

UN MÉTODO DE RED DE VÓRTICES INESTACIONARIO MODIFICADO UTILIZANDO PARTÍCULAS VORTICOSAS PARA SIMULACIONES AERODINÁMICAS. PARTE II: CASOS DE ESTUDIO.

A MODIFIED UNSTEADY VORTEX LATTICE METHOD USING VORTEX PARTICLES FOR AERODYNAMIC SIMULATIONS. PART I: STUDY CASES.

Santiago Ribero^a, Martín E. Pérez Segura^{a, b}, Agostina C. Aichino^a, Emmanuel
Beltramo^{a, b}, Bruno A. Rocca^d y Sergio Preidikman^{a, b, d}

^a*Inst. de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

^b*Dpto. de Estructuras, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

^c*Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico at Mayagüez, Puerto Rico*

^d*Geophysical Institute (GFI) and Bergen Offshore Wind Centre (BOW), University of Bergen, Norway*

Palabras clave: Método de red de vórtices, Método de partículas vorticosas, Aerodinámica inestacionaria.

Resumen. En este trabajo se presenta un conjunto de casos de estudio representativos para evaluar el método híbrido de red de vórtices modificado utilizando un método partículas vorticosas (UVLM-VPM), cuya formulación matemática se presenta en el trabajo homónimo, parte I. El UVLM-VPM es una extensión del método de red de vórtices inestacionario (UVLM) en el que las estelas vorticosas libres son modeladas mediante partículas vorticosas. Los casos de estudios comprenden: i) un arranque impulsivo de una placa plana; ii) un ala batiente con cinemática impuesta; y iii) un arreglo de alas batientes en tándem. En todos los casos, los resultados obtenidos por el UVLM-VPM fueron comparados satisfactoriamente con aquellos obtenidos por el UVLM, permitiendo resaltar sus aptitudes.

Keywords: Vortex Lattice Method, Vortex Particle Method, Unsteady Aerodynamic.

Abstract. In this work, a set of representative case studies is presented to evaluate the modified hybrid vortex lattice method using a vortex particle method (UVLM-VPM), whose mathematical formulation is presented in the homonymous work, Part I. The UVLM-VPM is an extension of the unsteady vortex lattice method (UVLM) in which the free vortex wakes are modeled using vortex particles. The case studies include: i) an impulsive start of a flat plate; ii) a flapping wing with imposed kinematics; and iii) an array of tandem flapping wings. In all cases, the results obtained by the UVLM-VPM were satisfactorily compared to those obtained by the UVLM, highlighting its capabilities.

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones de flujos complejos que se producen en torno a alas rotantes y cuerpos inmersos circundantes han puesto nuevamente en escena el potencial de los métodos basados en partículas vorticosas. La basta y creciente capacidad de cómputo hace posible la implementación de esquemas de partículas para estudiar la interacción entre las estelas provenientes de otras superficies sustentadoras y la interacción de las estelas con otras superficies. La Fig. 1 muestra, a modo ilustrativo, una captura del campo de movimiento de una turbina eólica modelada con el método híbrido. El método híbrido, que se presenta en este trabajo, tiene su origen el méto-

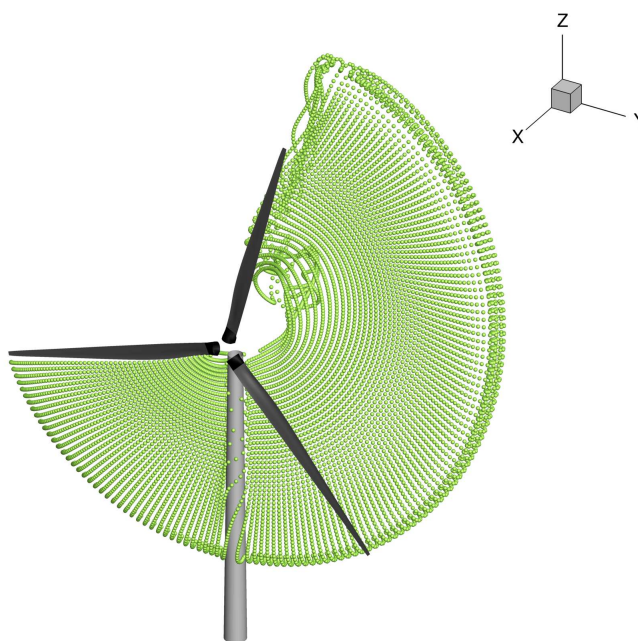


Figura 1: Captura del campo de movimiento de una turbina eólica.

do de red vórtices inestacionario (UVLM). Las grillas adheridas que modelan a las superficies sustentadoras y a los cuerpos inmersos como elementos de frontera, mantienen su estructura de red formada por segmentos, sin embargo, las grillas libres que modelan a las estelas en el UVLM son *transformadas* en estelas de partículas vorticosas. De esta forma, en cada instante de tiempo se determina la circulación sobre las grillas adheridas, se genera un nuevo conjunto de partículas y se convectan las existentes. El mecanismo para la determinación de la intensidad de la vorticidad y las ecuaciones temporales de la simulación son introducidas de acuerdo al marco presentado en la parte I de este trabajo.

Se proponen, para la validación numérica de la herramienta computacional, dos casos típicos de aerodinámica no estacionaria. Por un lado, se modela un ala fija con arranque impulsivo y, por el otro, un ala batiente cuya cinemática está prescrita. En ambos casos, se evalúa el comportamiento de la curva de sustentación del ala. Se presenta, además, un tercer caso de estudio en el que se estudia la sustentación para un par de alas en tándem. El modelo supone un par de alas batientes en los que la interacción de las estelas y las superficies sustentadoras es fuerte. El trabajo es el segundo de una serie de dos trabajos, y se organiza como sigue: en primer lugar, se presenta una introducción general sobre el método híbrido propuesto; en

segundo lugar, se presenta el método para la determinación de la carga aerodinámica; en tercer lugar, se presenta la validación numérica del método; en cuarto y último lugar, se presentan las conclusiones.

2. EL MÉTODO DE RED DE VÓRTICES Y PARTÍCULAS VORTICOSAS INESTACIONARIO

El método de red de vórtices inestacionario (UVLM) y partículas vorticosas inestacionario (VPM) es el método que surge del acoplamiento de un método clásico de red de vórtices y de un método de partículas y se lo identifica por las siglas *UVLM-VPM*. Las aplicaciones de aerodinámica inestacionaria y no lineal típicas que se modelan mediante el UVLM pertenecen al grupo caracterizado por movimientos fluidos incompresibles y con número de Reynolds elevado.

En el modelo físico de estas aplicaciones, las delgadas capas límites que recubren las superficies sumergidas en la corriente libre son representadas por sábanas vorticosas. Cada sábana vorticosa es discretizada por una red de paneles vorticosos formados por segmentos de longitud finita, rectos y de circulación constante. Las sábanas vorticosas adheridas representan a las superficies, sean estas de contorno o sustentadoras, y las sábanas vorticosas libres representan a las estelas.

A cada paso de tiempo, se determina la circulación G , de cada panel de las sábanas vorticosas adheridas. Para ello, se debe resolver un sistema algebraico de ecuaciones, dado por la no penetración de las superficies sólidas. Luego de esto, desde los bordes filosos de las superficies sustentadoras, se convecta un conjunto de paneles que pasan a formar parte de la estela, se generan los paneles híbridos y se mueven las partículas, de acuerdo a la variación temporal de la cantidad de movimiento y de la vorticidad.

3. CARGAS AERODINÁMICAS

En el contexto del UVLM, la fuerza aerodinámica total, \mathbf{F} , que se desarrolla sobre la superficie sustentadora, resulta del aporte de fuerza de cada panel que compone la grilla adherida, esto es,

$$\mathbf{F}(t) = \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{F}_k, \quad (1)$$

donde, n_p es el número de paneles y $\mathbf{F}_k(t)$ es la fuerza sobre el panel k . La fuerza sobre cada panel se obtiene como el producto de: la diferencia de presiones en el panel $\Delta p_k(t)$, el área del panel $A_k(t)$, y el versor normal al panel $\hat{\mathbf{n}}_k(t)$,

$$\mathbf{F}_k = \Delta p_k A_k \hat{\mathbf{n}}_k. \quad (2)$$

El área del panel y su versor normal se determinan a partir la definición geométrica de cada panel. En cambio, la diferencia de presión se obtiene a partir de una versión inestacionaria de la ecuación de Bernoulli, presentada por [Preidikman \(1998\)](#), de la siguiente forma,

$$\Delta p_k = q \left(\frac{2}{u_\infty^2} \left[\frac{G_k^t - G_k^{t-\Delta t}}{\Delta t} + (\mathbf{u}_k^m - \mathbf{v}_k) \cdot \Delta \mathbf{u}_k \right] \right) \quad (3)$$

donde G_k^t y $G_k^{t-\Delta t}$ es la circulación del panel k en el tiempo t y en paso de tiempo anterior, respectivamente, Δt es el tamaño de paso de tiempo discreto, $\mathbf{u}_k^m = \mathbf{u}^B + \mathbf{u}^W + \mathbf{u}_\infty$ es la velocidad media en el panel asociada a la contribución de las grillas adheridas \mathbf{u}^B , a la contribución de las grillas libres \mathbf{u}^W , y a la contribución de la corriente libre \mathbf{u}_∞ , sin considerar su propia

vorticidad, u_∞ es la norma dos de \mathbf{u}_∞ , \mathbf{v}_k es la velocidad del punto de control del panel, $\Delta\mathbf{u}_k$ el salto de velocidad tangencial sobre el panel, y q es la presión dinámica.

La presión dinámica se expresa como,

$$q = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \quad (4)$$

donde ρ la densidad del aire.

4. VALIDACIÓN NUMÉRICA DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

La validación numérica del UVLM-VPM se hace por comparación del coeficiente de fuerza de sustentación, $C_L(t)$. El coeficiente de sustentación es el valor adimensional de la fuerza aerodinámica proyectada en la dirección normal a la corriente libre del fluido,

$$C_L(t) = \frac{L}{qS_{\text{ref}}} \quad (5)$$

donde, $L(t)$ es la fuerza de sustentación y S_{ref} es una superficie de referencia. En los casos de validación aquí presentados, la superficie de referencia se obtiene como

$$S_{\text{ref}} = 2bc \quad (6)$$

donde, b es la semi-envergadura y c es la cuerda del ala. A partir de estas dimensiones es posible definir la relación de aspecto, AR, de un ala rectangular como $AR = 2b/c$.

4.1. Arranque impulsivo de una placa plana

El modelo de una placa plana con arranque impulsivo se compone de un ala orientada a un ángulo de 5° con respecto a la corriente libre. El análisis se realiza sobre la misma geometría para un $AR = 4$ y para un $AR = 12$. La malla de paneles vorticosos que discretiza a la placa tiene cuatro paneles en el sentido de la cuerda, $n_{pc} = 4$, y veintiséis paneles en el sentido de la envergadura, $n_{pb} = 26$. Cada panel tiene una longitud en el sentido de la envergadura, $\bar{b} = b/n_{pb}$, y una longitud en el sentido de la cuerda, $\bar{c} = c/n_{pc}$. La simulación está caracterizada por el tiempo adimensional $V_\infty \Delta t / \bar{c} = 1/16$, donde Δt es el paso de tiempo discreto de la solución. El radio de suavizado, σ , de cada partícula es equivalente a $0,7\bar{b}$.

En la Fig. 2 se muestran las curvas de sustentación obtenidas mediante el método que aquí se presenta en comparación a los obtenidos por otros dos autores. El primero de ellos, Katz y Plotkin (Katz y Plotkin, 2010), presenta sus resultados para las condiciones mencionadas y utiliza una técnica basada en una red de anillos vorticosos, y el segundo ellos, Pérez Segura (Pérez Segura et al., 2020), presenta sus resultados, para idénticas condiciones, y utiliza una técnica basada en una red de vórtices inestacionario. Como parte de la figura, además, se presenta una captura del campo de movimiento para un ala de $AR = 12$ y su estela luego de 60 pasos de tiempo de simulación.

El UVLM y el método de anillos muestran un comportamiento prácticamente idéntico en el desarrollo del transitorio para ambos casos. Por su parte, el UVLM-VPM muestra un comportamiento similar, aunque con un valor de $C_L(t)$ ligeramente superior. Para el ala con $AR = 4$, el error relativo se ubica alrededor del 3 %, y para el ala con $AR = 12$, el error relativo se ubica alrededor de 1 %. El transitorio inestacionario generado por el arranque impulsivo decae rápidamente a medida que el tiempo transcurre y el valor de sustentación tiende a su valor estacionario.

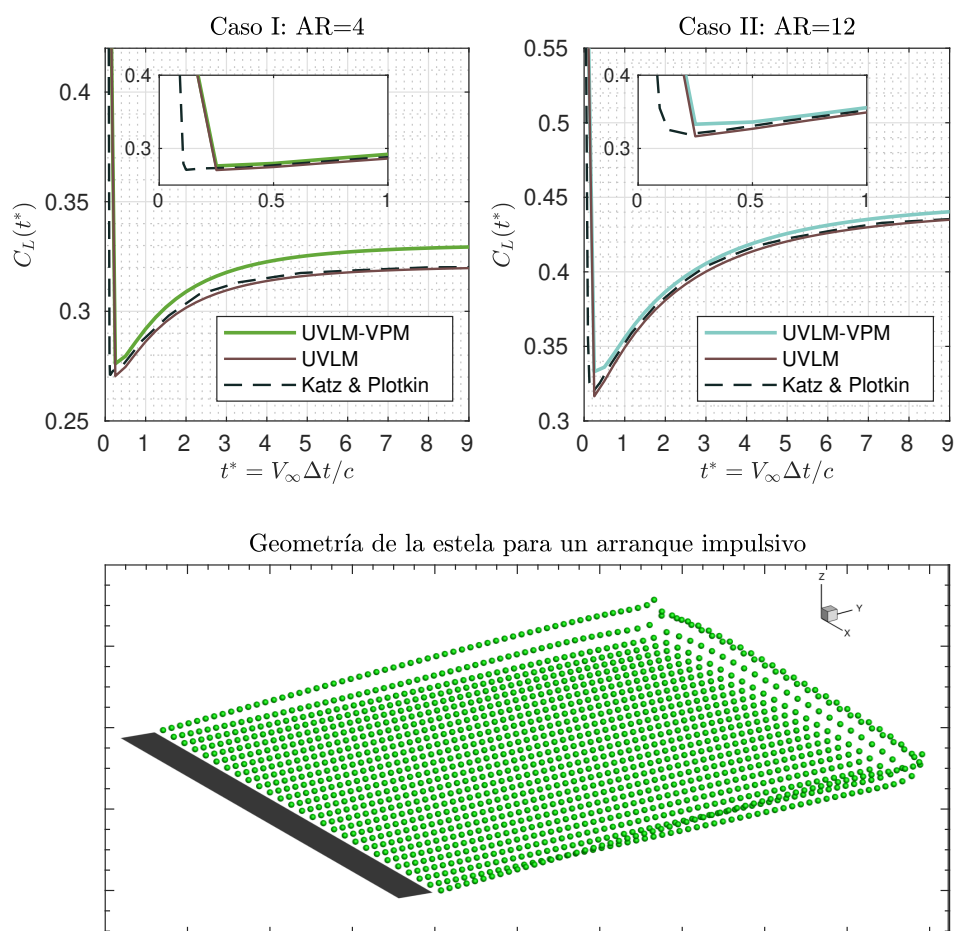


Figura 2: Variación del coeficiente de sustentación con el tiempo y una captura del campo de movimiento luego de 60 pasos de simulación.

En la Fig. 2 se puede observar el enrollamiento de la estela, responsable del comportamiento inestacionario.

La sobreestimación de carga se explica por la presencia del suavizado de las partículas. Si bien no es parte de los resultados mostrados, un análisis numérico sobre el suavizado del campo de vorticidad de las partículas, muestra que la discrepancia en los valores de carga que se estiman disminuyen cuando disminuye el radio de suavizado. Esto presupone un límite inferior al valor del radio de suavizado dado por la estabilidad de la formulación del VPM.

4.2. Movimiento de aleteo y torsión combinados de una placa plana

Neef y Hummel (Neef y Hummel, 2001) proponen un modelo geométrico de un ala compuesta por perfiles NACA0012 con planta rectangular y con $AR = 8$. Aquí, el ala es modelada como una placa plana de espesor infinitesimal. El movimiento impuesto se compone de un aleteo o *flapping*, por su término en inglés, de 15° de amplitud y una frecuencia reducida, $k = 0,1$. La frecuencia reducida se define como $k = \omega c / (2V_\infty)$, donde ω es la frecuencia dimensional en $[rad/s]$. El movimiento de *flapping* es sinusoidal y, además, una rotación o *twist*, desfasada 90° del movimiento de *flapping*, es interpolado linealmente a lo largo de la línea de envergadura con un valor máximo de 4° entre la posición del plano de simetría y los extremos del ala. El período del movimiento, T_f , es discretizado en 40 pasos iguales de tiempo.

La malla de paneles vorticosos que discretiza al posee veintiún paneles en la dirección de la envergadura, $n_{pb} = 21$, y seis paneles en el sentido de la cuerda, $n_{pc} = 6$. El radio de la esfera de suavizado es $\sigma = 1,3\bar{b}$ y se utiliza un suavizado para los segmentos de $\delta = 0,01$.

En la Fig. 3 se presentan tres curvas sustentación para un ciclo de *flapping/twist*. Por un lado, la curva de sustentación de referencia es presentada por Neef y Hummel (2001), y por el otro, se presentan las curvas de sustentación obtenidas mediante el UVLM y el UVLM-VPM. En todos los casos, el ala se orienta a un ángulo fijo medido en la posición del plano de simetría entre el ala y la corriente libre. En el caso I, el ángulo de orientación es de 0° y en el caso II, el ángulo de orientación es de 4° . Nuevamente, se incorpora una captura de la estela generada por el movimiento del ala luego de un ciclo de *flapping*.

Los resultados muestran una buena superposición entre la curva de referencia y las curvas de simulaciones. Durante el ciclo de *flapping*, el UVLM-VPM muestra valores de sustentación ligeramente superior al UVLM, es decir, sobreestima el valor de carga como se observó en el caso anterior.

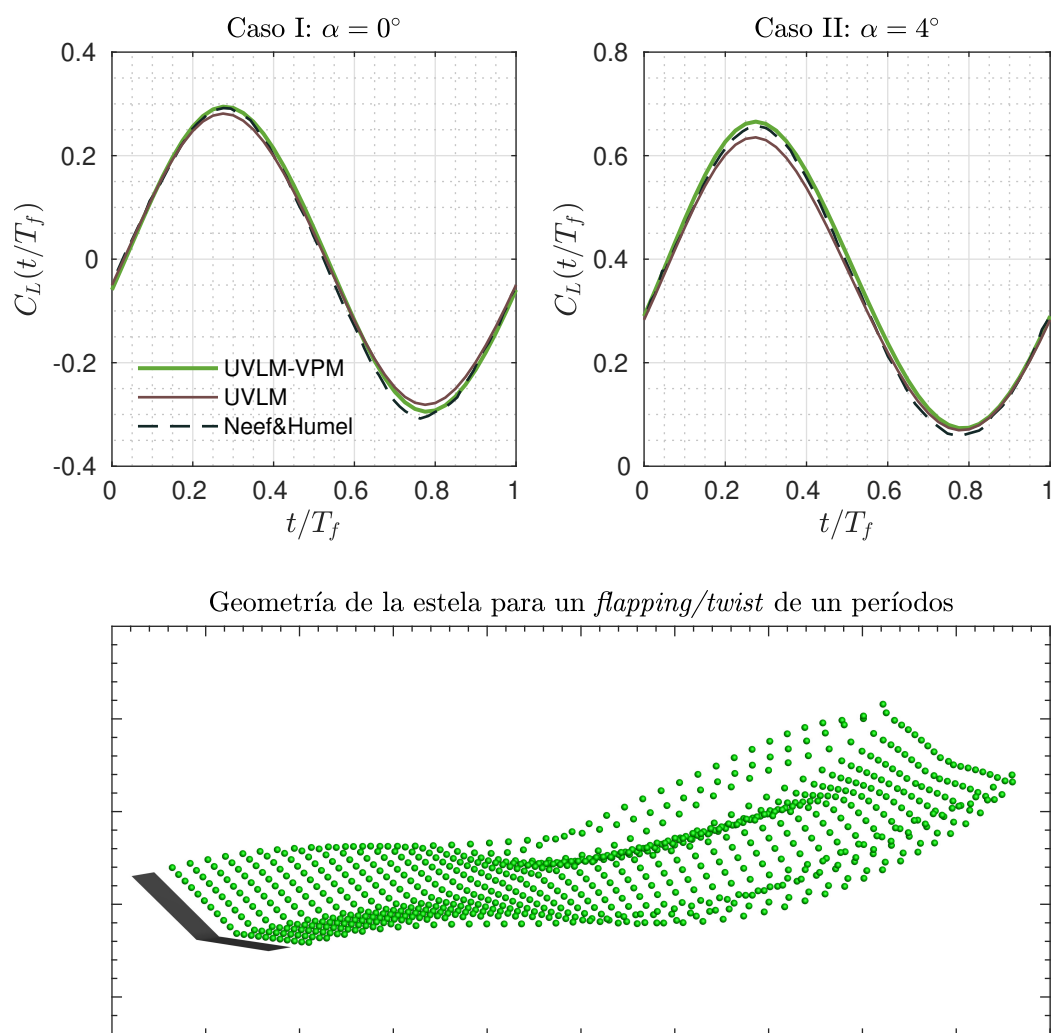


Figura 3: Variación del coeficiente de sustentación para un ala de $AR = 8$ en movimiento de *flapping-twist*.

4.3. Alas en tándem

Se propone un caso de aplicación conformado por un par de alas batientes en tándem. Las alas se ubican, relativamente en el espacio, a $1c$ en la dirección de la envergadura, a $5c$ en la dirección de la cuerda y a $0,5c$ de desplazamiento vertical, de forma tal que la estela del ala anterior (AA) impacte sobre el ala posterior (AP), ver la Fig. 4. Se proponen dos configuraciones iniciales: *Caso I: Fase 0°* , aquí, el movimiento se inicia en ambas alas con la misma configuración, y *Caso II: Fase 180°* , aquí, el ala posterior se encuentra medio ciclo de *flapping* adelantado con respecto al ala posterior.

La curva de sustentación en línea de trazo que se muestran en la Fig. 4 se corresponde con el valor de referencia obtenido para un *flapping* en solitario, la línea continua con marcadores de puntos se corresponde con el valor obtenido por el UVLM-VPM y la línea continua se corresponde con el valor obtenido por el UVLM. Los colores, en cada caso, identifican al ala anterior (verde) y al ala posterior (gris).

Los resultados muestran una curva de sustentación para el AA ligeramente superior a su valor de referencia en solitario, tanto en el caso I como en el caso II. Se repite, nuevamente, la sobreestimación con respecto al UVLM como se mencionó anteriormente. Con respecto al AP, se evidencia una variación sustancial del coeficiente de sustentación, que comprende desde la fase en la que ocurren los máximos locales (o mínimos locales) hasta los valores de amplitud de la sustentación, llegando a en algunos casos, a hacer que la sustentación sea negativa.

Como se describió en la formulación del método del UVLM, no es correcto, a priori, su uso en este contexto. Si bien, se comprueba su estabilidad numérica, en el caso II, se identifica en la Fig. 4 una perturbación (circunferencia de color negro) en la curva de sustentación que se corresponde con uno de los impactos de la estela sobre el ala posterior. Para el caso I, esta perturbación no es tan clara, sin embargo, es observable alguna variación sobre el final del ciclo de *flapping*. No se observan variaciones bruscas sobre las curvas de sustentación cuando se analizan con el UVLM-VPM.

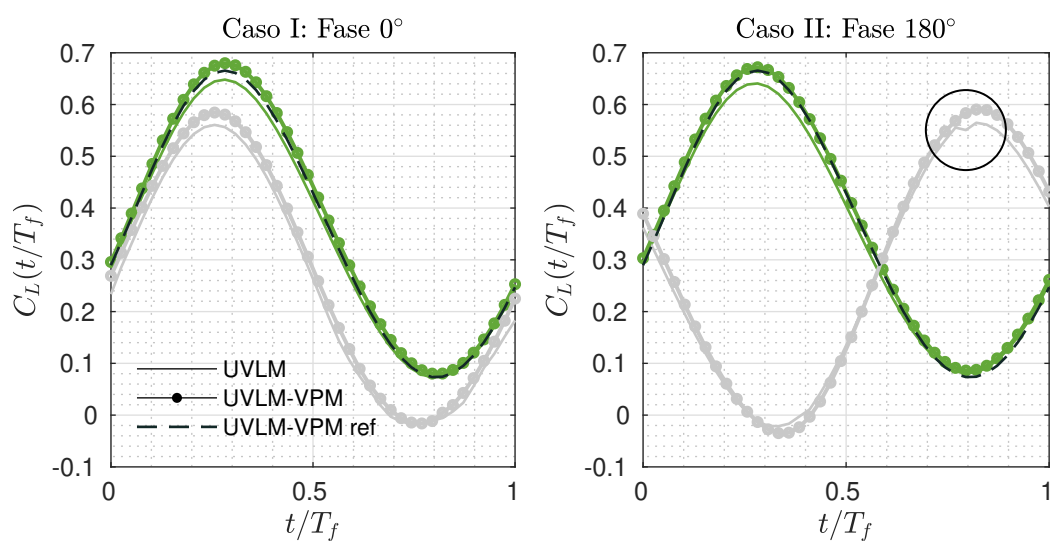
En términos generales, se muestra que la herramienta numérica permite captar la aerodinámica inestacionaria adecuadamente. La curva de referencia y las curvas de simulaciones muestran una buena concordancia.

4.4. Comentarios generales

Las diferencias obtenidas entre los resultados presentados por [Katz y Plotkin \(2010\)](#) y [Neef y Hummel \(2001\)](#) y sus análogos obtenidos mediante el UVLM y el UVLM-VPM, pueden ser atribuibles a algunos parámetros de usuario, como lo son los suavizados de los segmentos o partículas y a discrepancias en las diferentes implementaciones de la ecuación de Bernoulli para el cálculo de la fuerza de sustentación. Naturalmente, como se puede observar en las capturas del campo de movimiento, las plantas alares modeladas no tienen en cuenta los vórtices generados en los extremos libres o punteras del ala. Esto puede ser significativo cuando la AR del ala es baja.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio ha presentado y evaluado con éxito el método híbrido de red de vórtices modificado utilizando partículas vorticosas (UVLM-VPM). A través de una serie de casos de estudio representativos que incluyen arranque impulsivo de una placa plana, un ala batiente con cinemática impuesta y un arreglo de alas batientes en tándem, hemos demostrado la capacidad del UVLM-VPM para modelar flujos inestacionarios con interacción aerodinámica.



Geometría de las estelas para un vuelo en tándem *flapping/twist* de un período

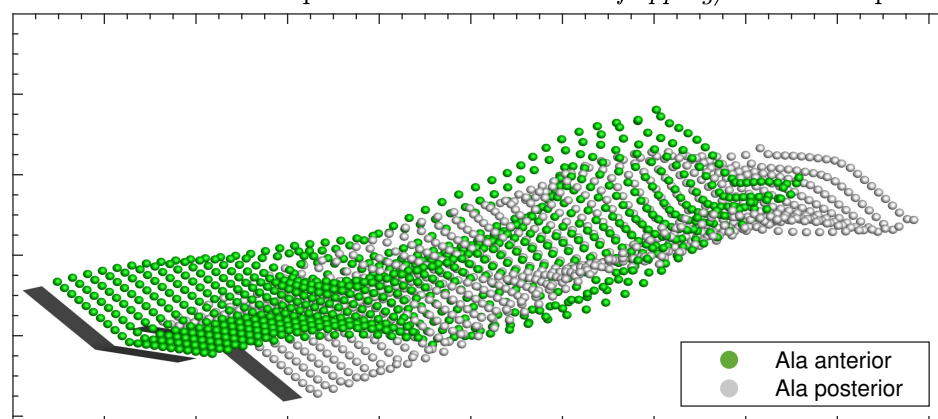


Figura 4: Variación del coeficiente de sustentación para un ciclo de alas batientes en tándem.

La comparación cualitativa de los resultados numéricos con el método de red de vórtices inestacionario revela que el UVLM-VPM es una alternativa efectiva. Los márgenes de discrepancias relativamente bajos en los coeficientes de sustentación resaltan su aptitud para reproducir de manera precisa los valores de sustentación en una variedad de situaciones.

REFERENCIAS

- Katz J. y Plotkin A. *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2010.
- Neef M.F. y Hummel D. Euler solutions for a finite-span flapping wing. *AIAA JOURNAL*, 2001. doi:10.2514/5.9781600866654.0429.0451.
- Preidikman S. Numerical simulations of interactions among aerodynamics, structural dynamics, and control systems. *Virginia Tech*, 1998.
- Pérez Segura M.E., Preidikman S., y Mook D.T. General purpose object-oriented framework for vorticity-dominated flow simulation. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2020. doi:10.2514/1.I010818.