

HERRAMIENTA DE CO-SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN COSECHADORES DE ENERGÍA EÓLICA

CO-SIMULATION TOOL FOR THE STUDY OF THE FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN WIND ENERGY HARVESTERS

Marcelo F. Valdez^{a,b}, Silvana E. Flores Larsen^a y Sergio Preidikman^c

^a*Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa)-CONICET, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina*

^b*Facultad de Ingeniería, UNSa, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, mfvaldez82@gmail.com*

^c*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Universidad Nacional de Córdoba-CONICET, Av. Velez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina*

Palabras clave: Aerodinámica inestacionaria, red de vórtices, Aeroelasticidad, FORTRAN.

Resumen. En este artículo se presenta una herramienta de co-simulación desarrollada en lenguaje de programación FORTRAN para la simulación, en el dominio del tiempo, de problemas de interacción fluido-estructura. La herramienta numérica es particionada; está compuesta de tres códigos computacionales independientes: uno para la simulación de la dinámica del fluido, otro para la simulación de la dinámica de sólidos y una librería-interface que se encarga de la comunicación entre ambos códigos. El flujo 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 la dinámica de sólidos se emplea el modelo de múltiples cuerpos rígidos. Estos cuerpos pueden estar vinculados entre sí y con el entorno por medio de articulaciones y de elementos de rigidez y amortiguamiento. Las capacidades de la herramienta desarrollada se ilustran mediante la simulación de un problema de aeroelasticidad de una sección típica.

Keywords: Unsteady aerodynamics, vortex lattice, Aeroelasticity, FORTRAN.

Abstract. In this article, a computational co-simulation tool developed in FORTRAN for the time-domain simulation of fluid-structure interaction problems is presented. The numerical tool is partitioned; it is composed of three independent computational codes: one for the simulation of the fluid dynamics, other for the simulation of the solid dynamics and a library-interface that handles de communication between both codes. The flow is modeled as slightly-viscous and dominated by vorticity (incompressible and irrotational in the region outside the boundary layers and the vortical wakes) and solved numerically through the vortex lattice method (VLM). For the solid dynamics, a multi-rigid body model is employed. The bodies can be linked together and with the environment through different types of joints and stiffness and damping elements. The capabilities of the developed tool are shown through the simulation of the aeroelasticity of a typical wind section.

1. INTRODUCCIÓN

Los cosechadores de energía son dispositivos que recolectan la energía del ambiente para transformarla en energía eléctrica. Entre los que aprovechan la energía cinética del viento hay dos grandes categorías: aerogeneradores con partes rotantes y cosechadores sin partes móviles que aprovechan las vibraciones inducidas por el flujo (He et al., 2018). Los dispositivos miniaturizados de cosecha de energía del viento han atraído la atención de numerosos investigadores debido a su gran potencial de densidad de potencia y por la gran disponibilidad de energía del viento en muchas áreas de aplicación (Wen et al., 2021). En la actualidad, las aplicaciones prácticas de este tipo de dispositivos cosechadores se limitan a la alimentación de sensores inalámbricos y otros instrumentos de monitoreo de bajo consumo. En muchos casos, estos dispositivos pueden reemplazar a las baterías o recargarlas, principalmente cuando estas se sitúan en lugares de difícil acceso.

Para maximizar la energía extraída del flujo a velocidades relativamente bajas, los cosechadores necesitan explotar algunos de los fenómenos o inestabilidades aeroelásticas tales como las vibraciones inducidas por vórtices (VIV), el *galloping*, el *flutter*, entre otros.

A pesar de la gran cantidad de investigaciones realizadas a la fecha, las potencias eléctricas que estos dispositivos pueden suministrar son demasiado pequeñas (del orden de los miliWatts) para considerarse una tecnología madura. Para subsanar esta deficiencia, algunos investigadores han propuesto diferentes alternativas para aumentar la potencia neta generada por los cosechadores. Por ejemplo, Zhang et al. (2017) exploró el impacto de la forma del cuerpo obstáculo generador de vórtices y del espaciamiento del cuerpo cosechador corriente abajo. Hobbs y Hu (2012) propusieron un arreglo de cosechadores inspirados por los troncos de los árboles agitando por el viento y obtuvieron un valor pico de potencia generada para un espaciamiento particular de los cosechadores. Beltramo et al. (2020) propusieron el aprovechamiento de la interferencia aerodinámica constructiva entre cosechadores basados en flutter para mejorar las capacidades del sistema (disminuir la velocidad de arranque y aumentar la potencia generada).

Para el estudio y entendimiento de los fenómenos aeroelásticos en los sistemas cosechadores de energía y para analizar el impacto de los distintos parámetros de diseño sobre la potencia generada son necesarias herramientas computacionales que resuelvan simultáneamente las ecuaciones de movimiento del fluido (aire) y de la estructura, es decir, es necesario un esquema de co-simulación. En este trabajo se presenta una herramienta de co-simulación desarrollada en lenguaje FORTRAN. Esta herramienta se compone de tres software, un *solver* aerodinámico y un *solver* de dinámica de sólidos que fueron desarrollos de manera independiente, y una librería de acoplamiento que permite a ambos software intercambiar información de manera colaborativa durante su 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.

2. EL MODELO AERODINÁMICO

En el límite teórico cuando el número 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 sábanas 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 sábanas vorticosas, el flujo es irrotacional. Las ecuaciones que describen la evolución de los campos de velocidad $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ y de presión $p(\mathbf{r}, t)$

para un flujo irrotacional e incompresible se resumen a continuación (Katz y Plotkin, 2001):

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

donde: $\Phi(\mathbf{r}, t)$ es el potencial de velocidad, Ω es el dominio fluido, $\partial \mathcal{B}$ denota las superficies de los cuerpos \mathcal{B} , $\mathbf{v}(\boldsymbol{\zeta}, t)$ y $\hat{\mathbf{n}}(\boldsymbol{\zeta}, t)$ son la velocidad de la superficie y el vector unitario normal a la superficie del cuerpo, respectivamente, en el punto con vector posición $\boldsymbol{\zeta}$ y $|\cdot|$ denota norma Euclídeana. 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:

$$\left. \frac{d\Gamma}{dt} \right|_{\mathbf{r}=\boldsymbol{\zeta}_S} = \frac{(u^+)^2 - (u^-)^2}{2}, \quad (2)$$

donde u^+ y u^- son las magnitudes de las velocidades relativas del flujo con respecto a la superficie del cuerpo justo sobre las sábanas vorticosas que convergen en el punto de separación. Desde los puntos de separación emanan sábanas 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 sábanas 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 (2001). El método fue implementado en un código computacional que ya fue verificado y validado en trabajos anteriores (Valdez et al., 2021).

3. 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 (Fig.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 \mathbf{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 .

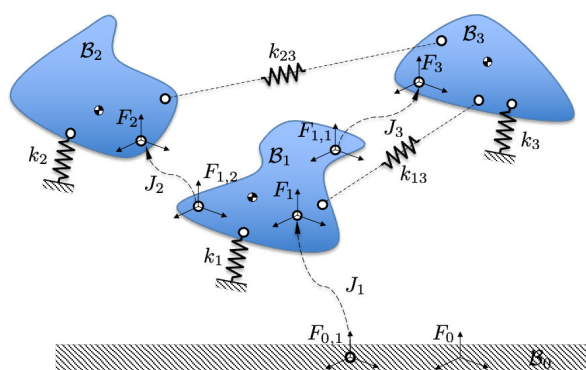


Figura 1: Representación esquemática de un sistema de cuerpos rígidos. J_i denota la articulación i , F_i y $F_{i,j}$ denotan sistemas de coordenadas del cuerpo i , y de la articulación j en el cuerpo i , respectivamente, y k indican rigideces. El sistema debe contener una base fija (cuerpo B_0).

La ecuación de movimiento general para un sistema de cuerpos rígidos tiene la siguiente forma canónica (Featherstone, 2014):

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

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 descritos por Featherstone (2014). 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.

4. LA LIBRERÍA DE ACOPLAMIENTO

Para la simulación de problemas multifísicos, como de interacción fluido-estructura, son posibles dos alternativas: *i*) desarrollar un código monolítico que integre todas las físicas que intervienen, o *ii*) desarrollar distintos software que resuelven cada una de las físicas de manera independiente, particionada, y proveer un método para que los software interactúen (intercambien información) durante la ejecución. Cada una de estas alternativas tiene sus ventajas y desventajas. La primera producirá un código cuya ejecución será, en general, más eficiente pero en principio más complejo, con dependencias internas entre sus diferentes componentes. Esto hacen del software más difícil de mantener y actualizar. La segunda opción ofrece mayor

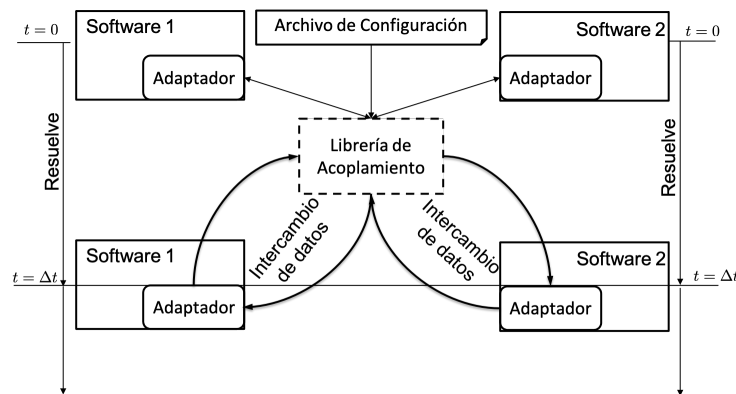


Figura 2: Esquema de acoplamiento paralelo.

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 particionada es menos eficiente que la monolítica y puede sufrir problemas de inestabilidad.

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 método particionado. Para la comunicación entre ambos códigos durante el tiempo de ejecución se desarrolló, en lenguaje FORTRAN, una librería cuyos métodos deben ser llamados por ambos códigos. Todas las llamadas a dichos métodos en los códigos a acoplar se realizan en un sólo lugar o rutina, llamada *adaptador*. Por lo tanto, para cada uno de los códigos desarrollados se construyó un adaptador. La filosofía de diseño de la librería de acoplamiento es similar a la del entorno preCICE (Chourdakis et al., 2021).

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 (Curcic, 2020). 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 descrita en el capítulo 11 de Curcic (2020).

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 (Fig. 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

¹<http://libdill.org>

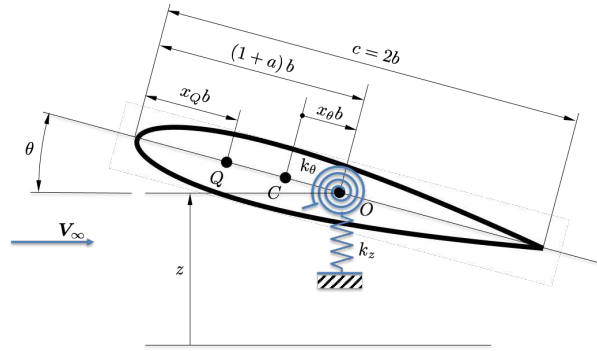


Figura 3: Representación esquemática de una sección típica.

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.

5. 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 Fig. 3. Las ecuaciones de movimiento del sistema son las siguientes (Hodges y Pierce, 2011):

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

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

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:

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

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

6. RESULTADOS

Para la sección típica se empleará un perfil van de Vooren (Katz y Plotkin, 2001, sec. 6.6). Para el ejemplo numérico se eligen los siguientes valores: $a = -1/5$, $x_\theta = 0$, $\mu = 20\pi$, $r^2 = 6/25$, $\sigma = 2/5$, $\zeta_\theta = 0$, $\zeta_z = 0$, $\rho_\infty = 1 \text{ kg/m}^3$, $\omega_z = 1 \text{ rad/s}$ y $b = 0,5\text{m}$. 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 Figs. 4, 5 y 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 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. Para tiempos muy grandes, se espera que las oscilaciones de la estructura sean completamente amortiguadas por el fluido. 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 continúa 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* y la curva de *flutter* del sistema ya que el objetivo del trabajo es demostrar el funcionamiento de la herramienta de acoplamiento desarrollada.

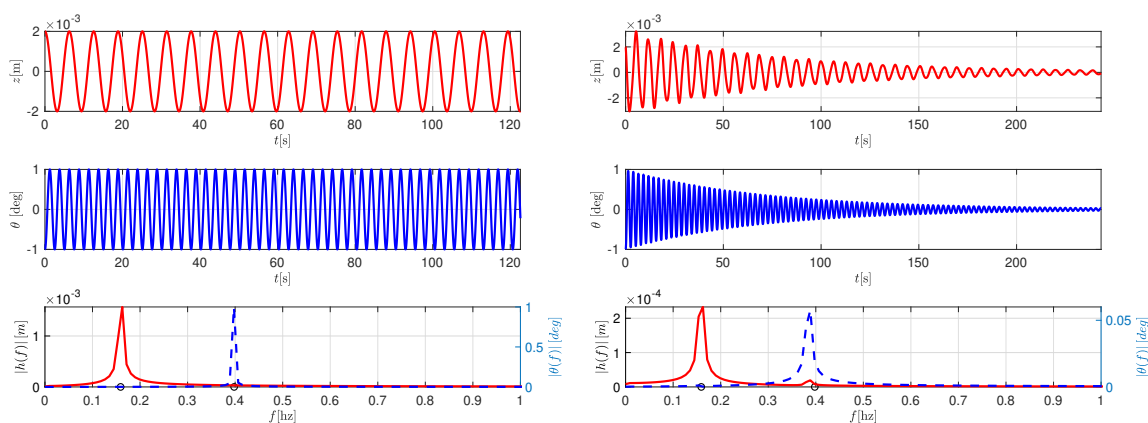


Figura 4: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: sistema sin interacción fluido-estructura. Derecha: Respuesta del sistema para $U_\infty = 0,4$.

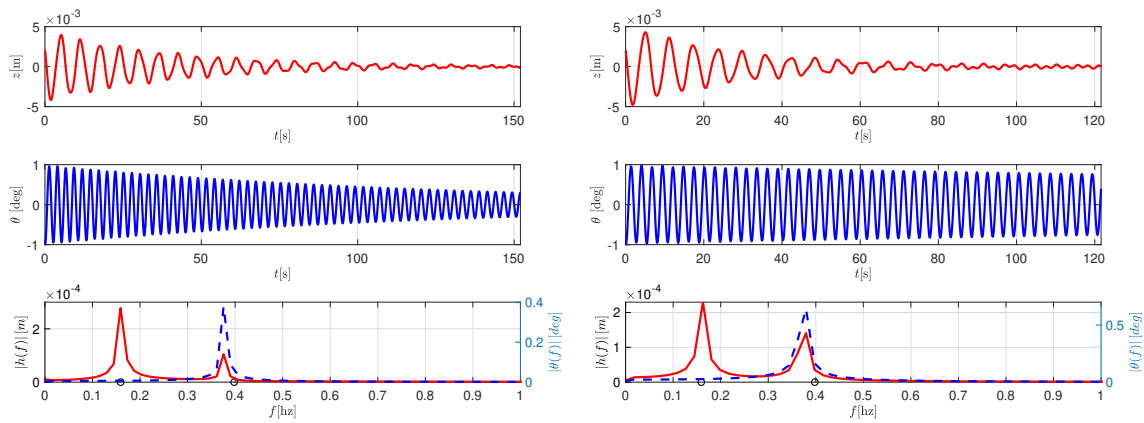


Figura 5: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 0,64$. Derecha: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 0,8$

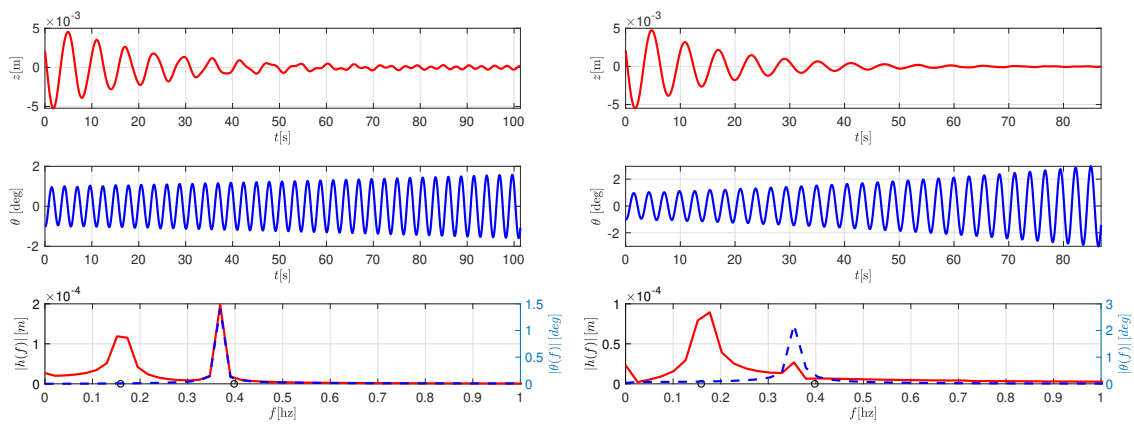


Figura 6: Respuesta temporal de la sección típica. Izquierda: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 0,96$. Derecha: Respuesta del sistema para $U_{\infty} = 1,12$

7. 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 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 auto-sostenidas 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

- Beltramo E., Pérez Segura M.E., Rocchia B.A., Valdez M.F., Verstraete M.L., y Preidikman S. Constructive aerodynamic interference in a network of weakly coupled flutter-based energy harvesters. *Aerospace*, 7(12):167, 2020.
- Chourdakis G., Davis K., Rodenberg B., Schulte M., Simonis F., Uekermann B., Abrams G., Bungartz H.J., Yau L.C., Desai I., et al. precice v2: A sustainable and user-friendly coupling library. *arXiv preprint arXiv:2109.14470*, 2021.
- Curcic M. *Modern Fortran: Building efficient parallel applications*. Manning Publications, 2020.
- Featherstone R. *Rigid body dynamics algorithms*. Springer, 2014.
- He X., Yang X., y Jiang S. Enhancement of wind energy harvesting by interaction between vortex-induced vibration and galloping. *Applied Physics Letters*, 112(3):033901, 2018.
- Hobbs W.B. y Hu D.L. Tree-inspired piezoelectric energy harvesting. *Journal of fluids and Structures*, 28:103–114, 2012.
- Hodges D.H. y Pierce G.A. *Introduction to structural dynamics and aeroelasticity*, volumen 15. Cambridge University Press, 2011.
- Katz J. y Plotkin A. *Low-speed aerodynamics*. Cambridge University Press, 2001.
- Valdez M.F., Ribero S., y Preidikman S. Estudio aerodinámico de perfiles con espesor con el método de red de vórtices. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 8(1):15–30, 2021.
- Wen Q., He X., Lu Z., Streiter R., y Otto T. A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters. *Nano Materials Science*, 3(2):170–185, 2021.
- Zhang B., Song B., Mao Z., Tian W., y Li B. Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement. *Energy*, 133:723–736, 2017.