

PLAN DE INVESTIGACIÓN

DINÁMICA Y CONTROL DE VÓRTICES EN FLUJOS CON INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA.

Juan D'Adamo.

Área del Proyecto: Ingeniería

Estado actual del conocimiento sobre el tema

El trabajo se centrará en el estudio y control de la dinámica de vórtices en flujos abiertos. Por un lado, problemas de fuerte interacción fluido estructura, como lo son el flujo alrededor de un cilindro, el flujo sobre un escalón descendente, el flujo sobre un álabe flexible, el flujo resultante del batido de alas delgadas, el flujo incidente sobre un rotor de eje vertical. Además de las aplicaciones tecnológicas directas en aerodinámica, el estudio de algunos de los flujos prototipo mencionados permite extender resultados sobre disciplinas tales como ingeniería química, geofísica, biología y ciencias de la atmósfera. La comprensión de los mecanismos físicos presentes en flujos “simples” permite un planteo de control más eficaz sobre las aplicaciones.

Concentraremos nuestros esfuerzos en el estudio de problemas con interacción fluido estructura, donde desplazamientos y deformaciones de sólidos influyen sobre las estructuras hidrodinámicas como lo son capas límite, capas de corte o de mezcla y estelas.

Flujos de Estela

En flujos con desprendimiento de la capa límite, al desarrollo de la misma sobre las superficies de los cuerpos se opone un gradiente de presión adverso. Dentro de los flujos de estela, distinguimos como flujo prototipo al flujo alrededor de un cilindro[1]. Como se observa en la Figura 1a, el patrón de velocidades incidentes se modifican por las presencia de la pared y a raíz del gradiente de presiones el flujo se separa y se establecen dos vórtices contrarrotativos en la estela. El fenómeno es estacionario, las líneas de corriente retratadas coinciden con trayectorias y líneas de emisión que también se describen como *celdas de recirculación*. El tamaño e intensidad de los vórtices varía linealmente con el número de Reynolds ($Re = UD/\nu$), en un flujo donde la difusión sigue teniendo un rol preponderante frente a la convección. La longitud que define a la configuración es el diámetro (D) del cilindro, que es la dimensión normal a la dirección del escurrimiento de velocidad U y viscosidad cinemática ν .

A partir del umbral $Re_c \simeq 46$ la configuración deja de ser estable y se produce el desprendimiento y la generación alternada de vórtices. Esta configuración se ilustra a través de líneas de emisión típicas en la Figura 1b. en un entorno del umbral de inestabilidad, $Re_c \simeq 46$, dicho *flujo medio*, semejante a la estructura descrita en la Figura 1a se corresponde con la solución estacionaria de la ecuación de Navier-Stokes. Para $Re > Re_c$, existe una diferencia entre la solución estacionaria y el promedio temporal del campo. Zielinska et al. [2] propusieron una relación no lineal entre dichos cambios y las fluctuaciones de velocidad en la estela.

En este contexto hemos contribuido y proponemos continuar líneas de investigación desde distintos enfoques.

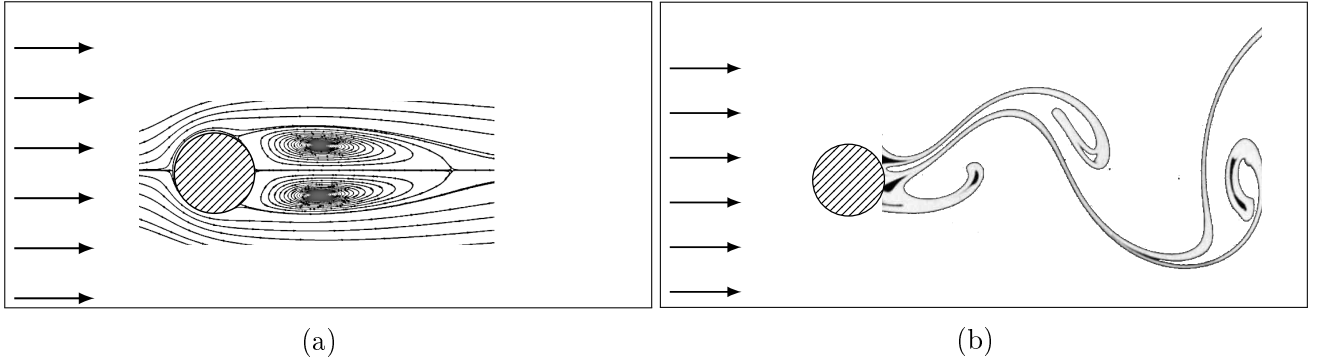


Figura 1: (a) Líneas de corriente del desprendimiento de la capa límite en flujo viscoso. (b) Visualización de la calle de vórtices de Bénard-von Kármán.

Por un lado, desde el análisis de los cambios en la estructura coherente¹ con la que se conoce a la inestabilidad de la estela: la calle de vórtices de Bénard-Von Kármán (BvK). Se la modela como un modo global [4, 5] que define espacial y temporalmente al escurrimiento. Se puede conseguir una descripción como modelo reducido alrededor del valor crítico Re_c a partir del planteo de la evolución desde la ecuación de Stuart-Landau[6, 7] que puede derivarse de métodos más generales [8, 9].

Lejos del umbral, Gallaire et al. [10] demostraron la pertinencia del modo global, confirmando estudios previos[5, 11]. En nuestro trabajo [12] extendimos el análisis a casos forzados por actuación externa, completando formalmente una propuesta de [13]. Habíamos también estudiado la acción de control mediante actuadores plasma[14] a $Re \sim 200$ y en [12] conseguimos formular un modelo a través de la ecuación de Landau que las incluye. También, en D'Adamo et al. [15], basándonos en conceptos de modelos reducidos y modos globales, aplicamos control a mayores números de Reynolds (~ 5000).

Es de notar que pueden modelarse las acciones de control a través de las modificaciones del campo medio del flujo, independientemente de cual sea su origen. Mediante control mecánico, de oscilaciones rotatorias como el que estudiamos en [16] se pueden conseguir resultados semejantes.

Para flujos de estela cuando $Re > 180$, el flujo deja de ser bidimensional abriendo posibilidades de sucesivas bifurcaciones y transiciones típicas de turbulencia. También pueden desencadenarse estos procesos a través del control, como observaban [13, 16] y confirmamos en [17], distinguiendo el modo fundamental de bifurcación asociado a una inestabilidad centrífuga.

Otro concepto relevante a la hora de caracterizar flujos de estela es el de *resonancia*. Aparece vinculado primeramente a la frecuencia dominante de una estela, la que corresponde al desprendimiento de vórtices f_{vs} dada por el número de Strouhal $St = f_{vs}D/U$. Pero aún sin desprendimiento de vórtices, existe una frecuencia que es la que corresponde a las oscilaciones globales que surgen como consecuencia de perturbaciones al flujo base, que es el campo estacionario de velocidades.

La teoría de inestabilidad hidrodinámica cuenta con numerosos antecedentes experimentales, teóricos desde el siglo XIX y principios del siglo XX, con los aportes de Kelvin, Rayleigh, Reynolds, Bénard, von Kármán y Taylor entre otros. En particular, los trabajos de Landau[18] sobre ondas en plasmas en la década de 1940 formalizaron la teoría que más tarde fue aplicada a mecánica de fluidos en distintos problemas canónicos[19–22]. Se desarrolla así el concepto de frecuencia de resonancia de un campo de velocidades, como aquella propia de una perturbación que sufre la mayor amplificación temporal o espacial. Así como existen frecuencias de pertur-

¹De su definición (ver, por ejemplo [3]), las estructuras coherentes son regiones de un escurrimiento que conservan su forma y comportamiento aún si se establecen regímenes turbulentos.

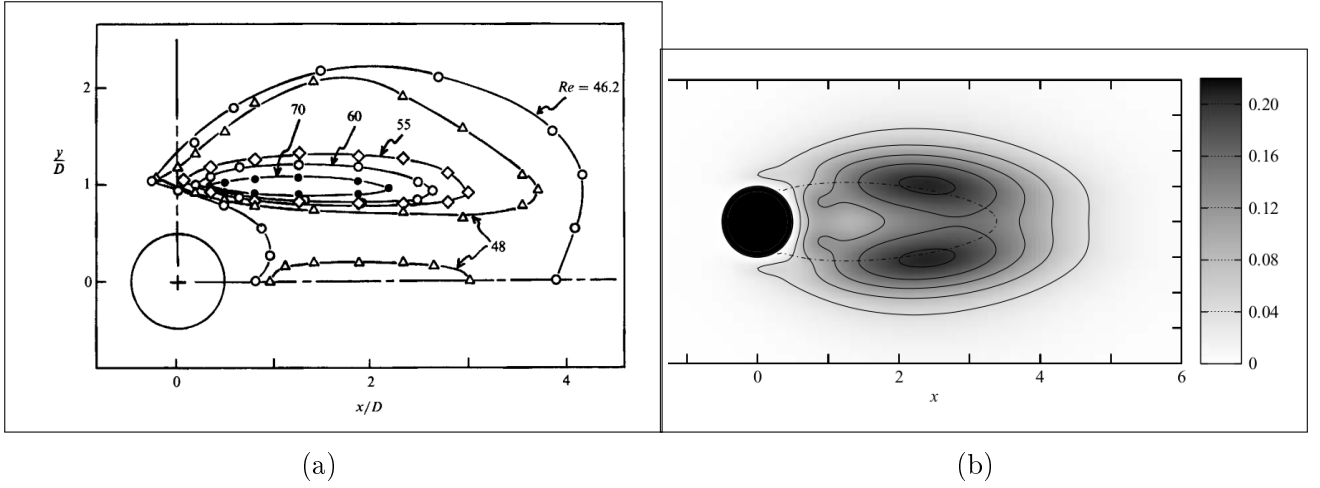


Figura 2: (a) Strykowski and Sreenivasan [23] consiguieron experimentalmente un mapa de la sensibilidad al control (b) Receptividad a las perturbaciones lineales a partir del trabajo teórico y numérico de Giannetti and Luchini [24].

baciones o números de ondas asociados, éstos definen también regiones espaciales que son más receptivas a ser perturbadas. Al respecto, el trabajo experimental de Strykowski and Sreenivasan [23] describe regiones donde el control sobre el flujo de estela es capaz de amortiguar la inestabilidad de BvK y retrasar el valor crítico de Reynolds. Más tarde, Giannetti and Luchini [24] confirmaron teóricamente a través de estudios de estabilidad lineal sus hipótesis. Ambas contribuciones se resumen e ilustran en la Figura 2.

En una reciente reseña de trabajos sobre estelas e inestabilidades, Herrmann et al. [25] extienden y evalúan la capacidad de modelos reducidos de responder en estas situaciones con resultados alentadores para el diseño de estrategias de control eficaces a mayores números de Reynolds.

Interacción fluido-estructura

Además de las estrategias de control *activo*² mencionadas, nos interesamos particularmente en problemas donde existe un fuerte acople entre la mecánica de fluidos y la de sólidos con deformaciones elásticas.

Suceden distintos grados de interacción de acuerdo a los tiempos característicos propios de cada medio. Pueden clasificarse (ver por ejemplo [26, 27]) comparando números adimensionales de cada caso y eventualmente aquellos característicos del acople. Entre estos últimos, los principales que suelen plantearse son: la velocidad reducida $U_R = U_{sol}/U_{fl}$; el número de masa $\mathcal{M} = \rho_f/\rho_s$ y el número de Cauchy $C_Y = \rho_f U_{fl}^2/E$ que se suman a los números propios de la mecánica de fluidos (típicamente, el Número de Reynolds, $Re = UL/\nu$, el número de Strouhal $St = fU/L$, etc.) y del sólido (desplazamientos relativos δ/L , deformaciones elásticas $\varepsilon = \sigma/E$, etc.).

Un caso particular de escurrimiento de estela con fuerte interacción fluido estructura es el que producen alas batientes. Estudios sobre animales voladores o nadadores de alas batientes[28, 29] han demostrado que éstos utilizan las propiedades flexibles de sus miembros para optimizar sus desplazamientos. A través de biomimetismo, se pueden volcar conceptos para el diseño en ingeniería. En este sentido, diversos trabajos[30–33] exploraron el rol de la flexibilidad y como se modifica el problema de resonancia mecánica considerando el sistema placas flexibles y fluido. Pueden distinguirse dos tipos principales de movimiento, el de cabeceo, oscilaciones

²Se distingue al control activo por ser métodos en los que se introduce energía externa a un sistema mientras que en control pasivo, la acción de control se diseña como una respuesta propia del sistema.

angulares, y agitado, oscilaciones en la dirección normal al flujo (*pitching* y *heaving* en inglés, respectivamente).

En alas batientes, el tamaño característico resulta de considerar nuevamente la dimensión normal al flujo. Si se consideran oscilaciones angulares (θ) rotatorias del tipo $\theta = \theta_0 \sin(\omega t)$, de frecuencia $f_f = \omega/2\pi$, y un largo o cuerda de ala \mathcal{C} , dicho tamaño es $A = \mathcal{C} \sin(\theta_0)$. Así, el número de Strouhal asociado es $St = f_f A/U$ y pensando en un coeficiente de propulsión³ $C_T = 2\mathcal{F}_T/(\rho U^2 A L_z)$, para alas de envergadura L_z . Aparece asociado a estos números el problema de conseguir propulsiones eficientes pensando en aplicaciones de locomoción o bien, invirtiéndolo, en mecanismos capaces de generar energía a partir de un escurrimiento.

Los criterios para lograr soluciones óptimas de propulsión de alas flexibles han sido objeto de debate en los últimos 15 años. Particularmente, a partir de una propuesta de Triantafyllou et al. [34], Moored et al. [35] relacionaron el rol de la estabilidad hidrodinámica de la estela con el forzado y la dinámica de las placas batientes que la producen. Resolviendo la ecuación de Orr-Sommerfeld en forma *local*, los autores extraen un conjunto de frecuencias y modos que se encuentran asociados a los casos de mayor eficacia de las fuerzas de propulsión. Tratándose de un experimento en agua, con $\mathcal{M} \sim 1$, a números de Reynolds *moderados*, a la inestabilidad invíscida propia del gradiente de velocidades en la estela, se suman efectos de difusión viscosa y de masas virtuales. En una publicación reciente[36], abordamos el estudio de optimización de la propulsión para placas flexibles en flujos de aire, $\mathcal{M} \ll 1$. Entre otros resultados, se observa claramente la relación entre el fenómeno de resonancia de la estela[37], de inestabilidad invíscida[38], respecto al modo de vibración elástica. Este aspecto ayudará en la elaboración de estrategias de control en la geometría y en otras más complejas como puede ser la estela de un cuerpo como asociada a la dinámica de una placa flexible propulsora.

En efecto, un aspecto que estudiaremos en profundidad será el de la reducción o el aumento de arrastre en cuerpos romos a partir del movimiento o de la reconfiguración de placas flexibles[39]. Estudios previos numéricos[40] mostraron que se pueden conseguir reducciones del orden del 50 % para la estela de un cilindro. Más recientemente, García-Baena et al. [41] mostraron resultados experimentales para más altos números de Reynolds, en vistas de la aplicación en transporte terrestre. Si bien realizan un análisis para vincular la elasticidad de la placa con reducciones de arrastre (14 %) y de fluctuaciones, quedan aspectos clave por responder y que podrían mejorar los resultados obtenidos.

Referencias

- [1] C H K Williamson and A Roshko. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *J. Fluids Struct.*, 2:355–381, 1988.
- [2] BJA Zielinska, S Goujon-Durand, J Dusek, and JE Wesfreid. Strongly nonlinear effect in unstable wakes. *Physical Review Letters*, 79(20):3893–3896, 1997.
- [3] F Hussain. Coherent structures and turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 173:303–356, 1986.
- [4] B. J. Zielinska and J.E. Wesfreid. On the spatial structure of global modes in wake flow. *Physics of Fluids*, 7(6):1418–1424, 1995.
- [5] D. Barkley. Linear analysis of the cylinder wake mean flow. *Europhys. Lett.*, 75(5):750–756, 2006.
- [6] J.T. Stuart. On the non-linear mechanics of hydrodynamic stability. *Journal of Fluid Mechanics*, 4:1–21, 1958.
- [7] M Provansal, C Mathis, and L Boyer. Bénard-von Kármán instability: transient and forced regimes. *Journal of Fluid Mechanics.*, 182(-1):1–22, 1987.
- [8] B R Noack, K Afanasiev, M Morzynski, G Tadmor, and F Thiele. A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 497(-1): 335–363, 2003.

³Es el opuesto al coeficiente de arrastre.

- [9] J D’Adamo, N. Papadakis, E. Mémin, and G Artana. Variational assimilation of pod low-order dynamical systems. *Journal of Turbulence*, 8(9):1–22, 2007. doi: 10.1080/14685240701242385. URL <http://www.informaworld.com/smpp/content?content=10.1080/14685240701242385>.
- [10] F Gallaire, E Boujo, V Mantic-Lugo, C Arratia, B Thiria, and P Meliga. Pushing amplitude equations far from threshold: application to the supercritical hopf bifurcation in the cylinder wake. *Fluid Dynamics Research*, 48(6):061401, 2016.
- [11] Denis Sipp and Anton Lebedev. Global stability of base and mean flows: a general approach and its applications to cylinder and open cavity flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 593:333–358, 2007.
- [12] S Boury, B Thiria, R Godoy-Diana, G Artana, JE Wesfreid, and J D’Adamo. Forced wakes far from threshold: Stuart-landau equation applied to experimental data. *Physical Review Fluids*, 3(9):091901, 2018.
- [13] B Thiria and J E Wesfreid. Stability properties of forced wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 579:137–161, 2007.
- [14] J D’Adamo, L M Gonzalez, A Gronskis, and G Artana. The scenario of two-dimensional instabilities of the cylinder wake under ehd forcing: A linear stability analysis,. *Fluid Dynamics Research*, 44:1–20, 2012.
- [15] J D’Adamo, L Leonardo, F Castro Hebrero, R Sosa, T. Duriez, and Artana. Circular cylinder drag reduction by three-electrode plasma symmetric forcing. *ASME J. Fluids Eng.*, 2017.
- [16] J D’Adamo, R Godoy-Diana, and J E Wesfreid. Spatio-temporal spectral analysis of a forced cylinder wake. *Physical Review E*, 84(5):1–8, 2011.
- [17] J D’Adamo, R Godoy-Diana, and J E Wesfreid. Centrifugal instabilities in crossflow: the case of a forced cylinder wake. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, physical, and engineering sciences*, 471:1–17, 2015.
- [18] L D Landau, E M Lifshitz, and L P Piatevsky. *Physical Kinetics*. Pergamon, 1981.
- [19] M Gaster. The role of spatially growing waves in the theory of hydrodynamic stability. *Progress in Aerospace Sciences*, 6:251–270, 1965.
- [20] GE Mattingly and WO Criminale. The stability of an incompressible two-dimensional wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 51(2):233–272, 1972.
- [21] Patrick Huerre and Peter A Monkewitz. Absolute and convective instabilities in free shear layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 159:151–168, 1985.
- [22] G Triantafyllou, M Triantafyllou, and C Chrysosostomidis. On the formation of vortex streets behind stationary cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 170:461–477, 1986.
- [23] PJ Strykowski and KR Sreenivasan. On the formation and suppression of vortex ‘shedding’ at low reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 218:71–107, 1990.
- [24] F Giannetti and P Luchini. Structural sensitivity of the first instability of the cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 581:167–197, 2007.
- [25] Benjamín Herrmann, Philipp Oswald, Richard Semaan, and Steven L Brunton. Modeling synchronization in forced turbulent oscillator flows. *Communications Physics*, 3(1):1–9, 2020.
- [26] M P Païdoussis, S J Price, and E De Langre. *Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities*. Cambridge University Press, 2010.
- [27] Emmanuel De Langre. *Fluides et solides*. Editions Ecole Polytechnique, 2001.
- [28] WB Dickson and MH Dickinson. The effect of advance ratio on the aerodynamics of revolving wings. *Journal of Experimental Biology*, 207(24):4269–4281, 2004.
- [29] Jon F. Harrison and Stephen P. Roberts. Flight respiration and energetics. *Annual Review of Physiology*, 62(1):179–205, 2000.
- [30] C Marais, B Thiria, J E Wesfreid, and R Godoy-Diana. Stabilizing effect of flexibility in the wake of a flapping foil. *Journal of Fluid Mechanics*, 710:659–669, 2012.
- [31] S Ramanananarivo, R Godoy-Diana, and B Thiria. Rather than resonance, flapping wing flyers may play on aerodynamics to improve performance. *Proceedings of National Academy of the United States of America*, 108 / 15:6, 2011.
- [32] P A Dewey, B M Boschitsch, K W Moored, H A Stone, and A J Smits. Scaling laws for the thrust production of flexible pitching panels. *Journal of Fluid Mechanics*, 732:29–46, 2013.

- [33] F Paraz, L Schouveiler, and C Eloy. Thrust generation by a heaving flexible foil: Resonance, nonlinearities, and optimality. *Physics of Fluids*, 28(1):011903, 2016.
- [34] MS Triantafyllou, AH Techet, Q Zhu, DN Beal, FS Hover, and DKP Yue. Vorticity control in fish-like propulsion and maneuvering. *Integrative and Comparative Biology*, 42(5):1026, 2002.
- [35] Keith W Moored, Peter A Dewey, AJ Smits, and H Haj-Hariri. Hydrodynamic wake resonance as an underlying principle of efficient unsteady propulsion. *Journal of Fluid Mechanics*, 708:329–348, 2012.
- [36] Juan D’Adamo, Manuel Collaud, R Sosa, and Ramiro Godoy-Diana. Wake and aeroelasticity of a flexible pitching foil. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022.
- [37] J. M. Chomaz. Global instabilities in spatially developing flows: non-normality and nonlinearity. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37:357–392, 2005.
- [38] François Charru. *Instabilités hydrodynamiques*. EDP sciences, 2012.
- [39] F Gosselin, E De Langre, and B A Machado-Almeida. Drag reduction of flexible plates by reconfiguration. *Journal of Fluid Mechanics*, 650:319–341, 2010.
- [40] Jing Wu, Jie Wu, and Jiapu Zhan. Characteristics of flow over a circular cylinder with two attached filaments. *Journal of Fluids and Structures*, 66:269–281, 2016.
- [41] C García-Baena, JI Jiménez-González, and C Martínez-Bazán. Drag reduction of a blunt body through reconfiguration of rear flexible plates. *Physics of Fluids*, 33(4):045102, 2021.