

MODELO COMPUTACIONAL DE UN CANAL DE ENSAYOS HIDRODINÁMICOS

**Alejandro Vaccari, Tomás Gorga, Julio Giménez, Yael Sanchez, Nicolás Biocca,
Santiago Urquiza**

*Grupo HydroSim, Universidad Tecnológica Nacional, U.A. Mar del Plata, Buque Pesquero Dorrego
N° 281, Mar del Plata, Argentina. hidrodinamica@mdp.utn.edu.ar*

Palabras Clave: simulación, diseño, fluidodinámica computacional, hidrodinámica naval.

Resumen. Los canales de ensayos hidrodinámicos son una de las herramientas fundamentales en ingeniería naval para el diseño y optimización de formas de buques y otros artefactos navales. El ensayo consiste en hacer circular agua a través de un modelo, simulando de esta forma el avance del buque. Operando a igualdad de número de Froude se toman mediciones de ciertos parámetros físicos para luego correlacionarlos con los del buque real. Las posibles aplicaciones de este método alcanzan diferentes ramas de la ingeniería: naval, oceanográfica, petróleo y gas, civil, entre otras. Teniendo en cuenta estas consideraciones la Universidad Tecnológica Nacional, Unidad Académica Mar del Plata, decidió el diseño y construcción de un canal de ciclo cerrado con fines didácticos. Con el objetivo de prever posibles fuentes de irregularidad del flujo en la zona de ensayos se analizan los patrones de flujo teniendo en cuenta dos disposiciones del colector de entrada, con y sin placa deflectora, a la vez que se modela la acción del panel rompevórtices en la entrada de la zona de ensayos. Consecuentemente, se trabaja con un modelo fluido-dinámico computacional por elementos finitos estabilizados para todo el canal de ensayos hidrodinámicos. El mismo comprende el canal completo considerando los colectores de entrada y salida y la zona de ensayos con gran detalle geométrico tridimensional. El efecto de la presencia del panel rompevórtices es modelado como una zona en la cual la permeabilidad del medio es convenientemente modificada para simular el flujo a través de un conjunto de pequeños conductos tipo panal de abejas. Con la simulación se procura obtener detalles del patrón de flujo, perfil de velocidades y la acción del panel de control de vórtices en la regularización del flujo y mitigación de flujos secundarios, en situación semejante a las condiciones operativas previstas. Se espera que los resultados aporten mejores criterios de decisión para el diseño, montaje, validación y uso del canal hidrodinámico.

1 INTRODUCCION

Durante el siglo pasado los canales de ensayos hidrodinámicos han sido una herramienta primordial en el diseño de embarcaciones y la optimización de formas de buques. En la actualidad, estos ensayos están siendo complementados con evaluaciones computacionales a través de simulaciones fluidodinámicas en computadoras, debido especialmente a su versatilidad y bajos costos comparativos. De todas maneras, los avances en las tecnologías de simulación no han reemplazado los ensayos experimentales, sino que se conciben como herramientas mutuamente complementarias que logran efectos sinérgicos en los procesos de diseño, mejorando el desempeño y la seguridad de las embarcaciones.

Un canal experimental se diseña procurando lograr condiciones de flujo adecuadas para ensayar modelos en una determinada zona del mismo, identificada como la sección de pruebas. Generalmente, se requiere allí un flujo con perfil de velocidad constante en el tiempo y espacialmente uniforme, aunque algunos experimentos pueden requerir diferentes condiciones de la sección de prueba. De hecho, cada experimento tendrá una caracterización específica de dicha sección, incluyendo la forma del perfil de velocidad y su regularidad, uniformidad e intensidad de la turbulencia; etc. Existen básicamente dos tipos de canales, los de remolque y los de recirculación. Estos últimos se pueden clasificar, a su vez, como canales de circuito cerrado o de circuito abierto. Cuando se requieren realizar modelos a escala reducida que reproduzcan escurrimientos incompresibles con altos números de Reynolds, los túneles de viento presentan serias dificultades debido a las elevadas velocidades necesarias en la sección de prueba. Dichos inconvenientes pueden ser parcialmente superados por el uso de agua como fluido de trabajo, dado que tiene una viscosidad cinemática un orden de magnitud menor a la del aire, permitiendo por lo tanto, reducir las velocidades operacionales en el dispositivo de ensayo. Esto lleva a que, con pocas adaptaciones, un canal de ensayos pueda emplearse para pruebas correspondientes a prototipos que operan en aire, colocando el modelo sumergido a distancia de la superficie libre para impedir los efectos de olas. Asimismo, se debe resaltar que en ensayos de buques en los que es necesario considerar los efectos de formación de olas, el agua se torna ineludible como elección de fluido operacional. Por consiguiente, con agua como fluido de ensayo, los canales de circuito cerrado son una opción natural. Esta solución proporciona un buen control de la alimentación del flujo y de los métodos de visualización y velocimetría. A pesar que los canales de recirculación requieren de potencias operativas relativamente altas, presentan las ventajas de demandar instalaciones más reducidas en porte, y poder ensayar durante lapsos de tiempo indefinidos. Para estos casos, los ensayos consisten en hacer circular un flujo de agua a través de un modelo, simulando de esta forma el avance del buque. Consistentemente, operando a igualdad de número de Froude, se toman mediciones de ciertos parámetros físicos para luego correlacionarlos con los del buque real. Las posibles aplicaciones de este método alcanzan diferentes ramas de la ingeniería: naval, oceanográfica, petróleo y gas, civil, entre otras. Teniendo en cuenta estas consideraciones la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Unidad Académica Mar del Plata decidió el diseño y construcción de un canal de ciclo cerrado con fines didácticos y científicos. Para su diseño se requiere poder anticipar la estructura de flujo fundamentalmente en la zona de ensayo donde se deben garantizar condiciones de velocidad uniforme y estable a lo largo de la duración del relevamiento. Es así que se hace necesario prever y analizar cómo las condiciones de inyección influyen en la estructura del flujo tanto en el colector de entrada como en la zona de ensayos. Un caso similar de análisis puede encontrarse en el trabajo de [Da Silva Assi \(2005\)](#), consideraciones generales en el diseño de canales y túneles pueden rastrearse en las referencias allí citadas. Para los fines mencionados se presenta aquí un modelo fluidodinámico por el método de

elementos finitos (MEF) para simular las principales características del flujo en el canal, poniendo énfasis en la regularidad del mismo en la zona de pruebas, que a su vez está determinada en gran medida, por las condiciones prevalecientes en el colector de entrada.

De esta manera se pretende contribuir a un diseño versátil que satisfaga las eventuales aplicaciones académicas y tecnológicas. En las siguientes secciones se presentará una breve descripción del proceso desarrollado y de los resultados obtenidos.

2 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS DEL CANAL HIDROSIM

En esta sección se presentan las principales características técnicas del canal denominado HidroSim-UTN (homónimo del nombre del grupo que lo desarrolló). Asimismo, se indican valores de los parámetros de diseño más relevantes. Se resalta que por simplicidad de diseño, construcción y montaje, disponibilidad de componentes, reducción de costos y aprovechamiento de espacios, se ha elegido que el sistema impulsor sea por bomba centrífuga y cañerías, en contraposición al sistema hidrodinámicamente óptimo de impulsión por hélice dispuesta en un canal inferior o lateral. Aunque el canal tiene como objetivo fundamental el ensayo y prueba de embarcaciones, puede ser utilizado para otras estructuras navales y casos de flujo externo sin formación de olas, como torpedos y vehículos.

2.1 Especificaciones de diseño

El canal HidroSim mostrado en la Fig. 1 se caracteriza por ser de ciclo cerrado, la sección de pruebas permite analizar modelos con escalas en un rango de 1:50 a 1:30, con números de Froude del orden de 0,15 y velocidades del fluido del orden de los 0,15 a 0,50 m/s. Para lograr estas velocidades en la zona de ensayo, se utiliza una bomba centrífuga de 650 m³/h y 28 kW de potencia. Siendo el fluido el que avanza sobre el modelo a ensayar, se dispone de una serie de vínculos estáticos y dinamómetros electrónicos para la toma de datos. Algunas características generales pueden observarse en la Tabla 1.

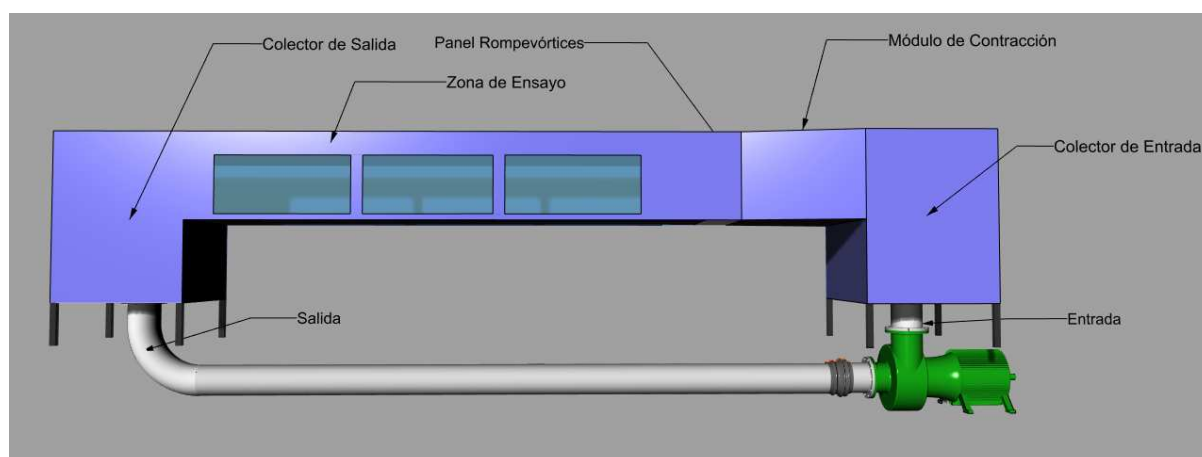


Figura 1: Modelo digital del canal de circulación.

<i>Tipo de Circuito</i>	Horizontal, ciclo cerrado
<i>Área de ensayo</i>	5700 x 1000 x 550 mm
<i>Velocidad de ensayo</i>	0,15 m/s ~ 0,50 m/s
<i>Caudal de circulación</i>	650 m ³ /h
<i>Impulsor</i>	Bomba centrífuga axial
<i>Potencia</i>	28 kW
<i>Tipo de fluido</i>	Agua dulce

Tabla 1: Especificaciones técnicas.

2.2 Características geométricas

El canal de ensayo posee una longitud total de 8,00 m de largo, un ancho de 1,00 m en la sección de ensayo y una altura máxima de 1,40 m. Está constituido básicamente de tres partes principales. En su comienzo se encuentra el colector de entrada, el módulo de contracción y el panel rompevórtices (Fig. 2), que son los encargados de dirigir el flujo hacia el sector de ensayos en forma uniforme y sin vórtices ni mayores perturbaciones. La siguiente etapa es la de pruebas, donde se encuentra un canal de 5,70 m de longitud, 1,00 m de ancho y 0,55 m de altura efectiva. Éste es el sector en donde se coloca el modelo y se realizan todas las mediciones. Posteriormente el flujo desemboca en el colector de salida. La retroalimentación del canal se realiza mediante una tubería de 10 pulgadas de diámetro.

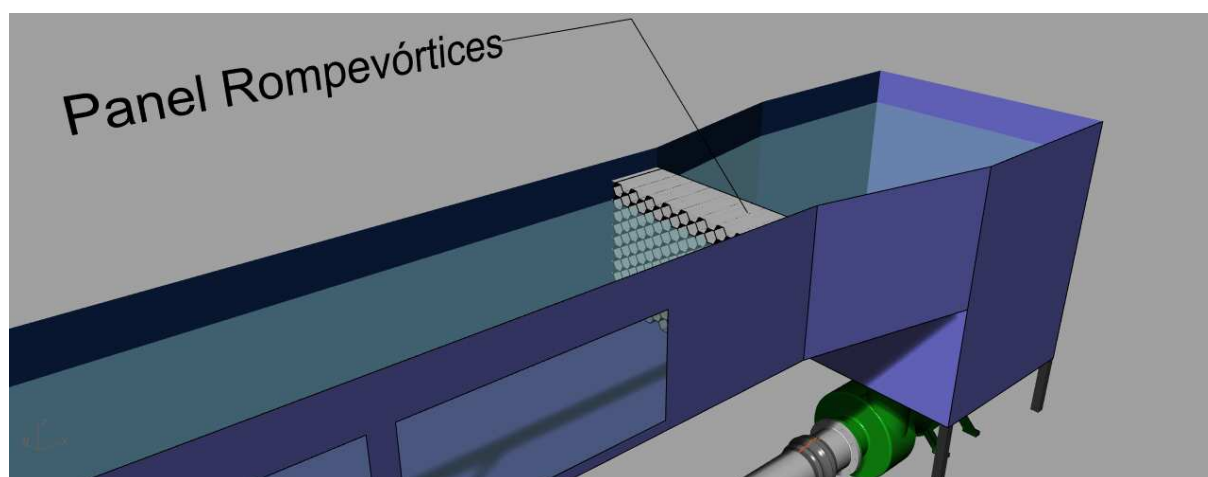


Figura 2: Detalle panel rompevórtices.

En la Fig. 3 puede observarse un croquis con las dimensiones precisas y las cotas necesarias a partir de las cuales se construyen las mallas de cálculo haciendo uso de la simetría en el plano longitudinal.

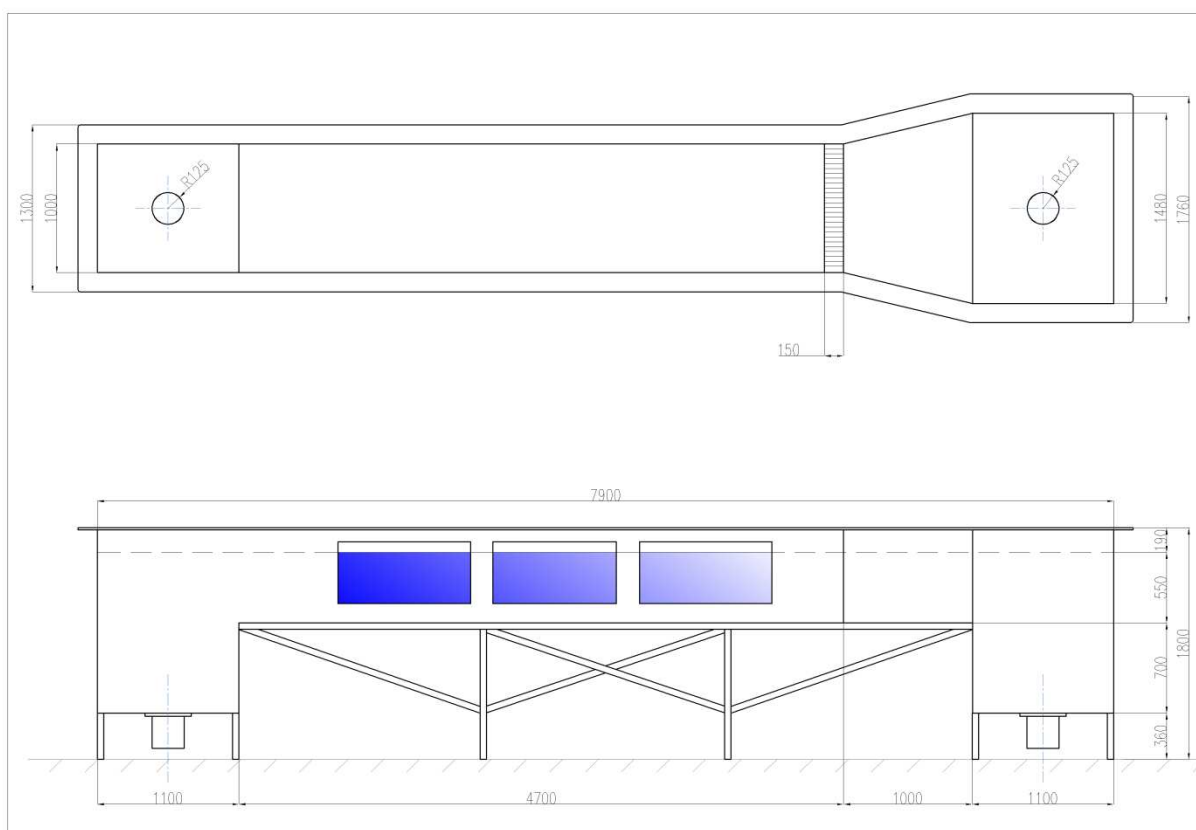


Figura 3: Croquis del canal con cotas asociadas.

3 MODELADO COMPUTACIONAL

Las simulaciones computacionales del flujo en el canal se realizaron mediante una técnica de elementos finitos estabilizados para las ecuaciones de Navier-Stokes (NS) que incluyen términos de permeabilidad. Una permeabilidad anisotrópica tipo Darcy es utilizada para simular el flujo a través del rompevórtices considerando la zona con una porosidad en la dirección del flujo correspondiente a las condiciones de flujo laminar completamente desarrollado a través de tubos de pequeño diámetro. Cabe resaltar que debido a la simetría del canal en su plano medio, las simulaciones se realizan aprovechando dicha disposición para disminuir el costo computacional de la implementación. Consistentemente, en dicho plano se asume nula la componente normal de la velocidad y condiciones de deslizamiento libre en el plano de simetría.

Con el modelado computacional se procura dar respuesta a dos interrogantes fundamentales. El primero, es responder si es posible inyectar el flujo en la base del colector de entrada observando si existe suficiente disipación para obtener velocidades en la superficie libre suficientemente bajas o es necesario interponer entre la inyección y esta última una placa deflectora. El segundo interrogante es respecto de la necesidad del uso del panel rompevórtices y su efecto en la atenuación del flujo secundario en la zona de ensayos. Por lo tanto, los casos analizados están elegidos para dar respuesta a los mismos. Asimismo, en virtud de las respuestas buscadas no se hace necesario considerar en la formulación la existencia de la superficie libre, lo que aumentaría el costo computacional innecesariamente para el nivel de detalle buscado en el presente trabajo. Por lo tanto, en la superficie superior, en contacto con el aire, se asume nula la componente normal de la velocidad tanto en el colector de entrada, como en el rompevórtices y en el canal de ensayos. Mientras que en la

superficie superior del colector de salida si impone una condición de Neumann correspondiente a tensiones nulas. Esta última condición introduce una referencia para las presiones, que de otra manera quedarían indeterminadas si todas las superficies tuvieran condiciones de Dirichlet.

3.1 Ecuaciones de gobierno

El flujo en el canal se considera gobernado por las ecuaciones de NS para fluido viscoso e incompresible, incluyendo términos de permeabilidad y turbulencia. La turbulencia es tratada con la técnica de large eddy simulation (LES), específicamente con el modelo de Smagorinsky (Smagorinsky 1963, Kato y Ikegawa 1991) para el cálculo de la viscosidad de torbellinos. Las ecuaciones diferenciales resultantes pueden escribirse como:

$$\rho (\partial \mathbf{v}_t + \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \mu \boldsymbol{\pi}^{-1} \mathbf{v} + \rho \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

Estas ecuaciones son válidas en el dominio Ω ocupado por el fluido para todo tiempo $t \in [0, T]$ con apropiadas condiciones de contorno e iniciales, siendo \mathbf{v} la velocidad del fluido, ρ la densidad del fluido, μ su viscosidad, $\boldsymbol{\pi}$ el tensor de permeabilidad y \mathbf{f} las fuerzas por unidad de masa, en general debidas a la gravedad, $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2\rho(v + v_t)\nabla^s(\mathbf{v})$ en la cual p es la presión, v, v_t son la viscosidad cinemática y la viscosidad de torbellino. Como ya fue mencionado, esta última se evalúa con la metodología de Smagorinsky (1963) y de Kato y Ikegawa (1991) para modelos LES, $v_t = 2(Cs \cdot \Delta)^2 \sqrt{2 \nabla^s(\mathbf{v}) \cdot \nabla^s(\mathbf{v})}$, $Cs=0.2$ y Δ la raíz cúbica del volumen del elemento como medida del tamaño de malla. Cabe aclarar que el tensor $\boldsymbol{\pi}$ se usa para modelar el efecto de la presencia del panel rompevórtices, como ya se ha dicho al comienzo de esta sección. Por lo tanto, en todas las demás zonas del canal $\boldsymbol{\pi}^{-1}$ se considera nulo.

Las ecuaciones (1)-(2) son reformuladas variacionalmente y discretizadas por el MEF y estabilizadas con las técnicas de streamline-upwind Petrov Galerkin (SUPG) (Hughes 1979, Brooks 1982), pressure stabilized Petrov-Galerkin (PSPG) y least squares incompressibility constraint (LSIC) (Tezduyar 1991, Tezduyar y Mittal 1992, Tezduyar y Osawa 2000), de acuerdo con lo expuesto por Battaglia (2009). Estas técnicas permiten utilizar igual orden de interpolación para velocidad y presión.

El problema discreto es resuelto en un programa de propósito general que permite implementar tanto el Método de Elementos Finitos como otros métodos como los de Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos y Elementos de Contorno, desarrollado por integrantes del grupo (Urquiza 2002, Dondero 2008) y ampliamente utilizado en otros contextos (Blanco 2016, Pereyra 2014, Blanco 2010, Blanco 2009, Larrabide 2012, Santiago 2010, Urquiza 2006).

3.2 Casos analizados

Se analizaron 3 casos típicos que pretenden arrojar luz sobre las condiciones de inyección al colector de entrada y los patrones de flujo prevalecientes en la zona de ensayo y la acción de regularización del panel rompevórtices. En todos los casos se impone una velocidad de entrada y de salida de 3m/s también se incluye la acción de la gravedad en la dirección vertical, se supone adherencia en todas las superficies de contacto con las paredes del canal, velocidad vertical nula en la superficie superior en las zonas del colector de entrada, rompevórtices y zona de pruebas, mientras que en la superficie libre del colector de salida se

asume una condición de tensión nula. Las mallas empleadas, que difieren levemente en la presencia o no del disco deflector en el colector de entrada, fueron discretizadas con elementos tetraédricos lineales con una densificación uniforme utilizando el sistema Salome (Salome project, Bergeaud et. al. 2010) y aprovechando la simetría en el plano medio. Considerando las incógnitas nodales de velocidad y presión el problema requiere resolver aproximadamente $1E6$ incógnitas. Las simulaciones fueron realizadas con un paso de tiempo de 0,01s hasta alcanzar los 20 s de simulación, tiempo para el cual se obtienen soluciones cuasiestacionarias. El primer caso se simuló también con un paso de tiempo de 0.001s llegando a la conclusión que el paso utilizado no incide en los resultados de la simulación. Se asumieron valores de densidad $\rho = 1.00E3 \frac{kg}{m^3}$ y viscosidad $\mu = 1.15E-3 Pa.s$.

El caso 1 no considera la existencia de placa deflectora en la zona de entrada del correspondiente colector. En la Fig. 4 puede observarse el mallado de la geometría de este caso. El caso 2 modela la presencia de placa deflectora. En la Fig. 5 puede observarse la malla en la zona de la placa deflectora agregada y en la Fig. 6 se muestra un detalle en la zona de la placa deflectora del colector de entrada. Ubicada a 0.35m del fondo, la placa tiene el doble de diámetro que el ducto de entrada y 3mm de espesor.

Por último el caso 3, suma al anterior la presencia de un panel rompevórtices a la entrada de la zona de ensayos modelado a través de introducir una permeabilidad anisotrópica en la dirección del canal de valor $3.125E-6 m^2$, correspondiente a flujo laminar completamente desarrollado en tubos de 1cm de diámetro. Para las direcciones transversales dicha permeabilidad es afectada por un coeficiente igual a $1,00E-3$. Por otra parte, las ejecuciones parten de condiciones iniciales nulas en velocidad.

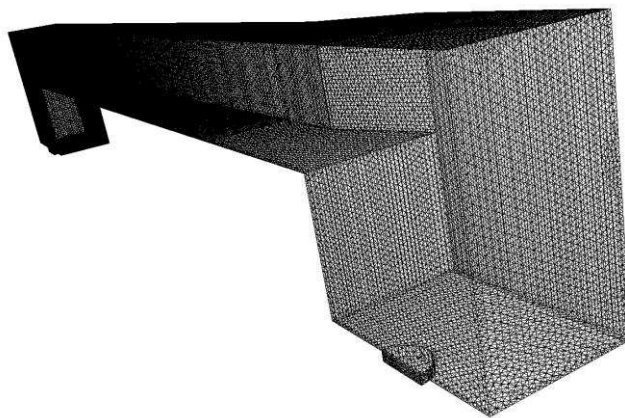


Figura 4: Malla utilizada en el caso 1.

Aunque se dispone de una versión paralelizada del programa de cálculo, en todos los casos se utilizó una versión secuencial corriendo en una máquina ultrabook Hewlett-Packard Spectre x360 Convertible 13 con Procesador Intel® Core™ i7-5500U de 2.40GHz y 8GB de memoria RAM insumiendo aproximadamente unas 30 horas de CPU para cada caso.

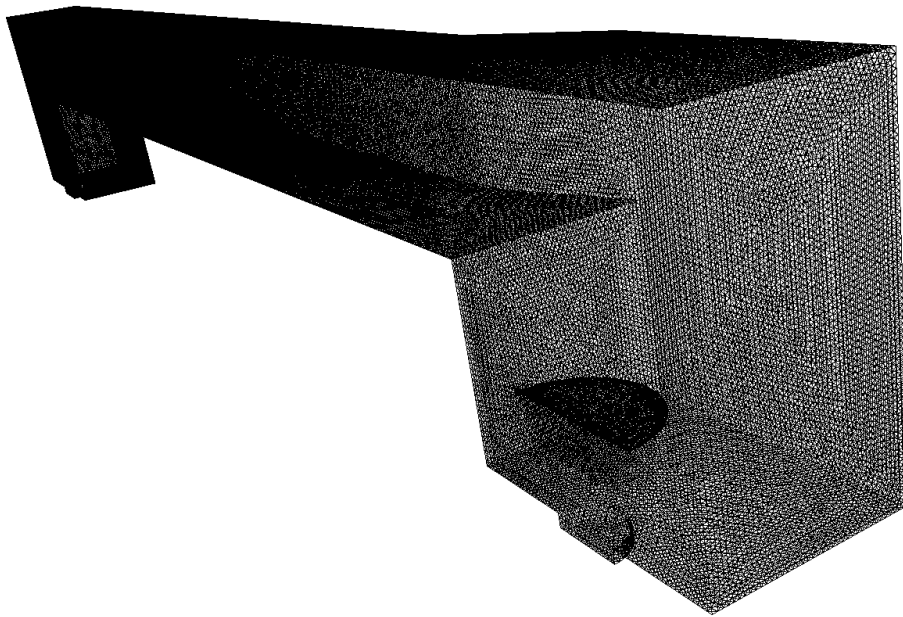


Figura 5: Malla utilizada en los casos 2 y 3.

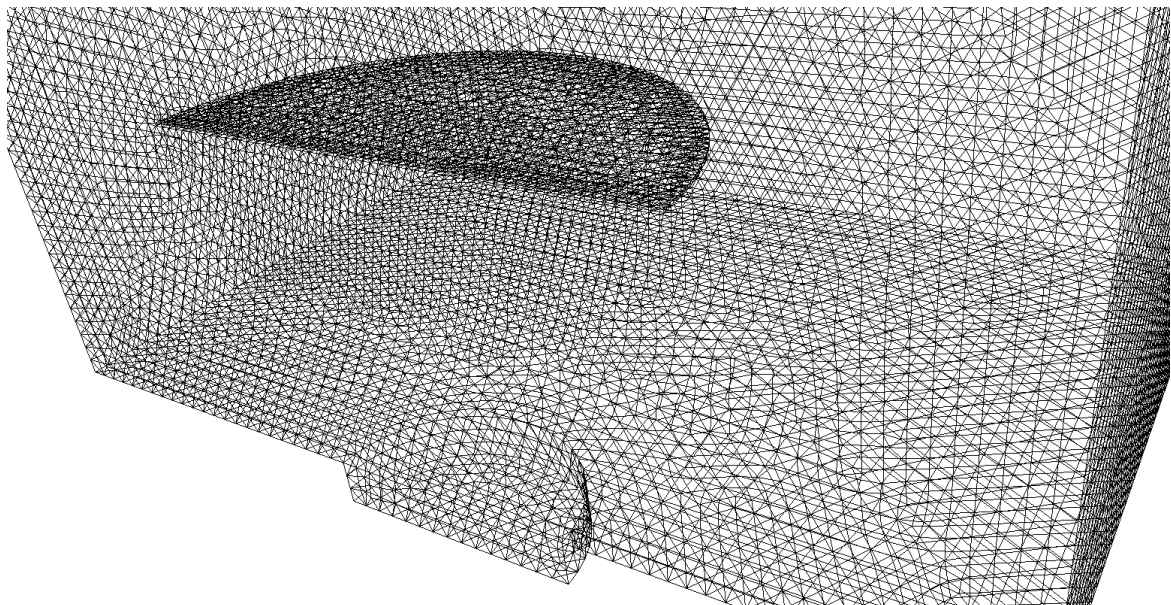


Figura 6: Detalle de la malla en la placa deflectora.

4 RESULTADOS

4.1 Caso 1

Los resultados asociados con las Fig. 7 y Fig. 8, muestran que el chorro de entrada se disipa y mezcla de manera insuficiente, alcanzando la superficie superior con valores de velocidad del orden de 4m/s que disminuyen sólo por la condición forzada de velocidad nula en la superficie superior. Asimismo se puede observar la ocurrencia de fuertes irregularidades en las líneas de corriente y fuertes flujos secundarios en la zona del canal.

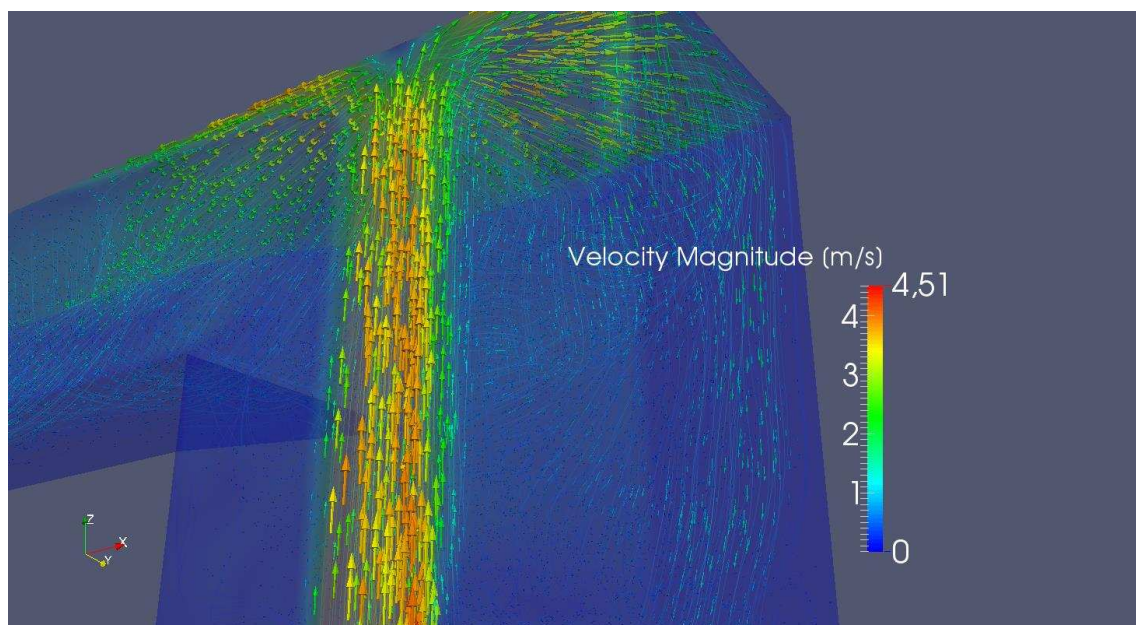


Figura 7: Caso 1. Campo de velocidades en el colector de entrada.

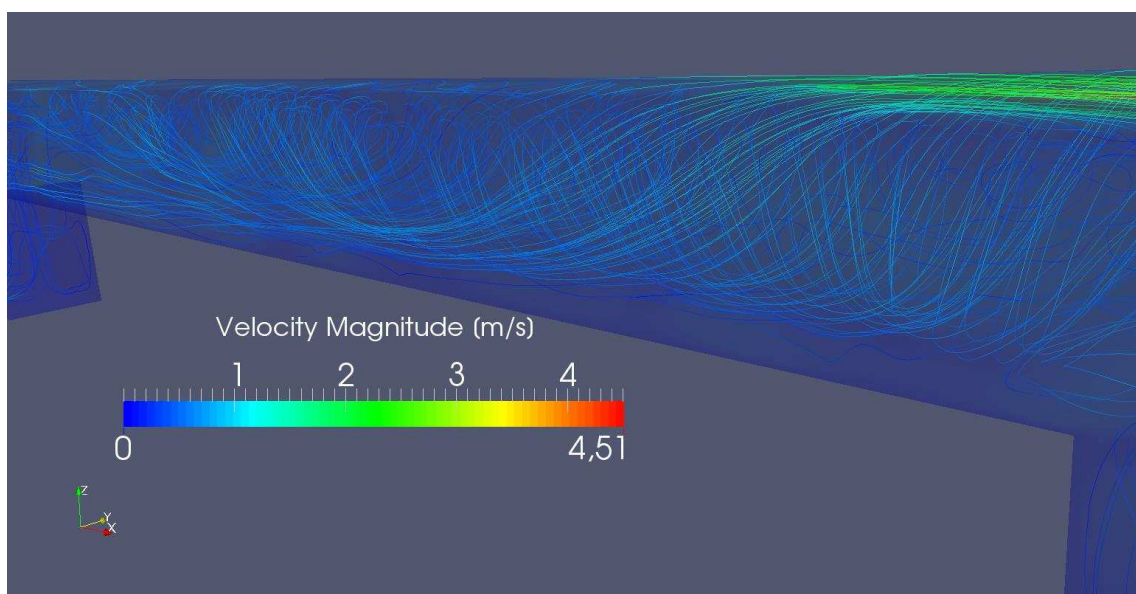


Figura 8: Caso 1. Líneas de corriente en la zona de pruebas.

4.2 Caso 2

En este caso, de acuerdo con lo observado en la Fig. 9 se grafica la acción de una placa deflectora en la zona baja del colector de entrada. Aquí puede observarse la efectividad de la misma, logrando disipar y dispersar el chorro de entrada. Aun así, de acuerdo con la Fig. 10 se observan la presencia de vórtices en el colector que generan flujos secundarios causando fuertes irregularidades que se propagan desde el colector de entrada hacia la zona de ensayos. En la Fig. 11 se pueden observar cortes transversales en la zona de prueba donde se ha graficado un índice de intensidad del flujo secundario (IFS), definido como el valor del módulo de la componente de velocidad en el plano transversal respecto del valor medio de la

componente normal. Así se tiene que $IFS = \frac{\sqrt{v_y^2 + v_z^2}}{V}$, siendo v_y, v_z las componentes transversales a la dirección principal del flujo en el canal y V el valor medio de la velocidad normal en la sección. De esta manera puede ilustrarse convenientemente el peso relativo de las componentes de velocidad en el plano perpendicular a la dirección principal del canal.

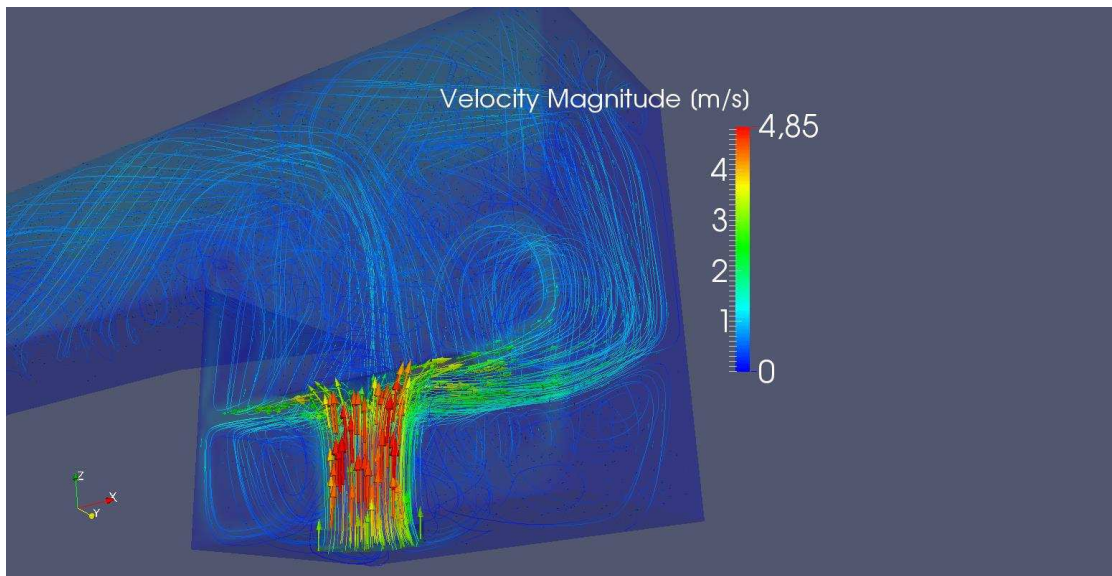


Figura 9: Caso 2. Detalle de las líneas de corriente en el colector de entrada.

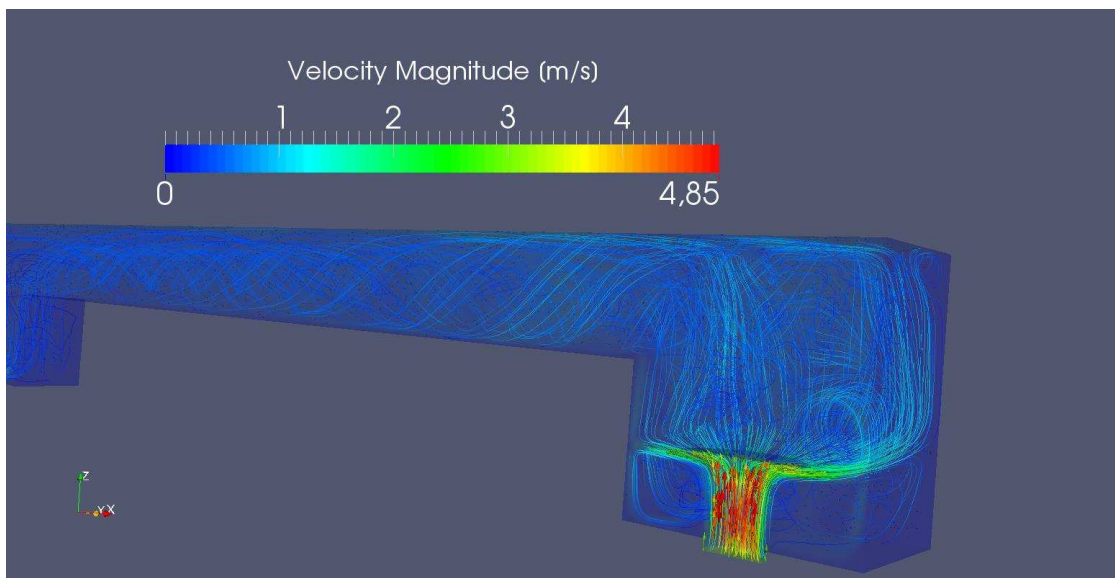


Figura 10: Caso 2. Líneas de corriente en la zona de pruebas.

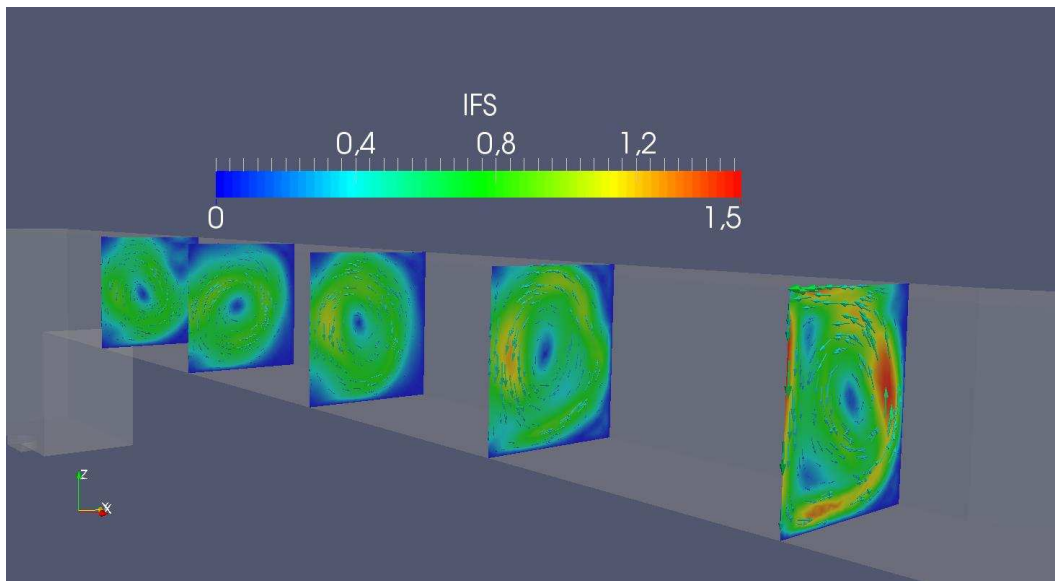


Figura 11: IFS para el caso 2.

4.3 Caso 3

El caso 3 es similar al caso 2, pero agregando la acción del panel rompevórtices. Como puede deducirse observando la Fig. 12, la acción de este panel se muestra efectiva causando que las líneas de corriente se orienten en la dirección principal del canal, mejorando sensiblemente la uniformidad del flujo en dicha zona. En la Fig. 13 se pueden observar cortes transversales en la zona de pruebas para los cuales se ha graficado el IFS. En esta figura se puede observar cuantitativamente el efecto de regularización, poniendo en evidencia una disminución apreciable del flujo secundario en dicha sección. Consecuentemente, el panel rompevórtices ejerce una acción efectiva en las características del flujo dado que su presencia resulta en una mejora respecto del caso anterior.

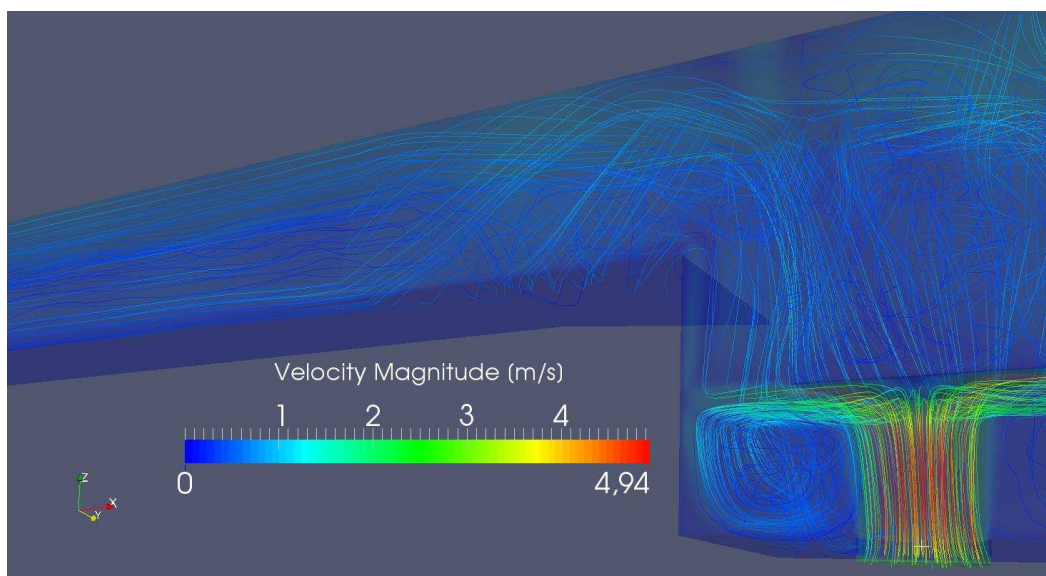


Figura 12: Caso 3. Acción regularizadora del rompevórtices sobre las líneas de corriente.

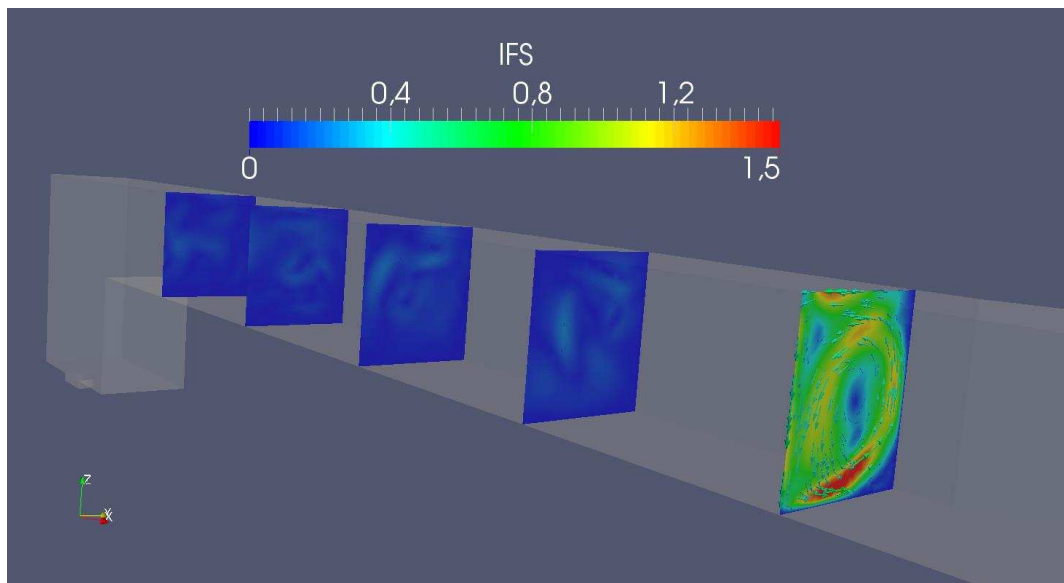


Figura 13: IFS para el caso 3.

5 CONCLUSIONES

Se realizó el modelado computacional por el MEF de las particularidades del flujo en un canal de ensayos. El mismo se ha mostrado efectivo para anticipar la estructura del flujo y ver las incidencias de la forma de inyección y de la acción de los elementos de control de flujo secundario. De los resultados de los ensayos computacionales puede concluirse que la inyección en el colector de entrada de la cañería proveniente de la bomba no puede hacerse de manera libre, siendo necesaria la implementación de elementos disipadores que dispersen el flujo disminuyendo su intensidad antes de alcanzar las zonas superiores del colector. De los resultados del caso 2, se observa que la utilización de placa deflectora, a pesar de desviar efectivamente el chorro, no lo dispersa y disipa de manera uniforme. Esto implica que para la dispersión del flujo debe utilizarse un entramado de mallas de alambre y paneles perforados o tipo panal de abejas. El caso 3 muestra la efectividad del rompevórtices para regularizar el flujo que entra en la zona de ensayos como consecuencia de la reducción del IFS respecto del caso 2. Se concluye que los resultados aquí presentados son un punto de partida para estudiar casos adicionales, procurando la configuración óptima en la zona de inyección. Para dicho objetivo se considerarán variantes como la entrada por un plano horizontal y su complementación con otros elementos dispersores como mallas de alambre y placas perforadas.

REFERENCIAS

- Blanco P.J., Ares G.D., Urquiza S.A., y Feijóo R.A. “On the effect of preload and pre-stretch on hemodynamic simulations: an integrative approach”. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, Springer, Heidelberg, ISSN: 1617-7959 (print version), ISSN: 1617-7940 (electronic version). (IF:3.15). *Biomech Model Mechanobiol* 15:593–627. 2016.
- Blanco P., Urquiza S., Feijóo R. Assessing the influence of heart rate in local hemodynamics through coupled 3D-1D-0D models. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Engng.*, Wiley; 26:890–903. 2010.

- Blanco, P.J., Pivello M. R., URQUIZA S.A. y Feijóo R.A. “On the potentialities of 3D–1D coupled models in hemodynamic simulations”, *Journal of Biomechanics*, Vol. 42: 7, 919-930. ISSN: 0021-9290, Elsevier. doi:10.1016/j.jbiomech.2009.01.034, 2009.
- Battaglia, Laura. *Elementos Finitos Estabilizados para Flujos con Superficie Libre: Seguimiento y Captura de Interfase*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 2009.
- Bergeaud, Vincent y Lefebvre, Vincent. SALOME A software integration platform for multi-physics, pre-processing and visualisation. *Proceedings of SNA + MC2010: Joint international conference on supercomputing in nuclear applications + Monte Carlo 2010* Tokyo, Japan, 43:1630-1634. 2010.
- Brooks, A. N. y Hughes, T. J. R. Streamline upwind / Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations. *Comp. Methods in Applied Mechanics Engineering*, 32(1-3):199–259, Sep 1982.
- Da Silva Ássi G., Romano Meneghini J., Penteado Aranha J., Coletto W. “Design, Assembling and Verification of a Circulating Water Channel Facility for Fluid Dynamics Experiments”. *Proceedings of COBEM 2005 18th International Congress of Mechanical Engineering*, by ABCM, November 6-11, Ouro Preto, MG, 2005.
- Dondero M., Santiago D., Urquiza S. “Un Framework Orientado a Objetos para la Implementación de Métodos Discretos”. *Alberto Cardona, Mario Storti, Carlos Zuppa.(Eds.), pp: 2959-2965, Mecánica computacional XXVII*, ISSN: 1666-6070, San Luis, Argentina, nov. de 2008.
- Hughes, T. y Brooks, A. A multi-dimensional upwind scheme with no crosswind diffusion. *Finite Element Methods for convection Dominated Flows, AMD-Vol.34, ASME*, New York 34:19–35, 1979.
- Kato, C. Ikegawa, M. Large eddy simulation of unsteady turbulent wake of a circular cylinder using the finite element method, in I. Celik, T. Kobayashi, K. Ghia, J. Kurokawa, eds., *Advances in Numerical Simulation of Turbulent Flows, FED-Vol.117, ASME*, New York, pp. 49–56, 1991.
- Larrabide, I.; Blanco P., Urquiza S., et. al. “HeMoLab - Hemodynamics Modelling Laboratory: an application for modelling the human cardiovascular system”. *Computers in Biology and Medicine*, Pergamon Press, Inc.Elmsford, NY. Vol 42:10, 993-1004, 2012.
- Pereyra S.; Lombera, G.; Frontini, G. y Urquiza, S. Sensitivity analysis and parameter estimation of heat transfer and material flow models in friction stir welding. *Materials Research. (Mat. Res.). Vol.17, n.2, pp. 397-404. ISSN 1516-1439*, Mar-Apr, 2014.
- SALOME project website, <http://www.salome-platform.org>
- Santiago D., Lombera G., Urquiza S., Agelet de Saracibar, C., Chiumenti, M. “Modelado termomecánico del proceso de “Friction Stir Welding” utilizando la geometría real de la herramienta” *RIMNE Revista Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería ISSN 0213-1315*, Spain, Vol 26:4, 293-303, 2010.
- Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99–165, 1963.
- Tezduyar, T. E. Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations. *Advances in Applied Mechanics*, 28:1–44, 1991.
- Tezduyar, T. E., Mittal, S., Ray, S. E., y Shih, R. Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear-equal-order interpolation velocity/pressure elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95(2):221–242, Marzo 1992.
- Tezduyar, T. E. y Osawa, Y. Finite element stabilization parameters computed from element matrices and vectors. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(3-4):411–430, Octubre 2000.

- Urquiza S. A., Vénere M.J. “An Application Framework Architecture For Fem And Other Related Solvers”, pp. 3099-3109, ISSN 1666-6070, *MECANICA COMPUTACIONAL Vol.XXI*, S. Idelsohn, V. Sonzogni, A. Cardona Eds., CERIDE, Sta Fe, 2002.
- Urquiza S. A., Blanco P. J., Vénere M. J., Feijóo R. A., “Multidimensional Modelling for the Carotid Artery Blood Flow”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier Sc.; Vol 195:33-36, 4002-4017, ISSN: 0045-7825, 2006.