfil influye a través del espesor, mientras que en perfiles delgados es función de la línea de curvatura del perfil y del radio del perfil en el borde de ataque.

La forma de entrada en pérdida de los perfiles se clasifica según su espesor. La distribución de presiones en los perfiles muy delgados presenta un pico de presiones muy intenso cerca del borde de ataque del perfil, lo que produce un desprendimiento

laminar inmediato. La distribución de presiones en perfiles gruesos resulta bastante plana, por lo que cabe esperar que primero se presente la transición del régimen laminar al turbulento y el desprendimiento de la capa límite en régimen turbulento se producirá mucho después.

El número de Reynolds juega un papel fundamental en la readherencia de la capa límite. La capa límite se puede readherir en caso de que pase a turbulenta inmediatamente a su desprendimiento, y se formará una burbuja con recirculación del fluido en su interior, porque el proceso de mezcla turbulenta transporta cantidad de movimiento desde la corriente exterior potencial hasta la zona cercana al perfil eficazmente, por lo que arrastra aguas abajo a las partículas que intentan retroceder. Si el Re crece, la burbuja se acorta, pudiendo llegar a desaparecer porque se adelanta la transición de régimen. Si disminuye el Re , la burbuja se alarga, pudiendo no haber readherencia porque se retrasa la transición. Al disminuir el Re , el perfil grueso se comporta como uno más delgado, y la capa límite se desprende pronto.

Existen dispositivos para evitar la entrada en pérdida de perfiles, a bajas velocidades, como ocurre en las maniobras de aproximación, aterrizaje y despegue. Estos dispositivos consisten en colocar superficies hipersustentadoras: flaps de borde de ataque o de borde de salida, o en colocar ranuras (slots) que transfieran cantidad de movimiento del intradós al extradós del perfil (soplado de la capa límite), o aumentar la curvatura de los perfiles. Las curvas de coeficiente de sustentación del perfil tienen una zona muy visible con pendiente constante, de valor 2π , y se debe a que el citado coeficiente responde a la expresión:

$$C_1 = 2\pi(\alpha + \alpha_{z1}) \quad (3)$$

siendo α el ángulo de ataque al que vuela el perfil, y α_{z1} es el ángulo de ataque correspondiente a la línea de sustentación nula, que es aquella dirección del viento incidente para la que la sustentación del perfil se hace nula.

Los tipos básicos de entrada en pérdida, a bajas velocidades y para alas rectas, suponiendo un Reynolds de 10^7 , y atendiendo al espesor relativo (obtenido al dividir el espesor entre la cuerda del perfil), según Palme (1953), y Torenbeek (1976) son:

- Tipo A: La entrada en pérdida se inicia por el borde de salida, y es típico de perfiles gruesos (espesor/cuerda $> 0,15$), en los que la capa límite pasa a turbulenta antes de desprenderse. En este caso las curvas de variación de los coeficientes de sustentación y de momento de cabeceo-picado son suaves, por lo que no existe un cambio brusco en las fuerzas globales cuando el perfil entra en pérdida. En este caso, al avanzar el desprendimiento disminuye la presión en el extradós del perfil cerca del borde de salida, produciendo un momento de picado.

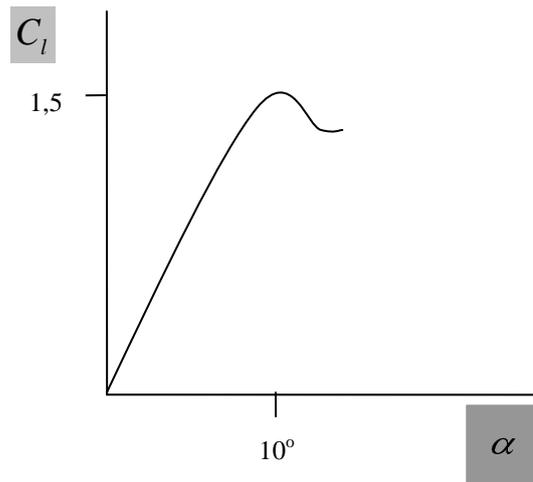


Figure 1. Entrada en pérdida de tipo A

- Tipo B: La entrada en pérdida se produce con desprendimiento cerca del borde de ataque, y formando una burbuja corta, lo que es típico de perfiles de espesor medio ($0,08 < \text{espesor/cuerda} < 0,15$). Ahora la capa límite se desprende en el borde de ataque, en régimen laminar, para un ángulo de ataque mucho menor que el de C_l máximo. La capa límite pasa rápidamente a turbulenta y se adhiere, formando una burbuja pequeña, con un tamaño del orden del 1% de la cuerda del perfil. Las fuerzas y momentos globales sobre el perfil son los mismos que sin desprendimiento, y en el coeficiente de sustentación global no se percibe que haya burbuja. Cuando el ángulo de ataque crece, el desprendimiento se adelanta hacia una zona del extradós en la que la curvatura del perfil es muy grande, por lo que se complica la readherencia de la capa límite. Además, la energía del fluido que circula por el interior de la burbuja crece debido al arrastre de la corriente exterior, por lo que la presión de la corriente aguas debajo de la burbuja es incapaz de conseguir que siga recirculando. Por ello, la burbuja explota, y las fuerzas sobre el perfil varían drásticamente. El coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque cae de manera súbita, así como el coeficiente de momento, que acusa rápidamente un picado. La entrada en pérdida brusca puede desaparecer en el ala.

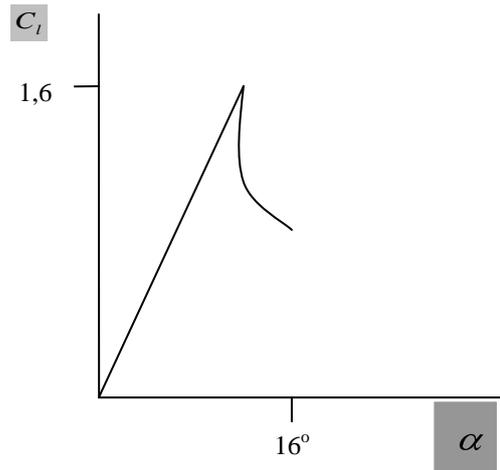


Figure 2. Entrada en pérdida de tipo B

- Tipo C: La entrada en pérdida se produce con desprendimiento cerca del borde de ataque y con la formación de una burbuja larga, lo que es característico de perfiles muy delgados con el borde de ataque redondeado. Con valores muy pequeños del ángulo de ataque se forma una burbuja de recirculación que explota para un cierto ángulo de ataque. Esta burbuja se forma porque la capa límite es muy delgada, y no debido a transición de la capa límite de laminar a turbulenta. Al desaparecer la burbuja, la capa límite pasa a turbulenta a cierta distancia del punto de desprendimiento, y se readhiere formando una burbuja larga. Al aumentar el ángulo de ataque, el lugar de readherencia se retrasa paulatinamente, hasta que llega a coincidir con el borde de salida, momento en el que se alcanza el máximo C_l . Superado este ángulo de ataque no hay readherencia.

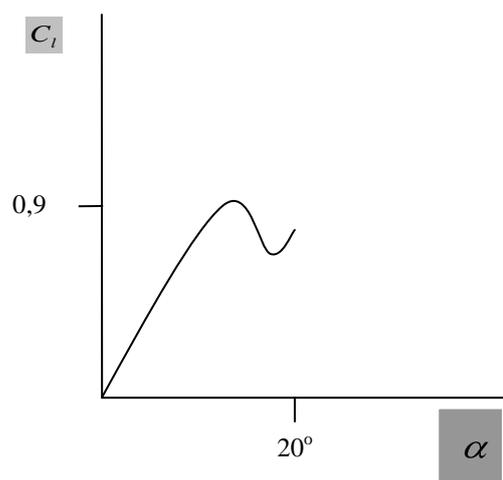


Figure 3. Entrada en pérdida de tipo C

3. La analogía con las burbujas económicas

Se trata de buscar ahora las variables equivalentes que provocan la aparición de burbujas en los distintos mercados citados, para poder sacar conclusiones análogas

sobre los efectos que provocan, a la vista de los distintos tipos de entrada en pérdida de perfiles que se han detallado.

Las fuerzas de presión (debidas al flujo exterior) junto con las fuerzas viscosas se van a convertir en las fuerzas internas que animan los mercados.

Analizando los mercados, hay muchos motivos por los que se puede crear una burbuja de tipo especulativo. El apalancamiento siempre se ha contemplado como uno de los factores principales desencadenantes de las burbujas inmobiliarias, y es muy probable que sea una de las fuerzas principales que impulsan una burbuja. Las reglas contables complejas, así como el tratamiento contable diferente que se da a las distintas entidades financieras, hacen difícil medir el apalancamiento. El apalancamiento en una economía en expansión provoca el crecimiento en los precios de los activos (inflación), lo que lleva a un aumento en el valor de los activos empleados como colaterales para lograr la financiación necesaria, por lo que también crece el nivel del crédito. Al conseguir mayores crecimientos en los beneficios de las entidades financieras, automáticamente se genera un mayor apalancamiento y aumento en los precios de los activos, y así continúa sucesivamente.

Habrán burbujas de corta duración como en la entrada en pérdida de tipo B descrita, y burbujas de larga duración como en el caso de desprendimiento de la capa límite cerca del borde de ataque (pérdida del tipo C).

Las burbujas del tipo A se producen en los mercados de deuda, bien por una exigencia de rentabilidad elevada por parte de los inversores, o bien por una subida de tipos que haga perder atractivo a las emisiones actuales, que conlleve un alza del precio del dinero (aumento de costes) .

Las burbujas de corta duración, como en la entrada en pérdida de tipo B, se producen en mercados de renta variable, como las burbujas tecnológicas (las “puntocom”).

Las burbujas de larga duración, como en el caso de desprendimiento de la capa límite cerca del borde de ataque (tipo C), se han dado en el mercado inmobiliario, y se pueden repetir en el mercado del gas mundial o en el mercado eléctrico español.

La entrada en pérdida de tipo C produce readherencia, más alejada cuanto mayor sea el ángulo de ataque, con burbuja larga, que por analogía nos lleva a pensar que un aumento de precios puede acarrear un efecto sustitución y otro efecto renta, que de inicio provoque una motivación inversora, que pronto se verá aplacada por el crecimiento en el pago de la deuda. En este caso, la renta disponible será baja, como corresponde a un perfil de espesor delgado. Vemos pues que el espesor se corresponde con la renta disponible.

Aplicando la teoría potencial linealizada de perfiles delgados, la sustentación se puede considerar que se logra mediante la superposición de dos efectos: el debido al ángulo de ataque, y el debido a la curvatura, ya que el espesor del perfil no da sustentación (ya que la parte del perfil debida al espesor resulta simétrica respecto a la cuerda).

Desde el punto de vista económico este hecho se interpreta como que la renta disponible por el inversor es pequeña en este caso (pequeños inversores en bolsa), y no la dedica a este mercado.

La curvatura del perfil delgado se puede asociar con las condiciones del mercado.

Una variable, en el estudio de perfiles, de la que rápidamente podemos deducir su análoga es el ángulo de ataque, ya que va asociada con el precio del activo o producto

en cualquier mercado, pues la elevación del precio llega un momento que produce el “crash”, de forma análoga.

La liquidez en los mercados financieros, vemos que involucra a la cantidad de movimiento que tenemos en la capa límite, y ésta es muy relevante a la hora de evitar el desprendimiento. De aquí el interés en emplear dispositivos hipersustentadores que aumentarán la cantidad de movimiento en el extradós del perfil, y que provocará un crecimiento en la fuerza sustentadora en el perfil. Una disminución del crédito implica un aumento en la viscosidad, lo que equivale a una mayor proximidad a la pared del perfil y, por tanto, más resistencia aerodinámica.

En un estudio posterior se determinarán las curvas de comportamiento de distintos mercados con el precio, que son conocidas para el caso del coeficiente de sustentación y del coeficiente de momento aerodinámicos, por lo que cabe esperar que las curvas de efectos en la inversión (curvas de coeficiente de inversión), deuda, etc. sean similares, y una vez conocido el punto de entrada en pérdida para el perfil aerodinámico se puede determinar el punto de entrada en pérdida de cada mercado.

4. Conclusiones

Si se parte de uno de los efectos observados en cualquiera de los mercados citados, como puede ser el incremento de inversiones en el mismo, aún en situaciones de crecimiento rápido de los precios, podemos llegar a determinar cuáles son las causas que lo han provocado, y si queremos aplicar nuestra analogía entre burbujas, bastará con sustituir la inversión por la fuerza de sustentación conseguida (o con su coeficiente de sustentación). Idénticamente un cambio en la actitud del mercado se podrá asociar con el momento de cabeceo-picado del perfil aerodinámico del ala (o con su momento de cabeceo-picado).

La relevancia del N° Reynolds resulta evidente. Debemos definir un valor adimensional equivalente que considere las variables económicas involucradas.

Una vez tenemos trazadas las curvas de coeficientes de sustentación y de momentos experimentales que determinan el comportamiento del perfil a distintos ángulos de ataque, para un Re determinado, podemos extrapolar sus resultados al caso de un mercado, y de esta forma adelantarnos al posible pinchazo de las burbujas, ya que no parece que éstas vayan a desaparecer de los mercados, al menos si pensamos en el caso de los mercados financieros, energéticos, etc.

Las curvas experimentales más útiles obtenidas de ensayos aerodinámicos, no son de fuerzas y momentos, sino de coeficientes de fuerza y de coeficientes de momentos, por lo que las curvas que estamos ensayando para los mercados referidos deben considerar coeficientes adimensionales de las variables que intervienen. Ésto va a permitir que saquemos conclusiones de mercados muy distintos con las mismas curvas. Además, la pendiente de estas curvas, a bajos ángulos de ataque, es conocida, y de valor 2π , lo que puede ser muy útil para determinar nuestras curvas de coeficiente de inversión.

Hay conjeturas debido a que partimos de perfiles bidimensionales en los que el Re es alto, y el Mach es pequeño. En caso de considerar perfiles tridimensionales algunos resultados se verían comprometidos. Basta con pensar en las consecuencias del torbellino residual que se genera en la punta del ala, y que modernamente se soslaya mediante el uso de “winglets”.

Dejamos para el futuro el estudio de la analogía con perfiles en alas típicamente supersónicas (Mach altos), como las alas en “delta”, que podrían aclarar comportamientos en mercados muy dinámicos.

Sería importante encontrar el equivalente a los dispositivos hipersustentadores para bajas velocidades, pues garantizarían que no se produce una súbita explosión de la burbuja. En algunos mercados ya los conocemos: inyección de liquidez, compra de deuda soberana, etc.

References

Abbott, I.H.; Von Doenhoff, A.E. (1949). *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, Inc.

Anderson, J.D. (1991). *Fundamentals of Aerodynamics*. 2nd ed. McGraw-Hill.

Anderson, J.D. (2005). *Introduction to Flight*. 5th ed. McGraw-Hill.

Brenner, R. (2003). *The Boom and the Bubble: The US in the World Economy*. Books.google.com.

Case, K.E.; Shiller, R.J. (2003). *Is There a Bubble in the Housing Market?*. Brookings Papers on Economic Activity.

Delong, B.; Shleifer, A. (1991). *The stock market bubble of 1929: Evidence from closed-end funds*. *Journal of Economic History*.

Isidoro Carmona, A. (2000). *Aerodinámica y Actuaciones del Avión*. Paraninfo.

Krainer, J. (2003). *House Price Bubbles*. Federal Reserve Bank of San Francisco Economic Letters.

Palme, H.O. (1953). *Summary of Stalling Characteristics and Maximum Lift of Wings at Low Speed*. SAAB TN 15.

Porter, D.P.; Smith, V.L. (2003). *Stock Market Bubbles in the Laboratory*. *Journal of Behavioral Finance*.

Shiller, R.J. (2000). *Measuring Bubble Expectations and Investor Confidence*. *The Journal of Psychology and Financial Markets*.

Smith, M.H. and Smith, G. (2006). *“Bubble, Bubble, Where’s the Housing Bubble?”*. Brookings Papers on Economic Activity. Department of Economics. Pomona College (CA).

Torenbeek, E.(1976). *Syntesis of subsonic airplane design*. 4th ed. Delft University Press.

Von Mises, R. (1996). *Theory of Flight*. John Wiley&Sons.