

La analogía entre burbujas de perfiles aeronáuticos y burbujas económicas

Félix Calvo Narváez

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, felix.calvo@upm.es

Carlos Rodríguez Monroy

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, crmonroy@etsii.upm.es

RESUMEN

Se sabe que hay fenómenos físicos que son explicables a la luz de otros fenómenos físicos que ya han sido bien estudiados anteriormente. Sólo en algunas ocasiones uno de estos fenómenos físicos sirve para explicar comportamientos sociales o económicos. En el caso de tratarse de un mercado de valores, la explosión de la burbuja produce una desalineación de oferta y de demanda, provocando reajustes en los precios.

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.

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.

Palabras claves: Burbujas, analogía, capa límite, desprendimiento

ABSTRACT

Some physical phenomena are explicable in the light of other physical phenomena that have been well studied previously. Sometimes, only one of these physical phenomena used to explain social or economic behavior. In the case of a securities market, the bursting of the bubble produces a misalignment of supply and demand, causing adjustments in prices.

The objective pursued is to identify the different variables involved in the physical problem, and find their equivalents for the markets under study.

One of the effects observed in any of the abovementioned markets, such as increased investment in it, even in situations of rapid price growth, we can identify the causes that have brought, and if we apply our analogy between bubbles, simply replace the investment by the lift force achieved.

Once we have traced the curves of coefficients of lift and experimental moments that determine the behavior of the profile at different angles, for a given Re , we can extrapolate their results to the case of a market, and thus pre-empt the possible outburst bubbles as they do not think that these will disappear, at least through new financial products.

Keywords: Bubbles, analogy, boundary layer, detachment

1. INTRODUCCIÓN

Se sabe que hay fenómenos físicos que son explicables a la luz de otros fenómenos físicos que ya han sido bien estudiados anteriormente. Sólo en algunas ocasiones uno de estos fenómenos físicos sirve para explicar comportamientos sociales o económicos. Este es el caso que nos ocupa, y ni siquiera 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, etc., en los que los precios se hinchan de forma desmesurada ante una fuerte demanda de esos productos.

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 países), con objeto de internalizar las externalidades de tipo medio ambiental y social (conocimiento de una tecnología avanzada de origen nacional, más empleo, menor contaminación, aumento de la capacidad de generación sin nuevas inversiones en grandes instalaciones convencionales, etc.) que no son tenidas en cuenta en el precio al que se retribuye el KWh eólico por el propio mercado, en los que la entrada en pérdida (“crash”) puede ser motivada por una decisión política de retirar esas primas de una forma inesperada.

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 ésta se pueda readherir, para 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 que la conforman (siendo g la aceleración de la gravedad) :

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

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.

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

$$Re = \rho V D / \mu$$

Los aviones normales presentan unos Re en el orden de un millón. Con estos Re , la viscosidad se aprecia sólo en una capa límite delgada, que comienza en el borde de remanso anterior que está próximo al borde de ataque, así como en la estela aguas abajo del perfil. Para que la viscosidad sea apreciable el Re debe ser pequeño (inferior a 10^6). 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 se encuentra 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 turbulenta 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.

Los tipos básicos de entrada en pérdida, a bajas velocidades y para alas rectas, atendiendo al espesor relativo (dividiendo por la cuerda) del perfil (Palme 1953, y Torenbeek 1976):

- 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 se transforma en turbulenta antes de desprenderse. Al aumentar el ángulo de ataque la capa límite en el extradós va engordando paulatinamente, hasta que para unos 10° se produce el desprendimiento en el borde de salida. Si el ángulo de ataque se hace mayor, el lugar de desprendimiento se va adelantando, de forma que la pendiente de la curva del coeficiente de sustentación con el ángulo decrece poco a poco, debido a que la succión en el borde de ataque sigue aumentando de forma muy significativa con el ángulo. 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.
- 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.

- 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.

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 especulativa. 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 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). Para la entrada en pérdida del tipo C, la formación de la burbuja se produce con bajos ángulos de ataque, que desaparece, para volverse a formar al pasar la capa límite a turbulenta, y a cierta distancia del desprendimiento se vuelve a readherir (más alejada cuanto mayor sea el ángulo de ataque) formando una burbuja larga, lo que con la analogía nos lleva a pensar que por el aumento de precios se puede llegar a producir un efecto sustitución y otro efecto renta, que inicialmente 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.

Si se intenta aplicar la teoría potencial linealizada de perfiles delgados, la sustentación se puede considerar que se logra mediante la suma de dos efectos: el debido al ángulo de ataque (que supone que el perfil es una placa plana con ángulo de ataque), y el debido a la curvatura del perfil, ya que el debido al espesor del perfil no proporciona sustentación al tratarse de un perfil simétrico respecto a la cuerda. Desde el punto de vista económico, la interpretación a este hecho es que la renta disponible por el inversor es pequeña en este caso (pequeño espesor), 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 considerando en cualquier mercado la elevación del precio del producto, llega un momento que conduce al “crash”. Así, pues, el ángulo de ataque tiene su homólogo en el precio del producto.

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, 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). Un aumento de viscosidad y la proximidad al perfil lleva aparejado un aumento de la resistencia, lo que se traduciría desde el punto de vista financiero en una disminución del crédito.

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 (al menos a través de nuevos productos financieros).

Ante la relevancia del Re , se puede intentar definir un número de Reynolds adimensional, que considere las variables económicas involucradas, si bien las conjeturas al respecto pueden ser amplias, pues estamos partiendo de perfiles bidimensionales en los que habitualmente el Re es elevado y el número de Mach es pequeño, y en cuanto se introduce la tercera dimensión del ala algunos resultados mostrados se ven seriamente comprometidos.

Hay un matiz importante acerca de las curvas experimentales que se conocen de ensayos aerodinámicos, y es que estas curvas no son de fuerza o momento, sino que son de coeficientes adimensionales de fuerza y de momentos, por lo que las curvas que estamos ensayando para nuestro mercado deben considerar también coeficientes adimensionales de variables de los mismos, lo que permitirá que estas curvas sean independientes del tipo de mercado.

REFERENCIAS

- Abbott, I.H., and 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. and Shiller, R.J. (2003). "Is There a Bubble in the Housing Market?". *Brookings Papers on Economic Activity*.
- DeLong, B. and 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". *Editorial 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., and Smith, V.L. (2003). "Stock Market Bubbles in the Laboratory". *The Journal of Psychology and Financial Markets*.
- 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). "Synthesis of subsonic airplane design", 4th ed. *Delft University Press*.
- Von Mises, R. (1996). "Theory of Flight". *John Wiley&Sons*.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editors no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.