

UN MODELO CINEMÁTICO PARA DESCRIBIR EL CAMBIO DE FORMA DE ALAS MULTIFUNCIONALES FORMADAS POR NERVADURAS

A KINEMATIC MODEL TO DESCRIBE THE CHANGE OF SHAPE OF MULTIFUNCTIONAL WINGS FORMED BY A VENATION SYSTEM

Agostina C. Aichino^a, Santiago Ribero^a, Martín E. Pérez Segura^{a,b} y Sergio Preidikman^{a,b}

^a*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, idit@fcefyn.edu.ar, www.inv.idit.efn.uncor.edu*

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

Palabras clave: *morphing*, análisis cinemático, patrón de nervaduras, alas multifuncionales.

Resumen. En el ámbito aeroespacial, el concepto de alas que cambian de forma (“*morphing wings*”) cuenta con un vasto potencial para múltiples aplicaciones. En este trabajo se presenta un modelo que permite estudiar los aspectos cinemáticos del cambio de forma de superficies aerodinámicas multifuncionales. Inspiradas en las alas de algunos insectos, las superficies sustentadoras se representan como un sistema o patrón de nervaduras o venas flexibles (“*wing venation system*”) que cambian dinámicamente de forma para optimizar la distribución de cargas aerodinámicas asociadas a los distintos estadios de vuelo. Este sistema de nervaduras da soporte y controla la forma de una membrana o superficie sustentadora per se. El sistema patrón se encuentra formado por una nervadura principal que se desarrolla en el sentido de la envergadura, y por una serie de nervaduras secundarias que se desarrollan en el sentido de la cuerda. Las nervaduras secundarias se conectan rígidamente a la nervadura principal. En este marco, el sistema de nervaduras se modela como un conjunto de curvas inextensibles. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta permite representar la cinemática de diversas configuraciones del patrón de nervaduras y, por consiguiente, utilizarla para simular cambios dinámicos de forma en superficies sustentadoras.

Keywords: *morphing wings*, kinematic analysis, venation system, multi-functional wings.

Abstract. In the aerospace context, the *morphing wing* concept has shown a great potential for numerous applications. In this work, we present a kinematic model to address the shape control of multi-functional aerodynamic surfaces. Wings inspired by biology are usually represented by means of a flexible venation system. Such wings can dynamically control their configuration in order to optimize the load distribution for different flight conditions. The multi-vein system is formed by a main spanwise nervure and a set of transversal chordwise nervures. Furthermore, the veins are numerically modeled as inextensible curves. Throughout a series of simulations, the proposed approach has proven to be an effective tool for not only representing several configurations, but also for capturing the dynamic changes in the shape of lifting surfaces.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los diseños convencionales de aeronaves han procurado optimizar la performance en porciones acotadas de la envolvente de vuelo. Sin embargo, durante su operación, una aeronave puede enfrentar distintas condiciones y adoptar diferentes regímenes de vuelo que pueden incluso exceder los márgenes de misión para los cuales fue concebida. Esto pone en evidencia las limitaciones de los diseños convencionales en cuanto no son capaces de brindar eficiencia y performance elevadas a lo largo de todo el perfil de misión. Luego, las investigaciones recientes han recurrido a diseños nóveles que puedan adaptarse a condiciones variantes.

En este contexto, las alas adaptativas, cuya geometría variable permite modificar la distribución de las cargas aerodinámicas, pueden lograr un incremento en el rendimiento aerodinámico y, por lo tanto, una mejora en el desempeño de la aeronave (Barbarino et al., 2011). Este concepto se conoce como control activo de la distribución de sustentación y representa un enfoque novel que ha mostrado gran versatilidad en numerosas aplicaciones (Quack, 2014). En general, los sistemas de control utilizados en este tipo de diseños se basan en dos aspectos que, en algunos casos, pueden combinarse: *i*) modificar las propiedades del ala a lo largo de la envergadura; y *ii*) alterar la geometría de los perfiles alares. Tradicionalmente, se utilizan superficies de control móviles dispuestas a lo largo de la envergadura del ala para modificar la distribución de las cargas aerodinámicas externas. Esta alternativa, si bien es ampliamente utilizada, ofrece un control limitado para la redistribución de sustentación. Dentro de las estructuras inteligentes, las alas multifuncionales que cambian de forma (“*multi-functional morphing wings*”) representan una solución viable para optimizar el desempeño de la aeronave a través de la incorporación de controles activos que permitan modificar la geometría del ala sin la necesidad de utilizar superficies articuladas, dando lugar a diseños más livianos y eficientes (Concilio et al., 2018). En este contexto, se adopta el término *morphing* para referirse al cambio de forma controlado del ala de una aeronave.

En este trabajo se presenta un modelo para estudiar la cinemática asociada al cambio de forma de alas, sin discontinuidades geométricas, como parte de un concepto de ala multifuncional que incorpora el control activo de la distribución de sustentación a lo largo de la envergadura. Inspirado en la biología, el modelo está formado por un sistema de nervaduras flexibles que aporta rigidez a la estructura multifuncional del ala y permite, adicionalmente, controlar dinámicamente su forma. Este sistema de nervaduras está compuesto por: *i*) una nervadura principal (NP) en el sentido de la envergadura; *ii*) múltiples nervaduras secundarias (NS) transversales a la nervadura principal, orientadas en el sentido de la cuerda; y *iii*) un conjunto de vinculaciones entre ambos tipos de nervaduras.

La NP y las NS se modelan como curvas inextensibles que se describen por medio de polinomios clásicos de Hermite. Las NS, a su vez, son consideradas como las líneas medias de perfiles alares no delgados con capacidad para deformarse dinámicamente. Las vinculaciones entre ambos tipos de nervaduras se modelan como conexiones rígidas en puntos definidos a priori denominados nodos. Según sus características, estos nodos pueden ser:

- *Nodos Maestros* (NM): representan las vinculaciones entre la NP y las NS ubicadas en ambos extremos de la NP, y sobre los cuales se imponen las llamadas *condiciones libres*.
- *Nodos Esclavos* (NE): representan las vinculaciones entre la NP y las NS ubicadas entre los nodos maestros.

De esta manera, la forma del ala es el resultado de la combinación de deformaciones en el

sentido de la envergadura y alteraciones en la geometría de los perfiles alares, comandadas por el movimiento de las respectivas nervaduras.

El presente artículo se organiza como sigue: en la Sección 2 se describe el modelo geométrico del patrón de nervaduras. En la Sección 3 se muestran los resultados numéricos obtenidos a partir de la implementación computacional del modelo presentado, y finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones y se proponen trabajos futuros.

2. MODELO GEOMÉTRICO

El modelo de ala multifuncional propuesto se basa en el sistema de nervaduras flexibles mencionado anteriormente. En esta sección se describen las características geométricas del sistema.

2.1. Nervadura principal

Para describir el proceso de cambio de forma de la NP se introduce un marco de referencial global $\mathcal{E} = \{o, \hat{\mathbf{E}}_1, \hat{\mathbf{E}}_2, \hat{\mathbf{E}}_3\}$, el cual tiene asociado un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales (x, y, z) . La NP se modela como una curva inextensible que, en su configuración de referencia, está representada por un elemento sin curvatura (recta), \mathcal{C}_q , de longitud L alineada con el vector unitario $\hat{\mathbf{E}}_1$. El elemento \mathcal{C}_q tiene la parametrización trivial $\mathbf{q}(x) = x\hat{\mathbf{E}}_1$ con $x \in [0, L]$. Cuando el mecanismo de *morphing* es activado, la NP es deformada a una nueva configuración (configuración deformada). El plano de la deformación está definido por los versores $\hat{\mathbf{E}}_1$ y $\hat{\mathbf{E}}_i$, con $i = 2, 3$. Matemáticamente, la NP es representada en su configuración deformada por la curva \mathcal{C}_q^d (véase la Fig. 1) cuya parametrización es

$$\mathbf{q}^d(\xi) = \xi\hat{\mathbf{E}}_1 + g^2(\xi)\delta_{2i}\hat{\mathbf{E}}_2 + g^3(\xi)\delta_{3i}\hat{\mathbf{E}}_3, \quad \xi \in [0, \eta^m], \quad \eta^m \leq L \quad (1)$$

donde δ_{ji} es una delta de Kronecker. Las componentes en las direcciones y o z , es decir, $g^2(\xi)$ o $g^3(\xi)$, se determinan mediante una interpolación de tercer orden utilizando polinomios de Hermite, cuyos coeficientes están dados por las *condiciones libres*. Matemáticamente, esto se expresa como

$$g^i(\xi) = h_1 N_1(\xi) + \tan \theta_1 N_2(\xi) + h_{n_{np}} N_3(\xi) + \tan \theta_{n_{np}} N_4(\xi) \quad (2)$$

donde h_1 y $h_{n_{np}}$ son los desplazamientos impuestos sobre el NM_1 y el $\text{NM}_{n_{np}}$ en las direcciones y o z ; $\tan \theta_1$ y $\tan \theta_{n_{np}}$ son los cambios de orientación de los extremos de la NP; $N_1(\xi)$, $N_2(\xi)$, $N_3(\xi)$ y $N_4(\xi)$ son los cuatro polinomios interpolantes cúbicos de Hermite, y n_{np} es la suma del número de NM y NE. Se identifica con NM_1 al NM localizado en la raíz de la NP, y con $\text{NM}_{n_{np}}$ al NM localizado en la puntera de la NP.

Durante el proceso de cambio de forma, los desplazamientos y los cambios en la pendiente del extremo correspondiente a la raíz de la NP deben mantenerse constantes e iguales a cero, esto es, $h_1 = 0$ y $\tan \theta_1 = 0$. Además, la distancia medida como la longitud de arco entre el NM_1 y el $\text{NM}_{n_{np}}$, debe mantenerse constante e igual a L . Esta restricción viene dada por

$$\int_0^{\eta^m} \sqrt{1 + [g^{ij}(\zeta)]^2} d\zeta - L = 0, \quad (3)$$

donde $(\cdot)'$ denota derivada con respecto al parámetro ξ , η^m es la coordenada x del $\text{NM}_{n_{np}}$ en la configuración deformada y constituye la incógnita de la Ec. (3).

Conocida η^m , la curva \mathcal{C}_q^d queda definida y, por lo tanto, es posible determinar las coordenadas ξ en la dirección x de cada NE en la configuración deformada. Para resolver este problema,

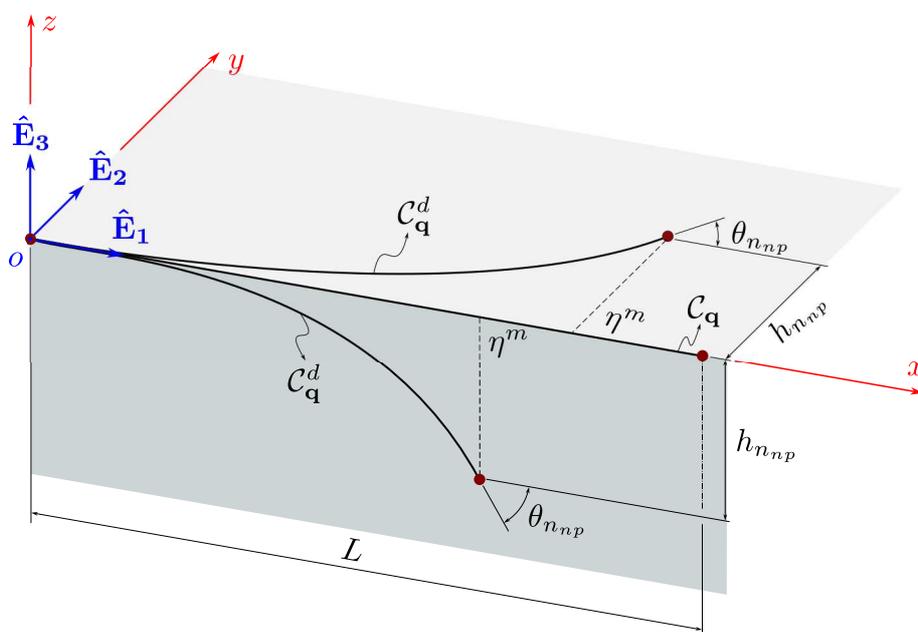


Figura 1: Representación de C_q (configuración de referencia) y C_q^d (configuración deformada).

se debe considerar la hipótesis de conservación de la longitud de arco entre el NM_1 y cada NE , esto es

$$\int_0^{\xi_k} \sqrt{1 + [g^{it}(\zeta)]^2} d\zeta - l_k = 0, \quad k = 2, 3, \dots, n_{np} - 1 \tag{4}$$

donde ξ_k es la coordenada en la dirección x del NE_k en la configuración deformada y constituye la incógnita de la Ec. (4), y l_k es la distancia medida entre el NM_1 y el NE_k en la configuración de referencia.

2.2. Nervaduras secundarias

Las NS representan las líneas medias de perfiles aerodinámicos que cambian de forma (perfiles *morphing*). Éstas se modelan a partir del método presentado por Aichino et al. (2021). Cada NS posee un NM ubicado en el borde de ataque, A, y un NM ubicado en el borde fuga, B. La geometría de cada NS se determina mediante interpolación utilizando polinomios cúbicos de Hermite, cuyos coeficientes dependen de los llamados *parámetros de morphing*: h_A , h_B , θ_A y θ_B . En la Fig. 2 se muestra: un modelo de NS, representado por la línea media de un perfil aerodinámico, en sus configuraciones de referencia y deformada, y los *parámetros de morphing*.

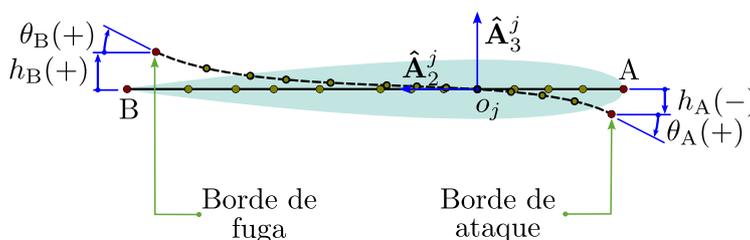


Figura 2: Nervadura secundaria en sus configuraciones de referencia y deformada.

2.3. Marcos de referencia

Para describir el proceso de cambio de forma del patrón de nervaduras se utilizan los siguientes marcos de referencia:

- El marco de referencia global $\mathcal{E} = \{o, \hat{\mathbf{E}}_1, \hat{\mathbf{E}}_2, \hat{\mathbf{E}}_3\}$ introducido en la sección 2.1.
- Un marco de referencia local por cada nodo, definido en la configuración de referencia, $\mathcal{A}^j = \{o_j, \hat{\mathbf{A}}_1^j, \hat{\mathbf{A}}_2^j, \hat{\mathbf{A}}_3^j\}$, $j = 1, 2, \dots, n_{np}$ y, además, $\mathcal{A}^1 = \mathcal{E}$.

Con el fin de describir de manera adecuada la orientación de los perfiles aerodinámicos asociados a las NS, se adopta una definición ad hoc para los marcos de referencia locales. Ésta permite mantener el versor $\hat{\mathbf{A}}_1^j$ tangente a la deformada de la NP. Los versores de cada marco de referencia \mathcal{A}^j se definen como:

$$\hat{\mathbf{A}}_1^j(\xi) = \frac{\mathbf{q}_k^{dr}(\xi)}{\|\mathbf{q}_k^{dr}(\xi)\|}, \quad \hat{\mathbf{A}}_2^j(\xi) = \frac{\hat{\mathbf{E}}_3 \times \hat{\mathbf{A}}_1^j(\xi)}{\|\hat{\mathbf{E}}_3 \times \hat{\mathbf{A}}_1^j(\xi)\|}, \quad \hat{\mathbf{A}}_3^j(\xi) = \hat{\mathbf{A}}_1^j(\xi) \times \hat{\mathbf{A}}_2^j(\xi) \quad (5)$$

En la Fig. 3 se muestran los marcos de referencia \mathcal{A}^j .

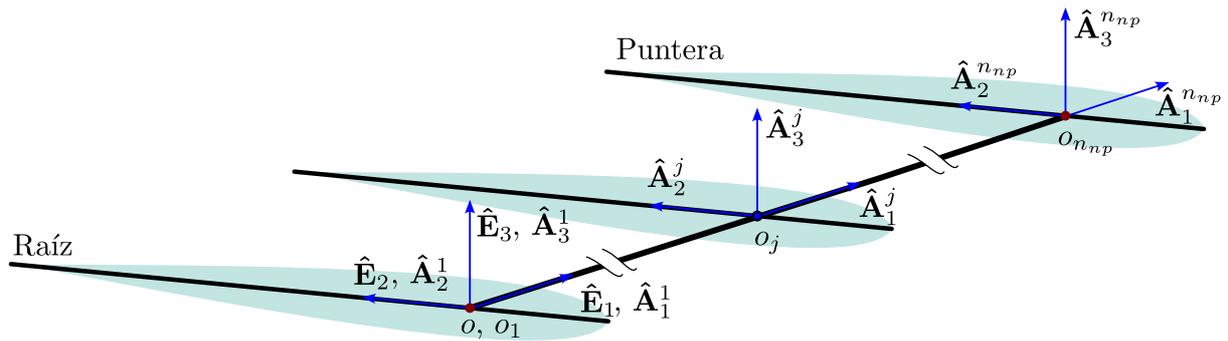


Figura 3: Marco de referencia global \mathcal{E} y marcos de referencia locales \mathcal{A}^j .

La conexión rígida definida entre las nervaduras hace que la cinemática de la NS esté ligada al cambio de posición y de orientación del marco de referencia local asociado con cada nodo. Se define, entonces, una rotación de cuerpo rígido, $\mathbf{T}_{\mathcal{A}^j\mathcal{E}}$, que relaciona la orientación de cada marco de referencia local \mathcal{A}^j con el marco de referencia global

$$[\mathbf{T}_{\mathcal{A}^j\mathcal{E}}]_{lm} = \hat{\mathbf{A}}_l^j \cdot \hat{\mathbf{E}}_m, \quad l, m = 1, 2, 3. \quad (6)$$

2.4. Algoritmo para el cambio de forma

El procedimiento para obtener el cambio de forma del patrón de nervaduras se resume de la siguiente manera:

1. Definir la configuración de referencia de la NP y de las NS. Esto es, identificar: NM, NE, y secciones aerodinámicas del ala.
2. Definir los parámetros para el cambio de forma de cada nervadura.
3. Resolver la Ec. (3) para el cálculo de la coordenada en la dirección x del $\text{NM}_{n_{np}}$ en la configuración deformada de la NP.

4. Resolver la Ec. (4) para el cálculo de la coordenada en la dirección x de cada NE en la configuración deformada de la NP.
5. Ejecutar el algoritmo para el cambio de forma de las NS.
6. Aplicar la restricción de movimiento de las NS al movimiento de la NP.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se presentan 4 configuraciones geométricas obtenidas a partir de la implementación computacional del modelo del sistema de nervaduras presentado. Los casos de estudio corresponden a un ala rectangular de 10 m de semienvergadura y 1.5 m de cuerda. La NP se posiciona a un cuarto de la cuerda del ala medida desde el borde de ataque, y sobre ella se definen 5 NS distribuidas de manera equidistante. Para todas las configuraciones, la única NS que no admite cambios de geometría es la NS localizada en la raíz del ala. Cada NS constituye, a su vez, la línea media de un perfil aerodinámico NACA0012.

Para la configuración *I*, el cambio de forma del patrón de nervaduras, que se muestra en la Fig. 4, representa una configuración arbitraria de deformación. El cambio de forma de la NP ocurre en el plano formado por los versores $\hat{\mathbf{E}}_1$ y $\hat{\mathbf{E}}_3$ ($i = 3$). En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestran las *condiciones libres* y los *parámetros de morphing* utilizados.

i	h_1 [m]	θ_1 [°]	$h_{n_{np}}$ [m]	$\theta_{n_{np}}$ [°]
3	0.0	0.0	1.0	-10.0

Tabla 1: Configuración *I*. Valores de las *condiciones libres* de la NP.

Estación	h_A [m]	θ_A [°]	h_B [m]	θ_B [°]
1 (raíz)	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-0.28	-40.00	0.20	-16.00
3	0.00	-44.00	0.00	-44.00
4	0.00	44.00	0.00	-44.00
5 (puntera)	0.00	-44.00	0.00	44.00

Tabla 2: Configuración *I*. Valores de los *parámetros de morphing* de cada NS.

Para la configuración *II*, el cambio de forma del patrón de nervaduras, que se muestra en la Fig. 5, modela un cambio suave en la combadura de los perfiles a lo largo de la línea de envergadura. El cambio de forma de la NP ocurre en el plano formado por los versores $\hat{\mathbf{E}}_1$ y $\hat{\mathbf{E}}_3$ ($i = 3$). En la Tabla 3 y en la Tabla 4 se muestran las *condiciones libres* y los *parámetros de morphing* utilizados.

i	h_1 [m]	θ_1 [°]	$h_{n_{np}}$ [m]	$\theta_{n_{np}}$ [°]
3	0.0	0.0	2.0	0.0

Tabla 3: Configuración *II*. Valores de las *condiciones libres* de la NP.

Para la configuración *III*, el cambio de forma del patrón de nervaduras, que se muestra en la Fig. 6, modela un ala con flecha sin cambios en la geometría de los perfiles aerodinámicos. El cambio de forma de la NP ocurre en el plano formado por los versores $\hat{\mathbf{E}}_1$ y $\hat{\mathbf{E}}_2$ ($i = 2$).

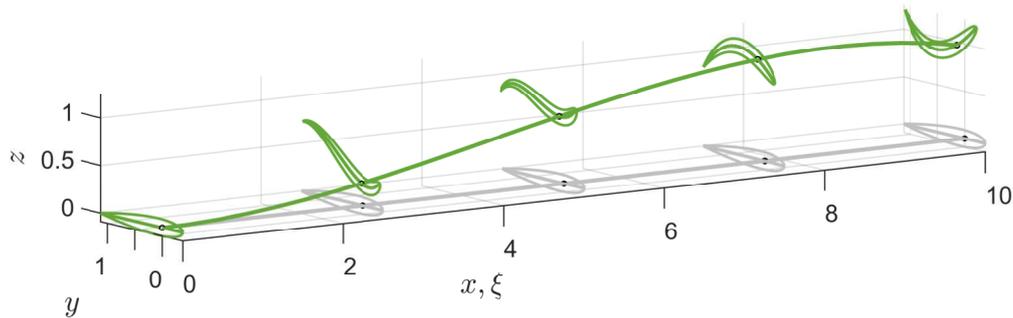


Figura 4: *Configuración I*. Cambio de forma del patrón de nervaduras y de los perfiles aerodinámicos. Configuración de referencia (color gris) y configuración deformada (color verde).

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 (puntera)	0.00	-20.00	0.00	20.00

Tabla 4: *Configuración II*. Valores de los *parámetros de morphing* de cada NS.

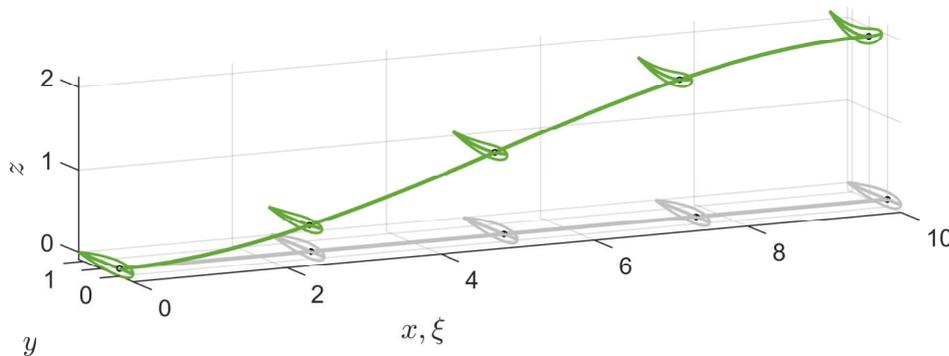


Figura 5: *Configuración II*. Cambio de forma del patrón de nervaduras y de los perfiles aerodinámicos. Configuración de referencia (color gris) y configuración deformada (color verde).

En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se muestran las *condiciones libres* y los *parámetros de morphing* utilizados.

i	h_1 [m]	θ_1 [°]	$h_{n_{np}}$ [m]	$\theta_{n_{np}}$ [°]
2	0.0	0.0	2.0	27

Tabla 5: *Configuración III*. Valores de las *condiciones libres* de la NP.

Para la configuración *IV*, el cambio de forma del patrón de nervaduras, que se muestra en la Fig. 7, modela un ala con torsión, sin deformación de la NP. Las NS muestran un cambio de orientación relativo con respecto de la NP sin alterar la geometría de los perfiles de la configuración de referencia. En la Tabla 7 y en la Tabla 8 se muestran las *condiciones libres* y los *parámetros de morphing* utilizados.

Estación	h_A [m]	θ_A [°]	h_B [m]	θ_B [°]
1 (raíz)	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5 (puntera)	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 6: Configuración III. Valores de los parámetros de morphing de cada NS.

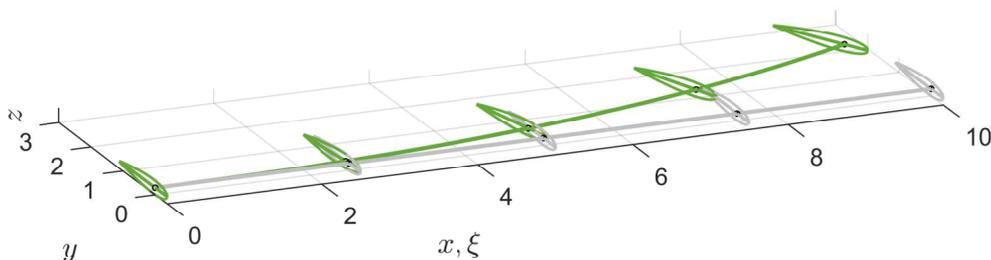


Figura 6: Configuración III. Cambio de forma del patrón de nervaduras y de los perfiles aerodinámicos. Configuración de referencia (color gris) y configuración deformada (color verde).

i	h_1 [m]	θ_1 [°]	$h_{n_{np}}$ [m]	$\theta_{n_{np}}$ [°]
-	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 7: Configuración IV. Valores de las condiciones libres de la NP.

Estación	h_A [m]	θ_A [°]	h_B [m]	θ_B [°]
1 (raíz)	$f(\theta_A)$	0.00	$f(\theta_B)$	0.00
2	$f(\theta_A)$	-5.00	$f(\theta_B)$	-5.00
3	$f(\theta_A)$	-10.00	$f(\theta_B)$	-10.00
4	$f(\theta_A)$	-15.00	$f(\theta_B)$	-15.00
5 (puntera)	$f(\theta_A)$	-20.00	$f(\theta_B)$	-20.00

Tabla 8: Configuración IV. Valores de los parámetros de morphing de cada NS.

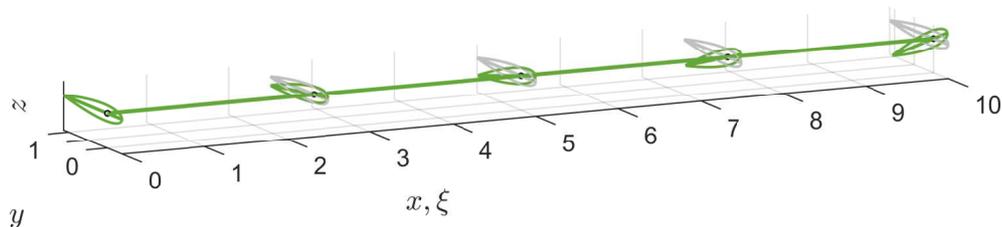


Figura 7: Configuración IV. Cambio de forma del patrón de nervaduras y de los perfiles aerodinámicos. Configuración de referencia (color gris) y configuración deformada (color verde).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un enfoque preliminar para modelar el cambio de forma de alas de aeronaves sin discontinuidades geométricas. Inspirado en las alas de algunos insectos y aves pequeñas, el modelo de ala propuesto está conformado por un patrón de nervaduras flexibles que da soporte y controla la forma de la superficie sustentadora. Este patrón se compone de una nervadura principal a la cual se vinculan rígidamente un conjunto de nervaduras secundarias. Cada nervadura se representa por una curva plana inextensible, cuya configuración deformada se obtiene mediante interpolación utilizando polinomios cúbicos de Hermite.

Los resultados numéricos demuestran la versatilidad del método para modelar adecuadamente cambios suaves en la configuración del patrón de nervaduras. Se verifica, además, que cada curva conserva su longitud de arco luego del cambio de forma. Este método permite modelar una amplia variedad de cambios de geometría, combinando cambios de forma a lo largo de la línea de envergadura y cambios de forma en las estaciones de los perfiles aerodinámicos.

Dentro de la misma línea de investigación, se prevé a futuro generalizar el método para modelar la nervadura principal como una curva inextensible tridimensional. Se prevé, además, utilizar las técnicas y herramientas numéricas desarrolladas en este esfuerzo para llevar a cabo investigaciones relacionadas al cambio de forma de plantas alares con diversos propósitos, tales como: control activo de sustentación a lo largo de la envergadura sin utilizar superficies móviles, reducción de la resistencia inducida y aumento de la efectividad del control de rolido en alas de gran envergadura mediante torsión aeroelástica adaptativa, incremento del rendimiento aerodinámico como consecuencia de la disminución de la intensidad y/o eliminación de los vórtices de puntera y de las estelas vorticosas inducidos por cambios geométricos dinámicos de la planta alar, entre otros.

REFERENCIAS

- Aichino A., Ribero S., Valdez M., y Preidikman S. Una formulación matemática robusta para el cambio de forma de perfiles aerodinámicos. 8:581–584, 2021.
- 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.
- Concilio A., Dimino I., Lecce L., y Pecora R. *Morphing wing technologies*. Elsevier, 2018.
- Quack M. *Closed-loop control of spanwise lift distribution for morphing wing applications*. [Online]. Available: <http://ecollection.library.ethz.ch/view/eth:47495>, 2014.