



## Alejandro Gronskis

Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires  
Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Marina Mercante

# Generación de condiciones frontera en simulaciones numéricas de flujos turbulentos con desenvolvimiento espacial

## Marco de referencia

En problemas de simulación numérica de flujos externos, a menudo se introducen condiciones frontera artificiales debido a la falta de datos disponibles en las fronteras libres. Se espera que la imposición de tales fronteras artificiales afecte la solución del problema en estudio de forma tal que las mismas se aproximen a situaciones de espacio libre las cuales existirían en ausencia de estas fronteras, pero a menudo esta imposición introduce reflexiones espurias que contaminan la solución del campo global. La solución más sencilla es utilizar un dominio de cálculo mucho mayor al área de estudio para que las reflexiones de los bordes no alcancen la zona de interés en el tiempo de simulación, desperdiciando de este modo recursos computacionales. Por consiguiente, resulta de fundamental importancia en la simulación numérica de flujos utilizar una condición de frontera efectiva y estable de bajo costo computacional.

A pesar del gran número de desarrollos significativos en métodos computacionales efectuados durante las

últimas décadas, un gran número de flujos industriales permanece aun con un alto grado de dificultad para adaptarse a una simulación numérica precisa debido a complejas y a menudo desconocidas condiciones frontera. Tales condiciones de borde requieren de una formalización apropiada en el campo computacional a fin de reproducir con fidelidad las principales características del flujo. Su adecuada determinación resulta de fundamental importancia cuando se procuran efectuar cálculos computacionales de flujos turbulentos no estacionarios.

En el caso de la simulación de un flujo con desenvolvimiento espacial, la especificación del campo de velocidades en la región de entrada del dominio computacional condiciona en gran medida el desenvolvimiento del flujo aguas abajo.

A fin de limitar el costo computacional asociado a las simulaciones numéricas directas (DNS) o simulaciones de gran escala (LES) de flujos con desenvolvimiento espacial, en los últimos años se han desarrollado algunas estrategias que tienen como objetivo simular únicamente la región de interés del flujo en cuestión. Surge como

consecuencia directa la necesidad de especificar correctamente en el dominio computacional todas las condiciones frontera, las cuales en la mayoría de los casos son no estacionarias. Este proceso requiere la generación apropiada de campos vectoriales que evolucionen temporalmente en concordancia con la dinámica del flujo.

## Objetivos

Hasta el presente, las estrategias propuestas en la bibliografía proceden en dos etapas consecutivas. En la primera etapa, la condición de entrada se construye a partir de datos numéricos o experimentales. A continuación, se conduce la simulación del flujo aguas abajo haciendo uso de esta información. Como consecuencia, esta segunda etapa resulta fuertemente dependiente de la primera. De esta forma, condiciones de entrada que presenten un alto nivel de ruido o se encuentren insuficientemente resueltas en tiempo o espacio pueden conducir a una incongruencia numérica o a la obtención de campos de velocidades apartados de la realidad. A fin de aliviar

esta cuestión, una solución atractiva consiste en modificar gradualmente la condición de entrada de forma tal de forzar la simulación a permanecer lo mas cercanamente posible a los datos experimentales con respecto a un criterio o restricción dados. Se trata en esencia de una estrategia de control óptimo destinada al *aprendizaje* de las condiciones de entrada a partir de medidas experimentales.

En este contexto, proponemos en nuestro estudio explorar una técnica de control óptimo –referida en la literatura como asimilación variacional de datos (VDA)– que permita la generación de condiciones iniciales y condiciones frontera en forma simultanea y sea capaz de reproducir la dinámica espacio-temporal de un flujo observado experimentalmente.

Tal asociación experimento/simulación puede considerarse no solo como un procedimiento para generar condiciones de borde realistas para una simulación numérica, sino además como una herramienta para el post-proceso de datos, donde la técnica DNS se emplea a fin de mejorar datos experimentales recuperando parte de la información que se ha perdido o deteriorado durante la etapa de medida.

## Antecedentes

El mas simple e histórico método propuesto en la bibliografía a fin de enfrentar el presente problema consiste en la imposición de adecuadas perturbaciones infinitesimales sobre un perfil medio para el flujo laminar en la sección de entrada y permitir luego la evolución del mismo hasta alcanzar un estado completamente turbulento. La principal desventaja de esta aproximación reside en la necesidad de un extenso dominio computacional requerido para que ocurra la tran-

sición al estado turbulento. Con esto, puede verse incrementado en forma dramática el costo computacional de la simulación. Consecuentemente, varios estudios (Keating et al., 2004) se dedicaron al diseño de métodos mas eficientes a fin de prescribir condiciones de flujo turbulento en la entrada con características cercanas a la realidad, las cuales presenten valores medios correctos, apropiadas correlaciones de primer y segundo grado e información espectral o de fase correcta. Estos objetivos fueron logrados corriendo un cálculo precursor independiente (Li et al., 2000) del cual se extrae el campo de velocidades dispuesto en un plano normal a la dirección del escurrimiento. La secuencia de planos obtenida se emplea en una segunda instancia como condición de entrada para la simulación principal.

A fin de evitar el costo adicional de la simulación precursora, se propuso un método de reciclaje por medio del cual se extraen datos del campo de velocidades de una sección dada y se procede a re-escalar el perfil de velocidades a fin de introducirlo en la sección de entrada del dominio (Lund et al., 1998). No obstante, este método involucra la existencia de una región en la cual las leyes de similitud permitan que los perfiles de velocidad sean re-escalados. Más aún, el efecto de periodicidad ocasionado por este procedimiento de reciclaje puede conducir a la excitación de algunos modos particulares.

Una alternativa a los métodos citados consiste en el empleo de turbulencia artificial generada a traves de números aleatorios los cuales satisfacen restricciones tales como momentos de primer y segundo orden (Lee et al., 1992). Sin embargo, las simulaciones que emplean esta aproximación requieren de una zona de adaptación aguas abajo de la sección de entrada, debido

al carácter aleatorio (no físico) de los campos de velocidades sintéticos.

Recientemente, se ha desarrollado un método (Druault et al., 2004) que permite el acople no estacionario entre una base de datos experimental obtenida a traves de mediciones por anemometría de hilo caliente (HWA) y una simulación de gran escala con desenvolvimiento espacial. Esta técnica se ha basado en el uso conjunto de la descomposición en valores ortogonales (POD) y la estimación estocástica lineal (LSE), permitiendo la reconstrucción del campo de velocidades en la grilla computacional completa de la sección de entrada empleando un número pequeño de ubicaciones para la medición experimental. Si bien este método presenta como ventaja la alta resolución temporal de las mediciones, carece de una aceptable resolución espacial debido al número limitado de sondas que es posible implementar en forma simultánea.

Más recientemente, se han extendido estos conceptos (Perret et al., 2006) al uso de una base de datos proveniente de mediciones empleando la técnica de velocímetro por imagen de partículas (PIV). Contrariamente al método previo basado en medidas HWA, la base de datos PIV presenta una resolución espacial cercana a la empleada por la grilla computacional pero requiere de un procedimiento de modelado temporal. El citado estudio ha requerido de la aproximación POD para efectuar la interpolación de los datos experimentales hacia la grilla computacional.

Si bien este método presenta un costo computacional relativamente bajo para la generación de la condición de entrada, requiere la disponibilidad de simulaciones DNS, LES o medidas experimentales a fin de calcular los modos mas energéticos del flujo, junto con un apropiado conjunto de



coeficientes de proyección dependientes del tiempo los cuales provean la información de fase.

A fin de lograr una solución que no presente reflexiones carentes de sentido físico en la frontera de salida y sea prácticamente independiente del tamaño del dominio computacional, numerosos trabajos han contribuido al desarrollo de condiciones de frontera no reflectivas. La idea básica es asegurar que cada onda que sale del dominio computacional pueda atravesar la frontera sin interactuar con la misma.

Algunos autores (Jin & Braza, 1993) emplearon una ecuación de advección-difusión para ajustarse a la ecuación de Navier-Stokes en la frontera de salida, y a través de un estudio comparativo analizaron el desempeño de esta condición no reflectiva en el problema de la transición a la turbulencia en el flujo de corte libre. Al emplear un tipo de condición frontera reflectiva, observaron que la estructura de los vórtices casi desaparece en la región cercana a la frontera de salida y se desarrolla un gradiente de presiones carente de sentido físico. Por el contrario, los vórtices se generan naturalmente y no ocurren desarrollos irregulares ni se presentan oscilaciones fuera de control en el caso de las condiciones frontera no reflectivas.

En trabajos posteriores, la mayor parte de los autores (Mittal & Balachandar, 1996; Padrino & Joseph, 2006) consideraron despreciables los efectos difusivos en la frontera de salida y trataron el flujo allí como puramente convectivo en dirección normal a la frontera.

## Actividades

Durante el año 2012 el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Marina

Mercante, conjuntamente con el Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA), ha introducido un método novedoso para la generación de condiciones frontera a ser empleadas en una simulación DNS o LES. La técnica propuesta considera principios de asimilación variacional de datos y optimización basada en el adjunto. Al modificar las condiciones iniciales y de borde del sistema, el método propuesto permite recuperar el estado de una función desconocida sobre la base de un modelo DNS y medidas perturbadas (Gronskis et al., 2011). Esta nueva aproximación ha sido aplicada, en primer lugar, sobre una base de datos sintética consistente en una simulación DNS 2D de una capa de mezcla y del flujo en la estela de un cilindro. Ambos ensayos permitieron validar la metodología en un escenario controlado y demostraron la factibilidad de la técnica propuesta. El potencial del método fue asimismo puesto a prueba en una aplicación real al emplear una base de datos consistente en una secuencia de medidas PIV del campo de vorticidad para el régimen de transición en la estela de un cilindro (Gronskis et al., 2013). En el citado trabajo, se han asumido válidas las siguientes simplificaciones:

1) Se ha definido la condición de salida a través de una ecuación de convección simplificada la cual involucra un parámetro consistente con la velocidad media de convección de las estructuras principales del escurrimiento calculada en cada paso de tiempo. Si bien algunos autores (Akselvoll & Moin, 1996) han notado que la degradación del escurrimiento impuesta por esta condición es suave y permanece confinada próxima a la región de salida, la validez de esta consideración debería ser puesta a prueba en el caso de la solución asimilada DNS.

2) A fin de efectuar el ajuste espacio-temporal de los datos experimentales a la grilla computacional, se ha empleado una combinación de técnicas de interpolación y reconstrucción de dominio con el propósito de satisfacer las condiciones frontera en los bordes laterales del dominio requeridas por la DNS.

## Metodología propuesta

La *asimilación variacional de datos* (VDA) permite estimar la trayectoria temporal de variables de estado de un sistema. Puede considerarse como un procedimiento en el cual datos perturbados y eventualmente incompletos son filtrados por un sistema dinámico. Este contexto permite el tratamiento de espacios de alta dimensión y por esta razón es intensivamente empleado en ciencias del ambiente (Le-Dimet & Talagrand, 1986) para el análisis de flujos atmosféricos. Mas precisamente, nuestro problema consiste en recuperar el estado de un sistema que obedece una ley dinámica, dadas algunas medidas (observaciones) del estado las cuales se asume disponibles únicamente en instantes discretos separados por un determinado intervalo.

## Referencias bibliográficas

- P. Druault, S. Lardeau, J. P. Bonnet, F. Coiffet, J. Delville, E. Lamballais, J.F. Largeau, L. Perret, *Generation of three-dimensional turbulent inlet conditions for large-eddy simulation*, AIAA J. 42 (2004) 447.
- A. Griewank, *Evaluating Derivatives: Principles and Techniques of Algorithmic Differentiation*, *Frontiers in Applied Mathematics*, SIAM, 2000.

- L. Hascoet, R. Greborio, V. Pascual, *Computing adjoints by automatic differentiation with tapenade*, Research report, INRIA, 2003.
- A. Keating, U. Piomelli, E. Balaras, H. J. Kaltenbach, *A priori and a posteriori tests of inflow conditions for large eddy simulation*, *Phys. Fluids* 16 (2004) 4696.
- S. Laizet, N. Li, *Incompact3d: a powerful tool to tackle turbulence problems with up to  $O(10^5)$  computational cores*, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 67 (11) (2011) 1735–1757.
- S. Laizet, E. Lamballais, *High-order compact schemes for incompressible flows: a simple and efficient method with the quasi-spectral accuracy*, *J. Comput. Phys.* 228 (16) (2009) 5989–6015.
- F. X. Le-Dimet, O. Talagrand, *Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects*, *Tellus* 38 (A) (1986) 97–110.
- J. L. Lions, *Optimal Control of Systems Governed by PDEs*, Springer-Verlag, New York, 1971.
- D. Liu, J. Nocedal, *On the limited memory BFGS method for large scale optimization*, *Math. Program., Ser. B* 45 (3) (1989) 503–528.
- T. S. Lund, X. Wu, K. D. Squires, *Generation of inflow data for spatially-developing boundary layer simulations*, *J. Comput. Phys.* 140 (1998) 233.
- N. Papadakis, E. Memin, *Variational assimilation of fluid motion from image sequences*, *SIAM J. Imaging Sci.* 1 (4) (2008) 343–363.
- L. Perret, J. Delville, R. Manceau, J. P. Bonnet, *Turbulent inflow conditions for large-eddy simulation based on low-order empirical model*, *Phys. Fluids* 20 (2008) 075107.
- M. Zdravkovich, *Flow Around Circular Cylinder - Volume 1: Fundamentals*, Oxford University Press Inc, New York, United States, 1997.
- K. Akselvoll, Moin P, 1996, *Large-Eddy Simulation of turbulent confined coannular jets*, *J. Fluid Mech.* 315, 387–411.
- A. Gronsksis, D. Heitz, E. Memin, *Inflow and Initial conditions for Direct Numerical Simulation based on Adjoint Data Assimilation*, *Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Ottawa, Canada, July 28-31, 2011.
- A. Gronsksis, D. Heitz, E. Memin, *Inflow and Initial conditions for Direct Numerical Simulation based on Adjoint Data Assimilation*, *Journal of Computational Physics* 242 (2013) 480–497.
- A. Gronsksis, C. Robinson, D. Heitz, E. Memin, *A 4DVar PIV-data assimilation for flow spatio-temporal reconstruction*, 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Delft, The Netherlands, July 1-3, 2013.