

UN MODELO CINEMÁTICO PARA EL CONTROL DE CAMBIO DE FORMA DE ALAS MULTIFUNCIONALES SIN DISCONTINUIDADES

A KINEMATIC MODEL TO CONTROL THE CHANGE OF SHAPE OF GEOMETRICALLY CONTINUOUS MULTIFUNCTIONAL WINGS

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

^a*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina.*

^b*Departamento de Estructuras. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina.*

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

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

Palabras clave: alas multifuncionales, alas *morphing*, modelo cinemático.

Resumen. En este trabajo se presenta un modelo cinemático para el control de cambio de forma de alas multifuncionales que no presentan discontinuidades geométricas. La superficie sustentadora se define por una grilla geométrica cuyo cambio de forma es controlado por un patrón de nervaduras. Para ello, se definen: *i*) una nervadura principal en el sentido de la envergadura; y *ii*) múltiples nervaduras secundarias en el sentido de la cuerda. A su vez, cada nervadura secundaria constituye la línea media de un perfil aerodinámico con capacidad para deformarse. El modelo es utilizado en diversos casos y los resultados exponen su capacidad para describir el cambio de forma de alas multifuncionales y su potencial aplicación al control activo de sustentación en este tipo de superficies.

Keywords: multi-functional wings, morphing wings, kinematic model.

Abstract. This article presents a kinematic model to address the shape control of geometrically continuous multifunctional wings. The lifting surface is defined by a geometric grid. The change in the grid geometry is controlled by a flexible venation system. The venation system consists of: *i*) a main spanwise vein, and *ii*) a set of transversal veins that in turn represent the mean lines of morphing airfoils. Throughout a series of simulations, the proposed approach has proven to be an effective tool for controlling and adapting the morphing wing.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosos esfuerzos en el desarrollo de modelos de alas flexibles. En particular, de alas que incorporan controles activos con los objetivos de aliviar las cargas generadas por ráfagas y minimizar la resistencia aerodinámica, con el consecuente incremento en el rendimiento de las aeronaves. En este contexto, las alas multifuncionales que cambian de forma (*multi-functional morphing wings*) toman gran relevancia.

Impulsado por los avances recientes en el campo de las estructuras inteligentes, el desarrollo de alas multifuncionales que cambian de forma presenta una solución viable para optimizar el desempeño de las aeronaves, dando lugar a diseños comparativamente más livianos y eficientes. Esto se consigue a través de la incorporación de controles activos que permitan modificar la distribución de cargas aerodinámicas sobre el ala (Chopra y Sirohi, 2013; Concilio *et al.*, 2018). Los sistemas de control desarrollados se basan, en general, en *i*) modificar las propiedades del ala a lo largo de la envergadura, y/o *ii*) en alterar la geometría de los perfiles alares (Barbarino *et al.*, 2011).

En este trabajo se presenta un modelo cinemático para el control de cambio de forma de alas multifuncionales que no presentan discontinuidades geométricas, y que combina las dos soluciones mencionadas anteriormente. En este contexto, se adopta el vocablo *morphing* para hacer referencia al cambio de forma controlado del ala de una aeronave.

El cambio en la geometría de la superficie sustentadora es controlado por un sistema o patrón de nervaduras. Para esto, se definen: *i*) una nervadura principal orientada en el sentido de la envergadura, y *ii*) múltiples nervaduras secundarias orientadas en el sentido de la cuerda. Las nervaduras secundarias se vinculan rígidamente a la nervadura principal en puntos definidos a priori.

La nervadura principal se modela como una curva inextensible descrita mediante polinomios cúbicos en el espacio. Las nervaduras secundarias se representan por curvas inextensibles bidimensionales descritas por polinomios cúbicos de Hermite, contenidos en planos normales a la nervadura principal. Las nervaduras secundarias, a su vez, son consideradas como las líneas medias de perfiles aerodinámicos con capacidad para deformarse (*morphing airfoils*).

Sobre la superficie de cada perfil se define un conjunto de puntos. La grilla geométrica que define a la superficie sustentadora se genera al definir curvas extensibles que conectan puntos homólogos de perfiles alares consecutivos. Cada una de estas curvas se representa por medio de polinomios cúbicos en el espacio, normales al plano de cada perfil alar.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describen las características geométricas del modelo de ala multifuncional propuesto. En la sección 3 se describe un caso de estudio y se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación computacional del método. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones obtenidas.

2. MODELO GEOMÉTRICO

El modelo de ala multifuncional propuesto consiste en un sistema de nervaduras que permite controlar su forma, y una grilla geométrica que define la superficie alar. En esta sección se describen las características geométricas del modelo.

2.1. Patrón de nervaduras

El cambio de forma de la grilla geométrica es controlado por el cambio en la geometría de un sistema o patrón de nervaduras flexibles, presentado por Aichino *et al.* (2022). Este sistema está constituido por una nervadura principal en el sentido de la envergadura y un conjunto de

nervaduras secundarias en el sentido de la cuerda. En la Fig. 1 se muestra, en color gris, el patrón de nervaduras en su configuración de referencia y, en color rojo, el patrón de nervaduras en su configuración deformada.

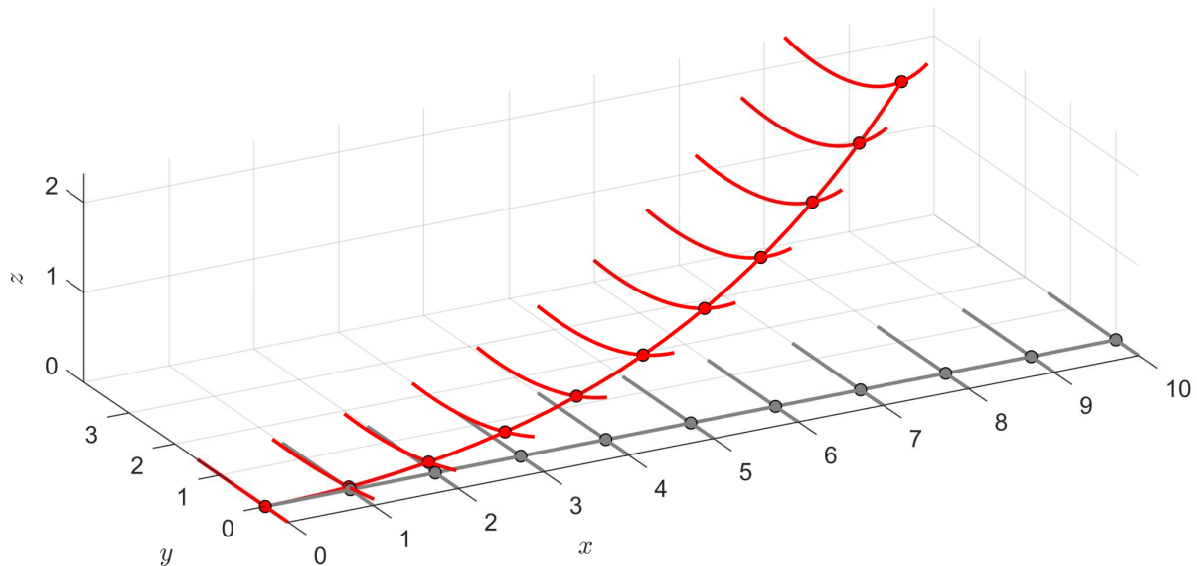


Figura 1: Patrón de nervaduras en su configuración de referencia y en su configuración deformada.

Las nervaduras se modelan como curvas inextensibles, representadas en su configuración de referencia por elementos rectos. La configuración deformada de la nervadura principal se determina mediante una interpolación polinómica en tres dimensiones, mientras que la configuración deformada de las nervaduras secundarias se determina mediante interpolación polinómica de Hermite en dos dimensiones. Para esto, se imponen desplazamientos y condiciones de tangencia en los extremos de cada curva, con la restricción cinemática adicional de conservación de su longitud de arco. Las vinculaciones entre la nervadura principal y cada nervadura secundaria se modelan como conexiones rígidas en puntos definidos a priori, denominados *nodos*.

El nodo inicial de la nervadura principal se ubica sobre la cuerda raíz del modelo de ala y se identifica como nodo 1. Mientras que el nodo final se ubica sobre la cuerda puntera y se identifica como nodo n_{np} , donde n_{np} es el número de nodos (ver Fig. 2). A su vez, el nodo inicial de cada nervadura secundaria se identifica como nodo A , y el nodo final como nodo B (ver Fig. 3).

Sobre los nodos 1 y n_{np} se imponen los desplazamientos y_1, z_1 , e $y_{n_{np}}, z_{n_{np}}$, respectivamente. Además, se imponen las condiciones de tangencia dadas por los versores \hat{T}_1 y $\hat{T}_{n_{np}}$. Sobre los nodos A y B se imponen los desplazamientos h_A y h_B , y las condiciones de tangencia dadas por los ángulos θ_A y θ_B , respectivamente.

Los desplazamientos y las condiciones de tangencia impuestos sobre los extremos de ambos tipos de nervaduras se denominan *parámetros de morphing*. De estos parámetros dependen los coeficientes de los polinomios que representan a cada nervadura.

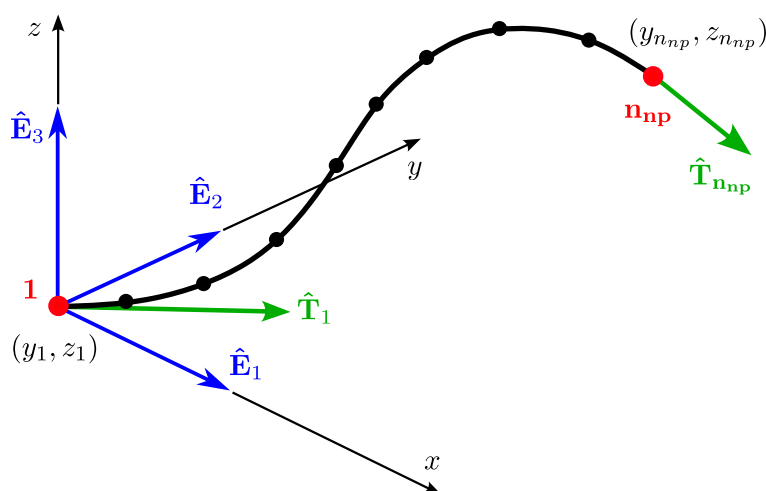


Figura 2: Esquema de la nervadura principal. Identificación de sus nodos extremos 1 y n_{np} .

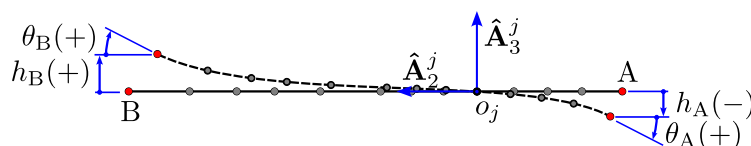


Figura 3: Esquema de una nervadura secundaria. Identificación de sus nodos extremos A y B .

2.2. Marcos de Referencia

Para describir el proceso de cambio de forma se introducen los siguientes marcos de referencia:

1. Un marco de referencia global $\mathcal{E} = \{o, \hat{\mathbf{E}}_1, \hat{\mathbf{E}}_2, \hat{\mathbf{E}}_3\}$.
2. Un marco de referencia local asociado a cada nodo $\mathcal{A}^j = \{o_j, \hat{\mathbf{A}}_1^j, \hat{\mathbf{A}}_2^j, \hat{\mathbf{A}}_3^j\}$, $j = 1, 2, \dots, n_{np}$. Además, $\mathcal{A}^1 = \mathcal{E}$.

El marco de referencia global y los marcos de referencia locales se definen en la configuración de referencia del patrón de nervaduras (ver Fig. 4).

El marco de referencia global se define de manera tal que el versor $\hat{\mathbf{E}}_1$ coincida con la dirección de la nervadura principal y el versor $\hat{\mathbf{E}}_2$ coincida con la dirección de la nervadura secundaria ubicada en la cuerda raíz del modelo. El versor $\hat{\mathbf{E}}_3$ queda definido por el producto vectorial entre los versores $\hat{\mathbf{E}}_1$ y $\hat{\mathbf{E}}_2$, esto es, $\hat{\mathbf{E}}_3 = \hat{\mathbf{E}}_1 \times \hat{\mathbf{E}}_2$.

Cada marco de referencia local \mathcal{A}^j se define de forma tal que el versor $\hat{\mathbf{A}}_1^j$ coincida con la dirección de la nervadura principal en su configuración de referencia, y se mantenga tangente a ésta en su configuración deformada. El versor $\hat{\mathbf{A}}_2^j$ se define coincidente con la dirección de la nervadura secundaria j , y el versor $\hat{\mathbf{A}}_3^j$ queda determinado por $\hat{\mathbf{A}}_3^j = \hat{\mathbf{A}}_1^j \times \hat{\mathbf{A}}_2^j$.

2.3. Grilla Geométrica

Las nervaduras secundarias constituyen, a su vez, líneas medias de perfiles aerodinámicos con capacidad para deformarse. Sobre la superficie de cada perfil alar se definen puntos, denominados *nodos esclavos*. La grilla geométrica se genera al definir curvas extensibles que conectan nodos esclavos homólogos de perfiles aerodinámicos consecutivos.

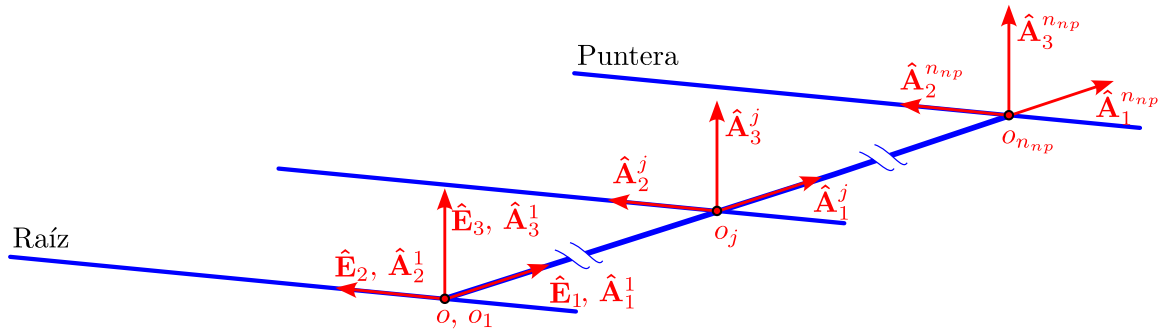


Figura 4: Marco de referencia global \mathcal{E} y marcos de referencia locales \mathcal{A}^j en la configuración de referencia.

Cada curva \mathcal{C}_r^i es representada por la unión de un conjunto finito de elementos $\mathcal{C}_{r_k}^i$ tal que $\mathcal{C}_r^i = \cup_{k=1}^{n_{el}} \mathcal{C}_{r_k}^i$, donde n_{el} es el número de elementos que componen a la curva i . En la configuración de referencia, $\mathcal{C}_{r_k}^i$ es representado por un elemento recto de longitud L_k , en dirección del vector \hat{A}_1^k (ver Fig. 5). El elemento $\mathcal{C}_{r_k}^i$ tiene la parametrización trivial

$$\mathbf{r}_k(\eta_k) = \eta_k \hat{A}_1^k, \quad \eta_k \in [0, L_k]. \quad (1)$$

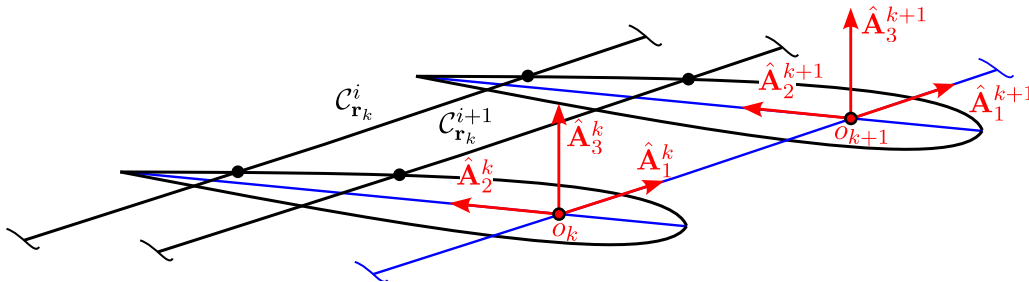


Figura 5: Elemento $\mathcal{C}_{r_k}^i$ en la configuración de referencia.

Cuando el patrón de nervaduras cambia de forma, el elemento es deformado a una nueva configuración (configuración deformada). Matemáticamente, el elemento es representado en su configuración deformada por la curva $\mathcal{C}_{r_k}^{id}$, parametrizada por

$$\mathbf{r}_k^d(\xi_k) = \xi_k \hat{A}_1^k + g_k^2(\xi_k) \hat{A}_2^k + g_k^3(\xi_k) \hat{A}_3^k, \quad \xi_k \in [0, l_k], \quad (2)$$

donde l_k es la longitud del elemento en su configuración deformada, con $l_k \neq L_k$, y g_k^2 y g_k^3 son polinomios interpolantes de tercer grado.

La configuración deformada se determina al imponer desplazamientos y condiciones de tangencia en los extremos de cada elemento. Estas condiciones quedan determinadas por la configuración deformada del patrón de nervaduras. Las incógnitas del problema son los coeficientes de los polinomios g_k^2 y g_k^3 . Por lo tanto, resolver el problema de interpolación descrito implica, a su vez, la solución de un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales.

3. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS

3.1. Descripción del caso de estudio

Para estudiar la cinemática del cambio de forma del modelo de ala propuesto se considera un ala rectangular, de 10 m de semi-envergadura y 2 m de cuerda. La semi-envergadura se compone

de 11 perfiles aerodinámicos simétricos NACA 0012, distribuidos de manera equidistante a lo largo de la misma. Todos los perfiles admiten cambio de forma, a excepción del perfil localizado en la cuerda raíz del ala. La grilla geométrica se define a partir de 8 curvas que conectan nodos esclavos homólogos de perfiles aerodinámicos consecutivos.

En la Fig. 6 se muestra el modelo en la configuración de referencia. En líneas de trazo de color azul se grafica el patrón de nervaduras. En líneas continuas de color negro se grafican los perfiles aerodinámicos y las curvas que definen la grilla geométrica.

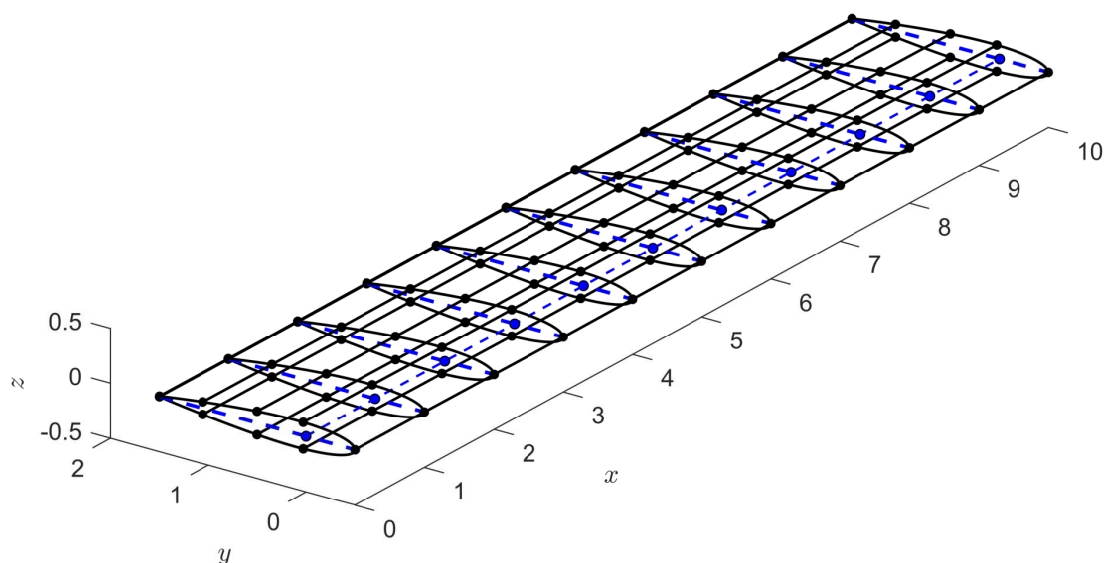


Figura 6: Modelo de ala multifuncional en su configuración de referencia.

3.2. Resultados

En la Fig. 7 se muestra una vista en perspectiva y en la Fig. 8 una vista en planta de una configuración deformada obtenida a partir del método presentado en la Sección 2. La configuración deformada muestra un cambio en la geometría del ala en el plano xy (plano en planta de la superficie alar), y una modificación en la combadura a lo largo de la envergadura.

Los parámetros de *morphing* utilizados para obtener la configuración deformada de la nervadura principal se presentan en la Tabla 1, mientras que los utilizados para obtener las configuraciones deformadas de las nervaduras secundarias se presentan en la Tabla 2.

Nodo inicial (raíz)				
y_1 [m]	z_1 [m]	$\hat{\mathbf{E}}_1 \cdot \hat{\mathbf{T}}_1$	$\hat{\mathbf{E}}_2 \cdot \hat{\mathbf{T}}_1$	$\hat{\mathbf{E}}_3 \cdot \hat{\mathbf{T}}_1$
0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Nodo final (puntera)				
y_{nnp} [m]	z_{nnp} [m]	$\hat{\mathbf{E}}_1 \cdot \hat{\mathbf{T}}_{nnp}$	$\hat{\mathbf{E}}_2 \cdot \hat{\mathbf{T}}_{nnp}$	$\hat{\mathbf{E}}_3 \cdot \hat{\mathbf{T}}_{nnp}$
3,00	3,00	$\sqrt{3}/3$	$\sqrt{3}/3$	$\sqrt{3}/3$

Tabla 1: Parámetros de *morphing* de la nervadura principal.

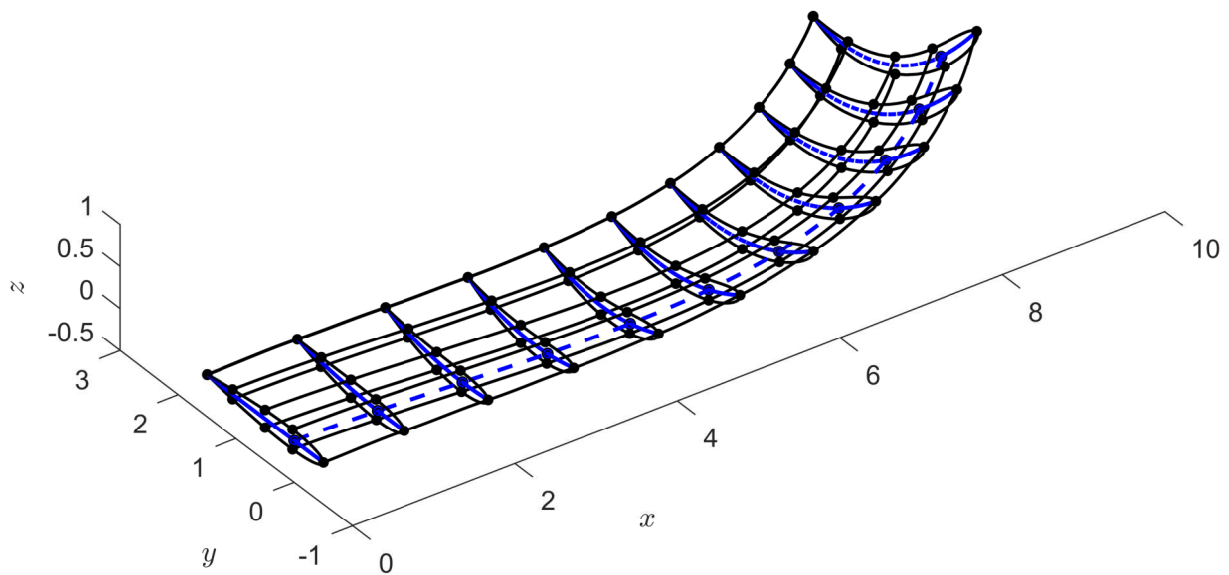


Figura 7: Modelo de ala multifuncional en su configuración deformada: vista en perspectiva.

Estación	h_A [m]	θ_A [°]	h_B [m]	θ_B [°]
1 (raíz)	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	-5,00	0,00	5,00
3	0,00	-10,00	0,00	10,00
4	0,00	-15,00	0,00	15,00
5	0,00	-20,00	0,00	20,00
6	0,00	-25,00	0,00	25,00
7	0,00	-30,00	0,00	30,00
8	0,00	-35,00	0,00	35,00
9	0,00	-40,00	0,00	40,00
10	0,00	-45,00	0,00	45,00
11 (puntera)	0,00	-50,00	0,00	50,00

Tabla 2: Parámetros de *morphing* de las nervaduras secundarias.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como motivación abordar el problema de cambio de forma de alas multifuncionales sin la utilización de superficies articuladas. Para estudiar la cinemática del *morphing* se desarrolló un modelo de ala inspirado en la biología. El cambio en la geometría de la superficie sustentadora es controlado mediante un sistema o patrón de nervaduras flexibles, emulando la anatomía de las alas de insectos y de algunas aves pequeñas.

El patrón de nervaduras se conforma por una nervadura principal a la cual se vinculan rígidamente un conjunto de nervaduras secundarias. La nervadura principal se modela como una curva inextensible tridimensional, mientras que las nervaduras secundarias se modelan como curvas inextensibles contenidas en planos normales a la nervadura principal. Las nervaduras secundarias constituyen, a su vez, las líneas medias de perfiles aerodinámicos *morphing*. Sobre la superficie de cada perfil se definen puntos denominados *nodos esclavos*. La grilla geométrica que define a la superficie del ala se genera mediante curvas extensibles que conectan nodos

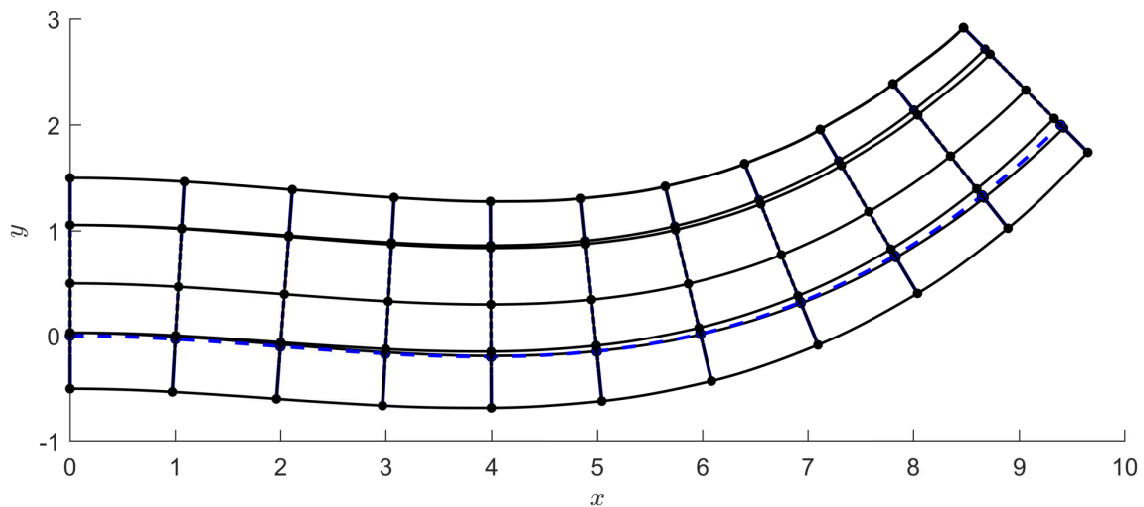


Figura 8: Modelo de ala multifuncional en su configuración deformada: vista en planta.

esclavos homólogos.

Las configuraciones deformadas de las nervaduras se obtienen mediante una interpolación, tridimensional para la nervadura principal, y bidimensional para cada nervadura secundaria, con la restricción cinemática adicional de conservación de la longitud de arco. Las configuraciones deformadas de las curvas que definen la superficie del ala se determinan mediante un problema de interpolación en el espacio.

Los resultados numéricos evidencian la capacidad del método para modelar adecuadamente cambios suaves en la geometría de alas multifuncionales *morphing*. En virtud de su potencialidad, se prevé a futuro acoplar el modelo cinemático desarrollado con un modelo aerodinámico tridimensional e inestacionario, para la estimación de las cargas generadas debido al cambio de forma de la superficie sustentadora.

REFERENCIAS

- Aichino A., Ribero S., Pérez Segura M., Beltramo E., Rocchia B., y Preidikman S. Un modelo para el control de cambio de forma de alas multifuncionales basado en interpolación g^2 de hermite para curvas 3d. *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2022. doi: <https://doi.org/10.5944/bicim2022.305>.
- Barbarino S., Bilgen O., Ajaj R., Friswell M., y Inman D. A review of morphing aircraft. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22:823–877, 2011.
- Chopra I. y Sirohi J. *Smart Structures Theory*. Cambridge University Press, 2013.
- Concilio A., Dimino I., Lecce L., y Pecora R. *Morphing Wing Technologies*. Elsevier, 2018.