

DESARROLLO DE UNA LIBRERÍA DE ACOPLAMIENTO PARA LA CO-SIMULACIÓN DE PROBLEMAS DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA

Marcelo F. Valdez^{a,b}, Martín. E. Pérez Segura^{c,d}, Sergio Preidikman^{d,e}

^a Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO, UNSa – CONICET),
Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina.

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP A4400FVY, Salta, Argentina.

^c Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC – CONICET), Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, CP.5016, Córdoba, Argentina

^d Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, CP.5016, Córdoba, Argentina

^e Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico at Mayagüez, Puerto Rico
Email: mvaldez@ing.unsa.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un entorno de co-simulación desarrollado en lenguaje de programación FORTRAN para la simulación, en el dominio del tiempo, de problemas de interacción fluido-estructura. La filosofía de desarrollo del entorno es particionada, es decir, este está compuesto de dos software que se ejecutan de manera independiente y cuya comunicación es coordinada mediante una librería de acoplamiento durante el tiempo real de ejecución de los mismos. Los software que conforman el entorno de co-simulación resuelven independientemente en cada paso de cálculo la dinámica del fluido y la dinámica de sólidos rígidos. El flujo del fluido se modela como levemente viscoso y dominado por vorticidad (incompresible e irrotacional en la región exterior a las capas límites y a las estelas vorticosas) y es resuelto numéricamente con el método de red de vórtices (VLM). Para los sólidos se emplea el paradigma de la dinámica de múltiples cuerpos rígidos. Las capacidades del entorno desarrollado se demuestran mediante la simulación de un problema de aeroelasticidad de una sección típica.

Palabras clave: AERODINÁMICA INESTACIONARIA, RED DE VÓRTICES, INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la captación de la energía cinética del viento para convertirla en energía mecánica o eléctrica se ha realizado casi exclusivamente mediante turbinas eólicas cuyas potencias nominales van desde algunos kilowatts hasta la decena de megawatts. Una relativamente nueva línea de investigación, llamada “cosecha de energía”, plantea la captación de la energía cinética del viento transformando en energía eléctrica las oscilaciones que dicha corriente de aire genera sobre estructuras o sistemas flexibles inmersos en ella (*flow induced vibrations*). En la práctica, estos sistemas son de muy pequeña escala, pensados como reemplazo o complemento de las baterías para la alimentación de dispositivos de bajo consumo tales como sensores inalámbricos e instrumentos de monitoreo [1,2,3]. Entre los mecanismos de transducción de la energía mecánica de las oscilaciones a energía eléctrica ha tomado especial impulso el piezoeléctrico. Menos difundidos son los de transducción electromagnética, electrostática, triboeléctrica, e híbridos.

A pesar de que la investigación en esta área ha avanzado significativamente en los últimos años, la tecnología de cosecha de energía está lejos de ser completamente confiable y madura. Uno de los principales desafíos que esta enfrenta es la baja potencia eléctrica generada (del orden de los miliWatts). Por este motivo, los investigadores han buscado distintas alternativas para maximizar la producción eléctrica de estos dispositivos. Entre ellas, se incluyen: el aprovechamiento de fenómenos aeroelásticos no lineales y el aprovechamiento de la interferencia aerodinámica constructiva.

Ciertos fenómenos de origen aeroelástico como el *flutter*, el *galloping* y las vibraciones inducidas por vórtices pueden producir vibraciones de niveles excesivos y peligrosos en estructuras civiles y aeronáuticas. Las inestabilidades de *flutter* y *galloping* se producen cuando la velocidad de la corriente de aire es tal que el amortiguamiento efectivo de la estructura se vuelve nulo. El *flutter* involucra a dos o más modos de vibración (torsión y flexión) acoplados y el *galloping* solo a un modo de vibración, ya sea torsional o flexional. Cuando la corriente en sí es fluctuante (debido a la turbulencia, por ejemplo), la inestabilidad producida por la resonancia de la estructura se conoce como *buffeting*. Cuando estas fluctuaciones son producidas por estelas o vórtices generados por otros objetos, la inestabilidad se conoce como vibraciones inducidas por vórtices.

Desde otra perspectiva completamente opuesta, la de la cosecha de energía, las inestabilidades aeroelásticas, asociados con no-linealidades estructurales y aerodinámicas, son una alternativa más que atractiva para maximizar las vibraciones de un sistema y por lo tanto, maximizar la energía eléctrica producida [4]. También, la disposición de cosechadores de energía en arreglos espaciales con una configuración que maximice el efecto multiplicativo de la interacción aerodinámica es otra alternativa para aumentar la potencia eléctrica producida por los cosechadores [5].

Para el estudio del complejo problema de interacción entre un fluido y una o varias estructura flexibles se requiere de programas especializados que sean capaces de: simular la dinámica de la estructura como resultado de las cargas producidas por la corriente fluida, simular el flujo de aire y estimar con precisión las cargas aerodinámicas sobre la estructura, y hacer interactuar ambas físicas (estructura y fluido) de manera robusta. Para el desarrollo de códigos de simulación multifísicos son posibles dos alternativas: *i*) un código monolítico que integra todas las físicas y modelos intervinientes, y *ii*) distintos códigos independientes, cada uno encargado de resolver una sola física, pero que interactúan (intercambian información) durante el tiempo de ejecución. Esta última estrategia se conoce como “co-simulación”. Cada una de estas alternativas tiene sus ventajas y desventajas. La primera producirá un código cuya ejecución será, en general, más eficiente, pero que es más complejo y con dependencias internas entre sus diferentes componentes. Esto hacen al software más difícil de mantener y actualizar. La segunda opción ofrece mayor flexibilidad, ya que al ser implementados en códigos independientes, los *solvers* pueden ser optimizados y actualizados sin afectar al resto de los componentes. En general, la co-simulación es menos eficiente que la alternativa monolítica y puede sufrir problemas de inestabilidad.

En este trabajo se presenta un entorno de co-simulación desarrollado en lenguaje FORTRAN. Esta herramienta se compone de tres software, un solver aerodinámico y un solver de dinámica de sólidos cuyos desarrollos son independientes, y una librería de acoplamiento que permite a ambos software intercambiar información la ejecución. Si bien la librería de acoplamiento no se encuentra completamente desarrollada, en este trabajo se ilustran algunas de sus capacidades mediante la simulación de un problema de aeroelasticidad de una sección alar típica con perfil van de Vooren.

EL MODELO AERODINÁMICO

En el límite teórico cuando el numero de Reynolds tiende a infinito, los espesores de las estelas generadas por los cuerpos y de las capas límite adyacentes a las superficies sólidas (regiones que concentran toda la vorticidad del flujo) tienden a cero. En este límite, dichas regiones fluidas pueden idealizarse matemáticamente como sabanas vorticosas: superficies de discontinuidad a través de las cuales la velocidad tangencial del fluido experimenta un salto finito. En la región del flujo exterior a dichas sabanas vorticosas, el flujo es irrotacional. Las ecuaciones que describen la evolución de los campos de velocidad $\mathbf{u}(\zeta, t)$ y de presión $p(\zeta, t)$ para un flujo irrotacional e incompresible se resumen a continuación [6]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla_{\mathbf{r}}^2 \Phi(\mathbf{r}, t) = 0 & \forall \mathbf{r} \in \Omega, t \in [0, \infty) \\ \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \nabla_{\mathbf{r}} \Phi(\mathbf{r}, t) & \\ p - p_{\infty} = \frac{\rho}{2} (\mathbf{u}_{\infty} \cdot \mathbf{u}_{\infty} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) - \rho \frac{\partial}{\partial t} (\Phi - \Phi_{\infty}) & \\ [\mathbf{u}(\zeta, t) - \mathbf{v}(\zeta, t)] \cdot \hat{\mathbf{n}}(\zeta, t) = 0 & \forall \zeta \in \partial \mathcal{B}, t \in [0, \infty) \\ \lim_{|\mathbf{r}| \rightarrow \infty} |\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{u}_{\infty}| = 0 & \forall t \in [0, \infty) \end{array} \right. \quad (1)$$

donde: $\Phi(r, t)$ es el potencial de velocidad, Ω es el dominio fluido, $\partial\mathcal{B}$ denota las superficies de los cuerpos $\mathcal{B}$, $v(\zeta, t)$ y $\hat{n}(\zeta, t)$ son la velocidad de la superficie y el vector unitario normal a la superficie del cuerpo, respectivamente, en el punto con vector posición ζ y $|\cdot|$ denota norma Euclidiana. El subíndice ∞ denota las condiciones de la corriente libre, no perturbada por la presencia de los cuerpos. Las últimas dos ecuaciones expresan la condición de no penetración en las superficies sólidas y la condición de regularidad del flujo.

En un punto S sobre la superficie de un cuerpo donde se produce separación de flujo, por ejemplo el borde de fuga de un ala, se impone la condición de continuidad de la presión (condición de Kutta). Para flujo no estacionario, esto implica, según la ecuación de Bernoulli, que debe emitirse vorticidad desde ese punto a razón de:

$$\left. \frac{d\Gamma}{dt} \right|_{r=\zeta_S} = \frac{(u^+)^2 - (u^-)^2}{2} \quad (2)$$

donde u^+ y u^- son las magnitudes de las velocidades relativas del flujo con respecto a la superficie del cuerpo justo por encima de las sabanas vorticosas que convergen en el punto de separación. Desde los puntos de separación emanan sabanas vorticosas libres que evolucionan y se deforman de acuerdo al campo de velocidad del flujo.

Para resolver las ecuaciones (1) y (2), se emplea el método de red de vórtices (VLM) no estacionario que permite, además de estimar las cargas aerodinámicas, describir la evolución temporal de las estelas generadas por los cuerpos inmersos en un fluido. Este método, que consiste en la discretización de las sabanas vorticosas mediante vórtices puntuales, es muy difundido en la disciplina Aerodinámica; por lo tanto, se omite su descripción y se refiere al lector interesado al libro de Katz y Plotkin [6]. El método fue implementado en un código computacional que ya fue verificado y validado en trabajos anteriores [7].

EL MODELO DE DINÁMICA DE SÓLIDOS

Los sólidos se modelan como un *sistema de cuerpos rígidos*, es decir, como una colección de cuerpos rígidos que pueden estar o no conectados por articulaciones (**Figura 1**). Una articulación se define como un vínculo cinemático (restricción) entre dos cuerpos. Esta puede imponer desde cero (cuerpo libre) hasta seis (cuerpo totalmente restringido) restricciones sobre la velocidad relativa v_J de un par de cuerpos. Las articulaciones pueden ser de tipo esféricas (restringe desplazamientos, 3 grados de libertad), de revolución (restringe desplazamientos y dos rotaciones, 1 grado de libertad), prismáticas (restringe rotaciones y desplazamientos en dos direcciones, 1 grado de libertad), de 6 grados de libertad (equivale a un cuerpo libre, sin restricciones), entre otras. Además de las articulaciones, los cuerpos pueden estar conectados entre sí o con el entorno por medio de elementos de rigidez y de amortiguamiento con comportamiento lineal o no lineal. En general, todo sistema de cuerpos rígidos debe poseer un cuerpo o base fija que se denota con $\mathcal{B}_0$.

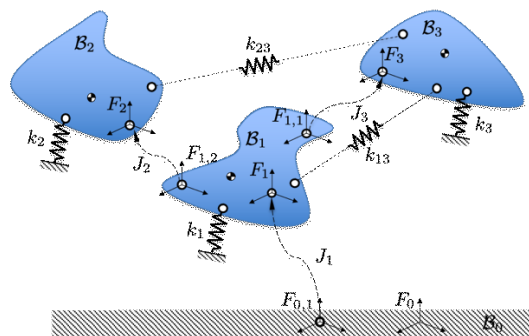


Figura 1: Representación esquemática de un sistema de cuerpos rígidos. J_i denota la articulación i , F_i y $F_{i,j}$ denotan sistemas de coordenadas del cuerpo i , y de la articulación j en el cuerpo i , respectivamente, y k indican rigideces. El sistema debe contener una base fija (cuerpo $\mathcal{B}_0$).

La ecuación de movimiento general para un sistema de cuerpos rígidos tiene la siguiente forma canónica [8]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

donde: $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$ y $\ddot{\mathbf{q}}$ son vectores de coordenadas generalizadas de posición, velocidad y aceleración, respectivamente, y $\boldsymbol{\tau}$ es el vector de fuerzas generalizadas. $\mathbf{H}$ es la matriz generalizada de inercia y $\mathbf{C}$ es la fuerza bias generalizada (el valor de $\boldsymbol{\tau}$ que produce cero aceleración).

El problema de dinámica directa (forward dynamics) consiste en el cálculo de $\ddot{\mathbf{q}}$ dado $\boldsymbol{\tau}$. Por el contrario, el problema de dinámica inversa (inverse dynamics) consiste en el cálculo de $\boldsymbol{\tau}$ dado $\ddot{\mathbf{q}}$. El problema mixto, se conoce como dinámica híbrida (hybrid dynamics). Las ecuaciones de movimiento (3) son el resultado de dos pasos principales: ensamble de las ecuaciones de movimiento individuales de cada uno de los cuerpos y la aplicación de las restricciones de movimiento adicionales. Dicho procedimiento no se realiza simbólicamente (manualmente) sino numéricamente mediante un algoritmo. El orden en que se realizan los pasos determina el procedimiento particular que se emplea y por lo tanto, el algoritmo computacional empleado para determinar el valor numérico de dichas ecuaciones.

En el código computacional desarrollado en lenguaje FORTRAN se implementaron el algoritmo recursivo de Euler-Newton para la dinámica inversa y los algoritmos de cuerpo rígido compuesto y del cuerpo rígido articulado para la dinámica directa. Estos algoritmos son descriptos por Featherstone [8]. Además, el código posee una librería con distintos modelos de articulaciones y de elementos de rigidez y amortiguamiento que puede ser fácilmente actualizada incorporando nuevos modelos.

LIBRERÍA DE ACOPLAMIENTO

Los códigos computacionales de dinámica de sólidos y de dinámica de fluidos, descriptos en las secciones anteriores fueron desarrollados y verificados de manera independiente. Para el acoplamiento entre ambos, se optó por el desarrollo de un entorno de co-simulación (simulación particionada). Para la comunicación entre ambos códigos durante el tiempo de ejecución se desarrolló, en lenguaje FORTRAN, una librería cuyos métodos deben ser invocados por ambos códigos. Todas las llamadas a dichos métodos en los códigos a acoplar se realizan en módulo especial, llamado adaptador. Por lo tanto, para cada uno de los códigos desarrollados se desarrolló un adaptador que debe ser compilado con los mismos. La filosofía de diseño de la librería de acoplamiento es similar a la del entorno preCICE [9].

La comunicación entre los procesos se establece mediante sockets IPC o TCP/IP. Estos protocolos permiten la comunicación entre procesos ejecutándose en una misma computadora, o en computadoras distintas conectadas a una red, respectivamente. Un socket es un recurso provisto por el sistema operativo que permite a los software acceder al hardware de red, por ejemplo, wifi o adaptadores ethernet, para enviar y recibir datos a través de la red [10]. Por simplicidad, en esta primera versión de la librería de acoplamiento, en lugar de interactuar con los sockets del sistema operativo directamente, se emplea lenguaje de programación de alto nivel invocando a los métodos de la librería libdill1. Libdill fue desarrollada en lenguaje C, por lo que es necesario desarrollar una interface (bindings) de Fortran a libdill recurriendo a la interoperabilidad entre ambos lenguajes. La interface de Fortran a libdill, que permite llamar a sus funciones en lenguaje C, se desarrolló de manera similar a la descripta en el capítulo 11 de [10].

La librería de acoplamiento desarrollada se configura mediante un archivo de configuración. En este archivo se definen los (códigos) participantes, los datos que se intercambian (posición, velocidad, fuerza, etc.) y los puntos o mallas sobre las cuales se intercambian dichos datos, entre otros aspectos. En el estado actual de desarrollo, el esquema de acoplamiento es paralelo, es decir, los códigos resuelven su problema simultáneamente e intercambian información al final de cada paso de tiempo (**Figura 2**). El primer código que se ejecuta, por lo general asume el rol de servidor en la conexión. El servidor realiza las siguientes tareas: i) inicializa la estructura de datos IP, ii) abre un socket en una determinada dirección IP y puerto TCP, iii) “escucha” las conexiones entrantes de los clientes, iv) una vez establecida una conexión, recibe y envía datos al cliente según corresponda, y v) cierra la conexión una vez finalizado el intercambio. El cliente, por el otro lado solicita la conexión al servidor y realiza la tarea iv anterior.

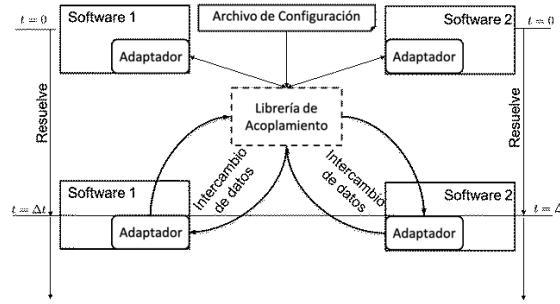


Figura 2: Esquema de acoplamiento paralelo.

AEROELASTICIDAD DE UNA SECCIÓN ALAR TÍPICA

Para ilustrar las capacidades de la herramienta de co-simulación desarrollada se estudiará el problema de aeroelasticidad de una sección alar típica mostrado en la **Figura 3**. Las ecuaciones de movimiento del sistema son las siguientes [11]:

$$m(\ddot{z} + bx_\theta\ddot{\theta}) + k_z z + c_z \dot{z} = L(\theta, \dot{\theta}, \dot{z}, t) \quad (4)$$

$$I_O\ddot{\theta} + mbx_\theta\ddot{z} + k_\theta\theta + c_\theta\dot{\theta} = M_Q(\theta, \dot{\theta}, \dot{z}, t) + L(\theta, \dot{\theta}, \dot{z}, t)((1+a) - x_Q(\theta, t))b \quad (5)$$

donde: z es la coordenada en la dirección vertical del punto pivote O , θ es el ángulo de cabeceo, L es la fuerza de sustentación aplicada en el punto Q , M_Q es el momento de cabeceo alrededor del punto Q , $x_\theta b$ es la distancia desde el centro de masa al pivote O y $x_Q b$ la distancia desde el borde de ataque hasta el punto de aplicación de la fuerza de sustentación. Por lo general, el punto Q se adopta como el centro aerodinámico de la sección de manera que M_Q no dependa de L . Las ecuaciones anteriores pueden reescribirse de la siguiente forma adimensional:

$$\sigma^2 \left(\frac{d^2\eta}{d\tau^2} + x_\theta \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \eta + 2\zeta_z \frac{d\eta}{d\tau} \right) = \frac{C_l U_\infty^2}{\mu} \quad (6)$$

$$\sigma^2 x_\theta \frac{d^2\eta}{d\tau^2} + r^2 \left(\sigma^2 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \theta + 2\zeta_\theta \frac{d\eta}{d\tau} \right) = (2C_{m_Q} + ((1+a) - x_Q) C_l) \frac{U_\infty^2}{\mu} \quad (7)$$

donde se omitieron las dependencias del C_l y del C_{m_Q} y se emplearon las siguientes definiciones:

$$\begin{aligned} C_l &:= \frac{L}{\rho_\infty b V_\infty^2} & C_{m_Q} &:= \frac{M_Q}{2\rho_\infty b^2 V_\infty^2} & \omega_z^2 &:= \frac{k_z}{m} & \omega_\theta^2 &:= \frac{k_\theta}{I_O} \\ \sigma &:= \frac{\omega_z}{\omega_\theta} & r^2 &:= \frac{I_O}{mb^2} & \mu &:= \frac{m}{\rho_\infty b^2} & U_\infty &:= \frac{V_\infty}{b\omega_\theta} \\ \tau &= t\omega_z & \eta &:= \frac{z}{b} & \zeta_z &:= \frac{c_z}{2m\omega_z} & \zeta_\theta &:= \frac{c_\theta}{2I_O\omega_\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

Se observa que las ecuaciones de movimiento para η y θ son acopladas cuando $x_\theta \neq 0$ y por la presencia del fluido.

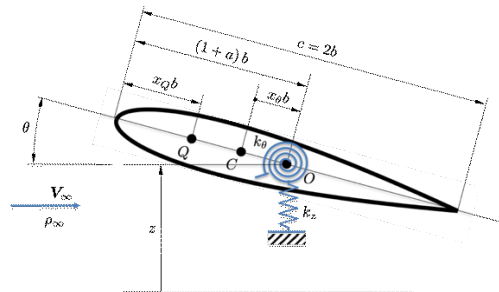


Figura 3: Representación esquemática de una sección típica.

RESULTADOS

Para la sección típica alar se empleará un perfil van de Vooren ([6], sec. 6.6). Para el ejemplo numérico se eligen los siguientes valores: $a = -1/5$, $x_\theta = 0$, $\mu = 20\pi$, $r^2 = 6/25$, $\sigma = 2/5$, $\zeta_\theta = 0$, $\zeta_z = 0$, $\rho_\infty = 1\text{kg/m}^3$,

$\omega_z = 1$ rad/s y $b = 0,5$ m. La red de vórtices que discretiza la sábana vorticosa adherida al perfil contiene $N = 32$ vórtices y se adopta un paso de tiempo $\Delta t V_\infty / c = 0,01351$. Este paso de tiempo garantiza la convergencia del método de red de vórtices.

En las **Figura 4**, **Figura 5** y **Figura 6** se muestra la evolución temporal de la coordenada z y del ángulo de cabeceo θ para distintas velocidades (no dimensionales) U_∞ de la corriente libre. Como era esperado por el valor elegido de $x_\theta = 0$, se observa que en ausencia del fluido los modos del sistema (desplazamiento vertical y cabeceo) están perfectamente desacoplados. En presencia de la corriente fluida, las cargas aerodinámicas generadas sobre el perfil van de Vooren producen el acoplamiento de los modos de vibración del sistema. Esto puede apreciarse en los diagramas de respuesta en frecuencia (obtenidos mediante el algoritmo *Fast Fourier Transform*) que muestran que el desplazamiento z posee una componente de frecuencia correspondiente a la frecuencia natural del cabeceo. Además del acoplamiento, el fluido introduce “amortiguamiento” al sistema cuyo valor y signo depende de la velocidad del flujo. Para las velocidades $U_\infty < 0,8$ se observa un amortiguamiento positivo de ambos grados de libertad del sistema, es decir, el fluido extrae energía del cuerpo y finalmente provoca que las oscilaciones se amortigüen completamente. Para velocidades $U_\infty \geq 0,96$ se observa que la amplitud de las oscilaciones de cabeceo es creciente con cada ciclo, es decir, diverge con el tiempo. Sin embargo, el movimiento vertical del perfil continua siendo amortiguado. Como se observa en el diagrama de respuesta en frecuencia del sistema para $U_\infty = 0,96$, la respuesta predominante del sistema ocurre a la misma frecuencia, lo cual es característico del estado postcrítico de *flutter*. Se hace notar, sin embargo, que en el presente trabajo no se realizó un análisis detallado para obtener la velocidad crítica de *flutter* ni la curva de *flutter* del sistema ya que el objetivo del trabajo es demostrar el funcionamiento de la herramienta de acoplamiento desarrollada.

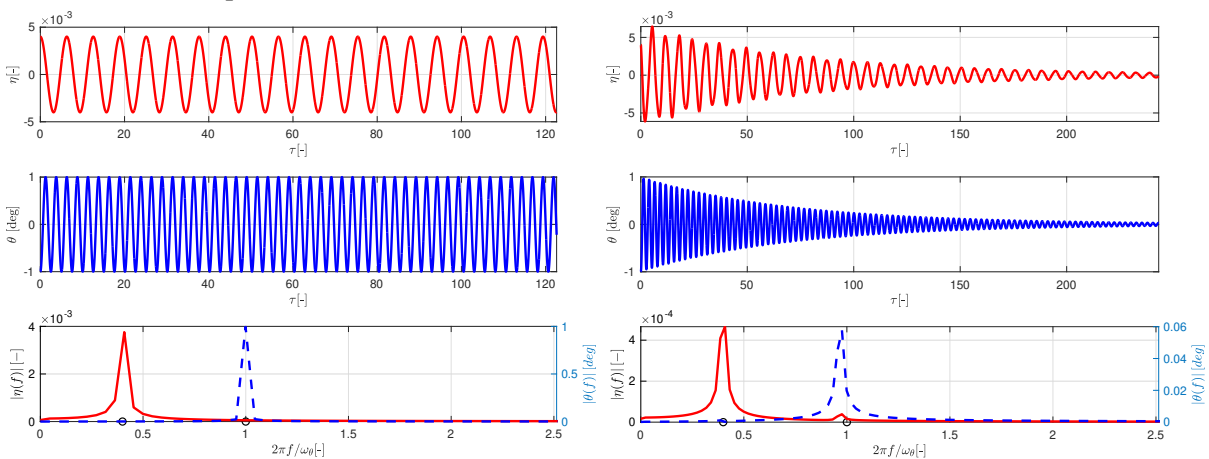


Figura 4: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: sistema sin interacción fluido-estructura. Derecha: Respuesta del sistema para $U_\infty = 0,4$.

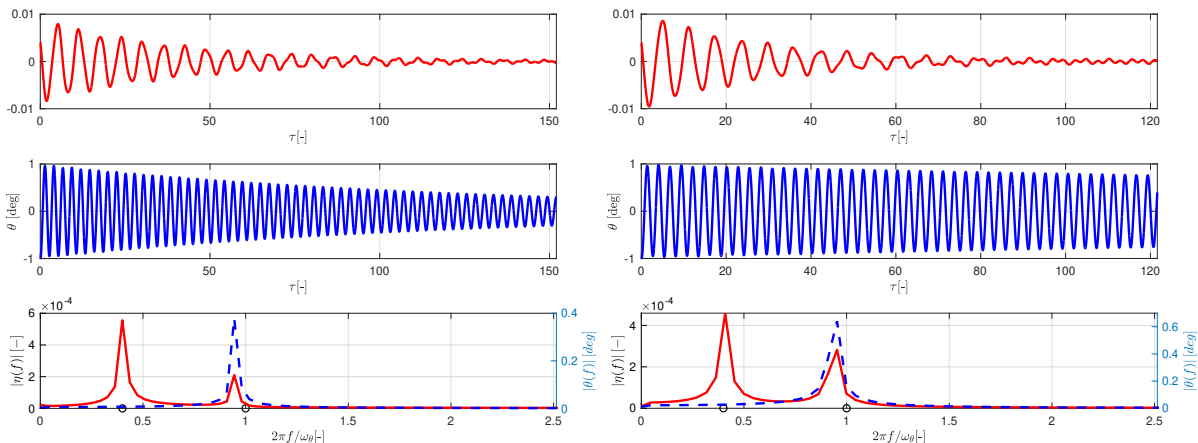


Figura 5: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: Respuesta del sistema para $U_\infty = 0,64$. Derecha: Respuesta del sistema para $U_\infty = 0,8$.

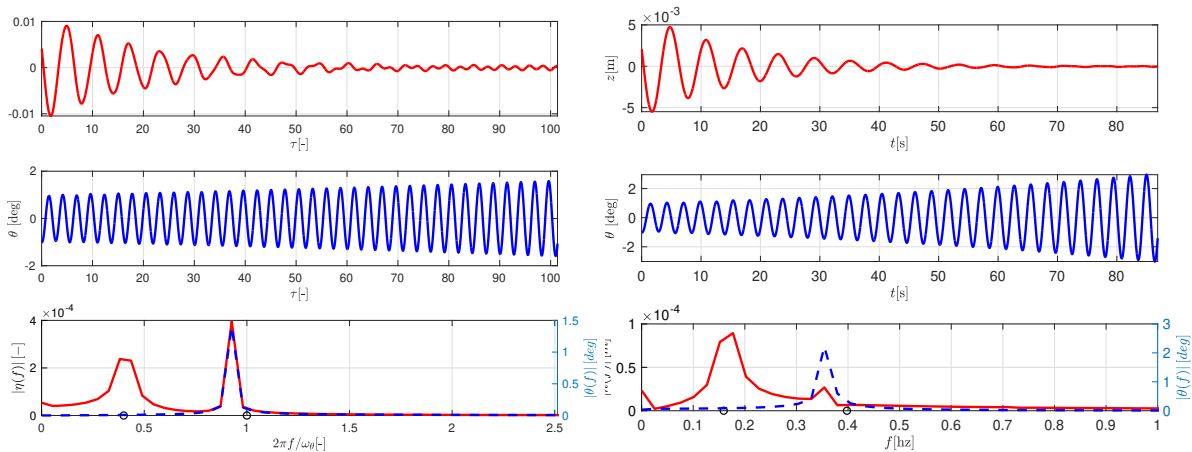


Figura 6: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 0,96$. Derecha: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 1,12$.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó una herramienta de co-simulación para el estudio de problemas de interacción fluido estructura. La herramienta computacional, que aún está en estado desarrollo, tiene tres componentes: dos *solvers*, uno para la simulación de la aerodinámica no estacionaria bidimensional alrededor de cuerpos de forma arbitraria y el otro para la simulación de dinámica de sistemas de cuerpos rígidos articulados, y una librería de acoplamiento para comunicar e intercambiar información entre dichos *solvers* durante el tiempo de simulación. Todos los códigos fueron escritos en lenguaje de programación FORTRAN. La librería de acoplamiento fue desarrollada de manera general, lo que permite, en principio, acoplar otros códigos, siempre y cuando se construya para los mismos un adaptador adecuado y se disponga de rutinas que permitan extraer los datos de la simulación. El funcionamiento de la herramienta compuesta fue ilustrado mediante un ejemplo de aeroelasticidad de una sección típica con el perfil alar van de Vooren. El ejemplo empleado tiene aplicaciones para la cosecha de energía eólica donde se busca inducir la respuesta de *flutter* de la estructura de manera de lograr oscilaciones autosostenidas que puedan transformarse en energía eléctrica mediante dispositivos piezoeléctricos, electromagnéticos, entre otros. En trabajos futuros se abordará la validación de la herramienta de co-simulación empleando resultados experimentales disponibles en la literatura o de simulaciones computacionales de alta fidelidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo y financiación del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) a través del proyecto CIUNSa Tipo C N°2853/0 y del FONCyT a través del proyecto PICT-2020-Serie A-00662.

REFERENCIAS

- [1] Q. Wen, X. He, Z. Lu, R. Streiter, and T. Otto, "A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters," *Nano Materials Science*, vol. 3, no. 2, pp. 170–185, 2021, doi: 10.1016/j.nanoms.2021.04.001.
- [2] X. Ma and S. Zhou, "A review of flow-induced vibration energy harvesters," *Energy Convers Manag*, vol. 254, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115223.
- [3] X. Zheng, L. He, S. Wang, X. Liu, R. Liu, and G. Cheng, "A review of piezoelectric energy harvesters for harvesting wind energy," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 352. Elsevier B.V., Apr. 01, 2023. doi: 10.1016/j.sna.2023.114190.

- [4] A. Erturk, W. G. R. Vieira, C. De Marqui, and D. J. Inman, “On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems,” *Appl Phys Lett*, vol. 96, no. 18, 2010, doi: 10.1063/1.3427405.
- [5] E. Beltramo, M. E. Pérez Segura, B. A. Roccia, M. F. Valdez, M. L. Verstraete, and S. Preidikman, “Constructive aerodynamic interference in a network of weakly coupled flutter-based energy harvesters,” *Aerospace*, vol. 7, no. 12, 2020. doi: 10.3390/aerospace7120167.
- [6] J. Katz and A. Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics, Second Edition*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2001. doi: 10.1115/1.1669432.
- [7] M. F. Valdez, S. Ribero, and S. Preidikman, “Estudio aerodinámico de perfiles no delgados con el método de red de vórtices,” *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, vol. 8, no. 1, pp. 15–30, 2021.
- [8] R. Featherstone, *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Springer, 2008.
- [9] G. Chourdakis *et al.*, “preCICE v2: A sustainable and user-friendly coupling library,” *Open Research Europe*, vol. 2, p. 51, Apr. 2022, doi: 10.12688/openreseurope.14445.1.
- [10] M. Curcic, *Modern Fortran Building Efficient Parallel Applications*. Manning, 2020.
- [11] D. H. Hodges and G. A. Pierce, *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. doi: 10.1017/CBO9780511997112.