

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE APERTURA DE COFIA DE VEHÍCULOS LANZADORES

V. Acosta^a, J. Donati^a, M. Peyran^a, N. Leon^a y P. Ringegni^a

^a Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina.

Email: vicente.acosta@alu.ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo y verificación de un modelo dinámico que describe el evento de apertura de cofia de vehículos lanzadores. En primer lugar, se presenta el modelo matemático, desarrollado en función de distintos parámetros de entrada asociados al vehículo en estudio, al sistema de apertura y a las condiciones de vuelo. Luego, se emplea el modelo matemático con el fin de obtener resultados numéricos para casos de verificación particulares, que se comparan con resultados analíticos y con resultados provistos por un modelo de elementos finitos.

Palabras clave: DINÁMICA, APERTURA, COFIA, VEHÍCULO, LANZADOR.

INTRODUCCIÓN

La cofia del lanzador, elemento fundamental para la protección de la carga paga durante el vuelo atmosférico, es usualmente liberada en condiciones exoatmosféricas para reducir el peso y optimizar el uso de combustible y los costos de la misión [1]. Sin embargo, la apertura y liberación de la cofia resulta crítica para el desarrollo de la misión. Se debe asegurar que el evento transcurra cumpliendo ciertos requerimientos, para evitar posibles fallas en la apertura, colisiones entre la cofia y el resto del vehículo, o daños estructurales y de equipamiento, que deriven en el fracaso de la misión.

En este contexto, resulta fundamental contar con una herramienta para estudiar la dinámica de apertura de la cofia de forma tal de generar requerimientos para el sistema de apertura, o analizar el desarrollo del evento para determinados diseños. Por este motivo se desarrolló un modelo matemático que describe la dinámica de este evento, en función de las características particulares del vehículo, su sistema de apertura de cofia y las condiciones bajo las cuales se desarrolla.

El objetivo del trabajo es presentar el desarrollo del modelo matemático, sus hipótesis y su campo de aplicación, junto con las verificaciones realizadas para casos particulares con solución analítica y por un modelo FEM. El desarrollo de dicho modelo permite generar una herramienta de estudio, que resulta de utilidad para la evaluación del evento de apertura y liberación de cofia, y para la generación de requerimientos para el sistema de apertura.

METODOLOGÍA

El trabajo comprende el desarrollo de un modelo teórico para la dinámica de los cuerpos involucrados, así como también la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales del modelo para obtener datos de interés del evento de apertura. Se desarrolla un modelo dinámico de seis grados de libertad (6-DOF) por cuerpo, que considera al lanzador compuesto por un módulo (correspondiente a la etapa superior del vehículo) y dos semicofias. Dichos cuerpos interactúan a través de un sistema de apertura intermedio. El modelado se realiza teniendo en cuenta las siguientes hipótesis simplificativas:

- Los cuerpos involucrados se consideran indeformables.
- Las cargas aerodinámicas se consideran despreciables (condiciones exoatmosféricas).

El sistema de apertura considerado está conformado por un subsistema de impulso, compuesto por actuadores encargados de inducir la apertura, y un subsistema de retención, que incluye tuercas de retención y dos bisagras que vinculan al módulo con cada mitad de la cofia. Las ecuaciones diferenciales del modelo se resuelven numéricamente para obtener las variables que describen la evolución del evento en el tiempo, como las velocidades, aceleraciones y orientación de cada uno de los cuerpos. En

particular, se emplea el algoritmo ODE45, basado en los métodos de Runge-Kutta 4 y 5 para la resolución del sistema de ecuaciones.

Descripción del sistema

Se analiza un sistema de separación ubicado en el plano que divide al módulo de las semicofias (plano de separación). La ubicación de dicho plano relativa a los centros de masa del módulo (G_0) y de ambas semicofias (G_1 y G_2) se muestra en la Figura 1. Dicho sistema está conformado por dos subsistemas: el de retención-liberación y el de impulso.

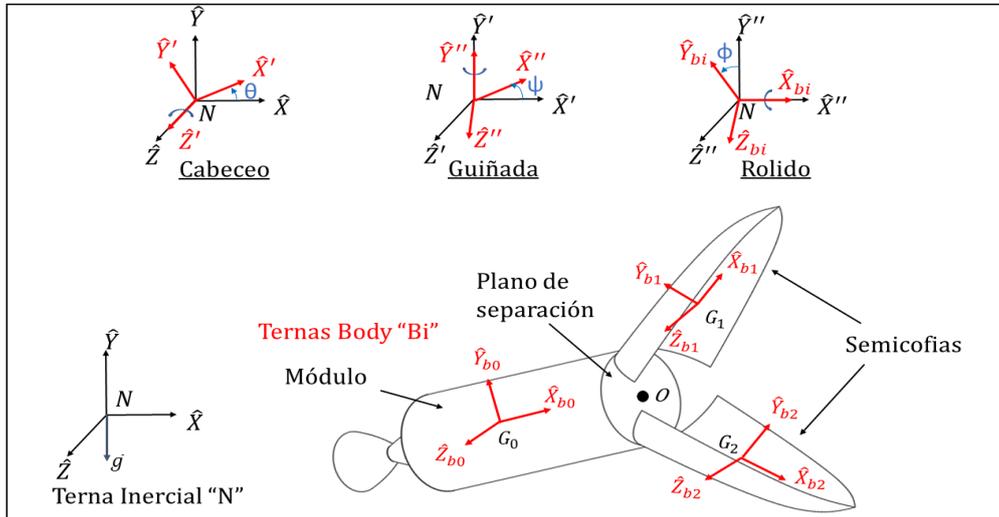


Figura 1. Cuerpos bajo análisis, sistemas de referencia y parámetros de orientación

El subsistema de retención-liberación está compuesto por una serie de tuercas que mantienen a las semicofias unidas entre sí, y sujetas al módulo, hasta el instante en que se liberan para dar inicio al del evento de apertura. A su vez, este consta de dos bisagras, cada una vinculando una semicofia al módulo, que permiten la rotación de las semicofias. El mecanismo de las bisagras, que se esquematiza en la Figura 2, es tal que las semicofias permanecen vinculadas hasta alcanzar un ángulo de apertura adecuado para su liberación. Este ángulo debe ser tal que, una vez liberadas por completo las semicofias, estas se alejen de forma segura sin correr riesgo de impacto con el módulo. En la Figura 2, además, se muestran las bisagras (B_i), ubicadas sobre la circunferencia de radio R que delimita el fuselaje del módulo. Adicionalmente, se presenta un esquema del mecanismo empleado en las bisagras, donde se visibiliza el ángulo de apertura de la i -ésima semicofia (γ_i), junto con el ángulo de liberación (γ_{max}).

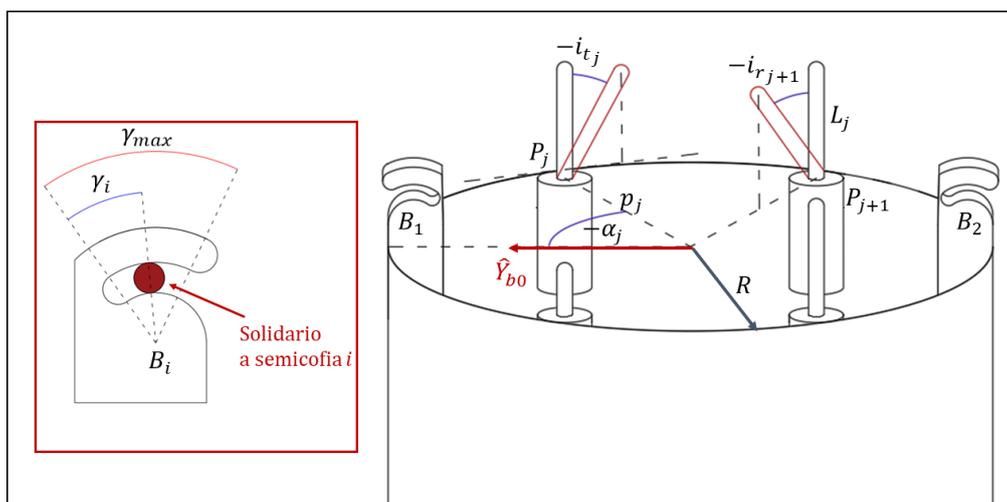


Figura 2. Configuración del sistema de apertura

Por su parte, el subsistema de impulso está compuesto por J actuadores solidarios al módulo, que tienen la función de impulsar las semicofias, haciéndolas rotar en torno a las bisagras para que, finalmente, estas sean liberadas con una velocidad relativa adecuada para evitar colisiones. El modelo se desarrolla considerando dos tipos posibles de actuadores: actuadores elasto-disipativos, que ejerzan fuerzas dependientes de su deformación y de su tasa de deformación, o actuadores de fuerza constante. En la Figura 2 se muestran los actuadores (P_j), junto con las variables que describen su posición radial (p_j) y angular (α_j). A su vez, se muestran en la Figura 2 los ángulos de inclinación radial (i_{rj}) y tangencial (i_{tj}) de los actuadores, que tiene como objetivo representar posibles desvíos constructivos.

El proceso de apertura consta de dos fases: la primera en la que cada mitad de cofia rota respecto a las bisagras ubicadas en su base; y la segunda fase en la que, luego de rotar un ángulo γ_{max} , la cofia deja de estar en contacto con la bisagra y se roto-traslada como un rígido en el espacio con una velocidad inicial que es función de la fuerza que proveen los actuadores, tal como muestra la Figura 3. A su vez, existe la posibilidad de que ambas semicofias no se liberen de la bisagra en el mismo instante, por lo cual podría existir una fase intermedia en la que solo una semicofia permanezca vinculada. De este modo, se establecerán distintos modelos dinámicos para las semicofias según el ángulo de apertura de cada una de ellas.

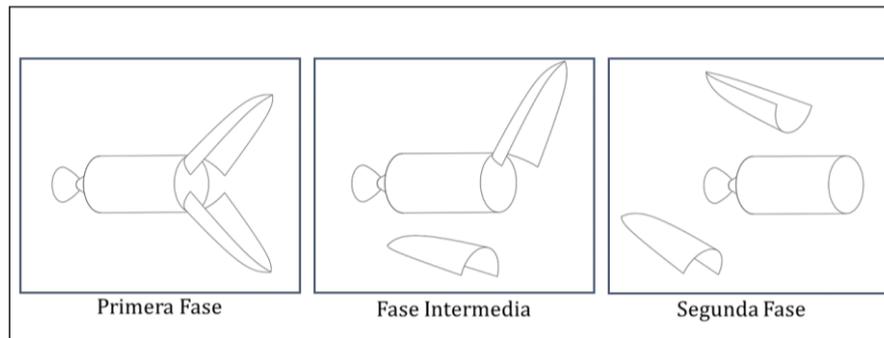


Figura 3. Fases del evento de apertura

La caracterización del lanzador y de los subsistemas de retención y liberación se realiza con la siguiente información:

- Las características inerciales del módulo y de cada semicofia (masa m_i , tensor de inercia respecto al centro de masas I_{G_i} , posición del centro de masas respecto al centro O del plano de separación $\overline{G_i - O}$).
 - La cantidad (J), posición radial (p_j) y angular (α_j) de los actuadores.
 - La inclinación radial y tangencial de cada actuador (i_{rj} e i_{tj}).
 - La rigidez (k_j), viscosidad lineal (μ_j), longitud natural (L_{n_j}) y longitud sólida (L_{s_j}) de cada actuador elasto-disipativo.
 - La magnitud de la fuerza (F_{s_j}) y el tiempo de accionamiento (t_s) de los actuadores de fuerza constante.
 - El ángulo de liberación (γ_{max}) de las semicofias.
 - El radio del fuselaje del vehículo (R), la longitud del módulo (l_m) y la geometría de las semicofias.
- A su vez, se definen las condiciones iniciales del evento de separación, siendo estas:
- La orientación inicial del vehículo.
 - La velocidad inicial del centro de masas del módulo.
 - La velocidad angular inicial del vehículo.
 - La altitud a la cual se desarrolla del evento.

Modelo dinámico

Para el estudio del evento de apertura se introducen cuatro sistemas de referencia. El primero de ellos ($\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$) es un sistema fijo respecto a la Tierra, con su eje \hat{Y} alineado con la vertical local al inicio de la separación y su origen ubicado en el centro del plano de separación en ese mismo instante. Los sistemas

restantes ($\hat{X}_{bi}, \hat{Y}_{bi}, \hat{Z}_{bi}$) son solidarios a cada cuerpo, y su orientación respecto a la terna inercial se determina empleando ángulos de Euler. Más precisamente, introduciendo los ángulos de guiñada (ψ_i), cabeceo (θ_i) y rolido (ϕ_i) se considera una secuencia de Euler 321 con ángulos de rotación θ_i , ψ_i y ϕ_i para cada cuerpo, tal como se presenta en la Figura 1.

A partir de estos ángulos de orientación se determinan las matrices de transformación de coordenadas desde la terna *inercial* a las ternas *cuerpo*, empleadas para el planteo de las ecuaciones del movimiento. En base al esquema de Euler definido, se obtienen las matrices antes mencionadas [2] a partir de la ecuación (1):

$$[\mathbf{B}_i \mathbf{N}] = \begin{bmatrix} \mathbf{c}\psi_i \mathbf{c}\theta_i & \mathbf{c}\psi_i \mathbf{s}\theta_i & -\mathbf{s}\psi_i \\ \mathbf{s}\phi_i \mathbf{s}\psi_i \mathbf{c}\theta_i - \mathbf{c}\phi_i \mathbf{s}\theta_i & \mathbf{s}\phi_i \mathbf{s}\psi_i \mathbf{s}\theta_i + \mathbf{c}\phi_i \mathbf{c}\theta_i & \mathbf{s}\phi_i \mathbf{c}\psi_i \\ \mathbf{c}\phi_i \mathbf{s}\psi_i \mathbf{c}\theta_i + \mathbf{s}\phi_i \mathbf{s}\theta_i & \mathbf{c}\phi_i \mathbf{s}\psi_i \mathbf{s}\theta_i - \mathbf{s}\phi_i \mathbf{c}\theta_i & \mathbf{c}\phi_i \mathbf{c}\psi_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las ecuaciones diferenciales que modelan la dinámica de los cuerpos involucrados corresponden a la primera y segunda ecuación cardinal para cuerpos rígidos. Tal como se mencionó anteriormente, las ecuaciones se plantean en las ternas *cuerpo*, obteniéndose el siguiente sistema para cada cuerpo (2):

$$\begin{cases} \mathbf{B}_i [\dot{\bar{v}}_i] = \begin{bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{w}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{m_i} \cdot \mathbf{B}_i [\bar{F}_i - \bar{\omega}_i \wedge \bar{v}_i] \\ \mathbf{B}_i [\dot{\bar{\omega}}_i] = \begin{bmatrix} \dot{p}_i \\ \dot{q}_i \\ \dot{r}_i \end{bmatrix} = \mathbf{B}_i [I_{Gi}]^{-1} \cdot \mathbf{B}_i [\bar{M}_i - \bar{\omega}_i \wedge ([I_{Gi}] \cdot \bar{\omega}_i)] \end{cases} \quad (2)$$

Aquí el subíndice i hace referencia al i -ésimo cuerpo, \bar{v} a la velocidad de su centro de masas, $\bar{\omega}$ a su velocidad angular, I_G a su tensor de inercia respecto a su centro de masas, m a su masa, \bar{F} y \bar{M} a la fuerza y momento resultante (respecto a su centro de masas), y el superíndice \mathbf{B}_i indica que todas las magnitudes tensoriales se expresan en las ternas *cuerpo*. La vinculación entre las ecuaciones cardinales y la orientación del cuerpo se establece empleando la ecuación diferencial cinemática [2], i.e. se plantea la ecuación (3):

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{\psi}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{c}\theta_i} \begin{bmatrix} \mathbf{c}\theta_i & -\mathbf{s}\theta_i \mathbf{c}\phi_i & \mathbf{s}\theta_i \mathbf{s}\phi_i \\ 0 & \mathbf{s}\phi_i \mathbf{c}\theta_i & \mathbf{c}\phi_i \mathbf{c}\theta_i \\ 0 & -\mathbf{c}\phi_i & \mathbf{s}\phi_i \end{bmatrix} \cdot \mathbf{B}_i [\bar{\omega}_i] \quad (3)$$

A su vez, se incluye en el modelo el cálculo de la posición $\overline{G_i - N}$ de los centros de masas de cada cuerpo respecto al origen de la terna inercial, a través de la integración de la velocidad transformada a la terna inercial (4):

$${}^N \left[\overline{G_i - N} \right] = [\mathbf{B}_i \mathbf{N}]^T \cdot \mathbf{B}_i [\bar{v}_i] \quad (4)$$

Respecto a las fuerzas activas intervinientes, se considera la fuerza gravitatoria, el empuje remanente sobre el módulo y las fuerzas ejercidas por cada actuador del subsistema de separación. La primera de estas se determina empleando la ley de gravitación universal de Newton, considerando una Tierra esférica de masa m_T y radio r_T , junto con una altitud H del evento de separación, y se asume alineada con la vertical local (5):

$$\mathbf{B}_i [\bar{F}_{g_i}] = [\mathbf{B}_i \mathbf{N}] \cdot \frac{G \cdot m_T \cdot m_i}{(H + r_T)^2} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por su parte, el empuje remanente se modela como una fuerza de magnitud constante (E) que actúa sobre el módulo, en dirección de su eje longitudinal, i.e. (6):

$$\mathbf{B}_0 [\bar{F}_e] = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las fuerzas de separación se caracterizan a través de su magnitud $F_{S_j}(t)$, que dependerá de la naturaleza de los actuadores considerados. En el caso de actuadores de fuerza constante, dicha magnitud puede describirse mediante (7):

$$F_{S_j}(t) = \begin{cases} F_{S_j} & \text{si } t \in [0, t_s] \\ 0 & \text{si } t > t_s, \end{cases} \quad (7)$$

Por su parte, la magnitud de la fuerza ejercida por los actuadores elastodisipativos se construye en términos de su rigidez (k_j), su viscosidad lineal (μ_j), su longitud natural (L_{n_j}), su longitud sólida (L_{S_j}), su extensión instantánea $L_j(t)$ y su tasa de elongación $\dot{L}_j(t)$ a través de (8):

$$F_{S_j}(t) = \begin{cases} k_j \cdot (L_{n_j} - L_j(t) - L_{S_j}) - \mu_j \cdot \dot{L}_j(t) & \text{si } L_j(t) < L_{n_j} - L_{S_j} \\ 0 & \text{si } L_j(t) > L_{n_j} - L_{S_j} \end{cases} \quad (8)$$

Nótese que la extensión de cada actuador se determina asumiendo que su extremo superior permanece en contacto con la semicofia durante la totalidad de la primera fase de apertura, por lo cual es función de su posición y del ángulo de apertura de la semicofia que impulsa. Dicho ángulo de apertura surge del análisis de la orientación relativa entre cada semicofia y el módulo, y puede determinarse teniendo en cuenta la expresión (9):

$$\cos \gamma_i = \hat{x}_{b_i} \cdot \hat{x}_{b_0} = [\mathbf{B}_i \mathbf{B}_0]_{(1,1)} \quad (9)$$

Para definir por completo a las fuerzas de separación, resta caracterizar su dirección. La orientación de los actuadores respecto al módulo se define a través de los ángulos de inclinación (i_{t_j} e i_{r_j}) y la posición angular del actuador (α_j), mostrados en la Figura 2. En consecuencia, las coordenadas de la fuerza ejercida por cada actuador en la terna cuerpo del módulo resultan (10):

$$\mathbf{B}_0[\bar{F}_{j_0}] = -F_{S_j} \cdot \begin{bmatrix} c i_{t_j} c i_{r_j} \\ c i_{t_j} s i_{r_j} c \alpha_j - s i_{t_j} s \alpha_j \\ c i_{t_j} s i_{r_j} s \alpha_j + s i_{t_j} c \alpha_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

Luego, las coordenadas de las fuerzas ejercidas sobre las semicofias en sus respectivas terna cuerpo se determinan en virtud del principio de acción y reacción (11):

$$\mathbf{B}_i[\bar{F}_{j_i}] = -[\mathbf{B}_i \mathbf{N}] \cdot [\mathbf{B}_0 \mathbf{N}]^T \cdot \mathbf{B}_0[\bar{F}_{j_0}] \quad (11)$$

A diferencia de la fuerza gravitatoria, que actúa en los centros de masa de cada cuerpo, las fuerzas de separación generan momentos respecto a dichos puntos. Considerando la posición de cada actuador respecto al centro de masas del módulo, dada por el vector $\overline{P_j - G_0}$, los momentos sobre el módulo (12) y sobre cada semicofia (13) se determinan mediante:

$$\mathbf{B}_0[\bar{M}_{j_0}] = \mathbf{B}_0[\overline{P_j - G_0} \wedge \bar{F}_{j_0}] \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_i[\bar{M}_{j_i}] = \mathbf{B}_i[(\overline{G_0 - N} - \overline{G_i - N} + \overline{P_j - G_0}) \wedge \bar{F}_{j_i}], \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

Hasta este punto no se han considerado las restricciones de vínculo y, en consecuencia, las reacciones dinámicas que generan las bisagras, que se describen seguidamente. En primer lugar, las bisagras imponen que los puntos que vinculan deben tener misma velocidad durante toda la fase de apertura. Empleando la ley de variación de velocidades para cuerpos rígidos, se determina que, mientras la i -ésima semicofia permanezca vinculada, su campo de velocidades y el del módulo se relacionan mediante (14):

$$\bar{v}_0 + \bar{\omega}_0 \wedge \overline{B_1 - G_0} = \bar{v}_i + \bar{\omega}_i \wedge \overline{B_1 - G_i} \quad (14)$$

En segundo lugar, mientras cada semicofia permanezca vinculada al módulo, las bisagras solo permiten la rotación relativa a lo largo del eje \hat{Z}_{b0} . Esto implica que, mientras la i -ésima semicofia permanezca vinculada, su velocidad angular y del módulo solo puede diferir en su componente según el eje \hat{Z}_{b0} (15):

$${}^{B_0}[\bar{\omega}_i] = \begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \\ r_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

Cabe destacar que las bisagras ejercen fuerzas y momentos reactivos de manera tal que se cumplan las condiciones de vinculación anteriores. Estas fuerzas (\bar{F}_{B_i}) y momentos (\bar{M}_{B_i}) son incógnitas adicionales en el problema que se determinan resolviendo las ecuaciones diferenciales del movimiento junto con las ecuaciones de vinculación. Si bien las fuerzas reactivas pueden tomar cualquier dirección, por lo cual cada una de ellas implica tres incógnitas escalares, la vinculación es tal que los momentos reactivos no restringen la rotación alrededor del eje \hat{Z}_b , por lo cual debe cumplirse (16):

$${}^{B_0}[\bar{M}_{B_i}] \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

A su vez, se remarca que las fuerzas generan momentos respecto a los centros de masa de cada etapa, que deben ser contemplados en la segunda ecuación cardinal, y se determinan en función de la posición de cada bisagra respecto a los centros de masa, de manera análoga a lo presentado para los momentos ejercidos por las fuerzas de separación.

Para finalizar con la caracterización del modelo dinámico, se destaca que el modelo dinámico debe adaptarse a las fases del evento de apertura que fueron presentadas con anterioridad, y se esquematizan en la Figura 3. Durante la primera fase, mientras ambas semicofias permanecen vinculadas, se aplican las ecuaciones del modelo sobre cada cuerpo tal como fueron descriptas anteriormente, teniendo en cuenta todas las fuerzas activas, reactivas y condiciones de vínculo. La segunda fase inicia una vez que ambas semicofias se liberan, por lo cual se eliminan del sistema las fuerzas de separación, las condiciones de vinculación y las reacciones dinámicas. Adicionalmente, en caso de que exista la fase intermedia, se mantienen las condiciones de vínculo y fuerzas activas que afectan a la semicofia vinculada, y se eliminan las asociadas a la semicofia libre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo dinámico antes presentado comprende las ecuaciones diferenciales del movimiento para la dinámica de seis grados de libertad de tres cuerpos rígidos, acopladas debido a la existencia de fuerzas de separación internas, condiciones de vínculo y, consecuentemente, reacciones dinámicas internas. Con el objetivo de verificar el modelo desarrollado, junto con la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que comprende, se propone la comparación de resultados con casos particulares de análisis, donde se reducen los grados de libertad y para los cuales la resolución puede lograrse mediante métodos analíticos, a través del empleo de métodos numéricos sobre los sistemas de ecuaciones reducidos, o empleando modelos FEM.

El primer caso de verificación, esquematizado en la Figura 4, inicia con el lanzador alineado con la vertical local, trasladándose sin rotar en dirección vertical, bajo las siguientes condiciones:

- El centro de masas del módulo se ubica sobre el eje longitudinal del lanzador, y su terna cuerpo es principal de inercia.
- Se emplean cuatro actuadores de fuerza constante, uniformemente distribuidos sobre una circunferencia cuyo centro pertenece al eje longitudinal del lanzador.
- Las semicofias son simétricas, y su masa es despreciable frente a la masa del módulo (por debajo del 1% de la masa del módulo).
- El empuje remanente contrarresta el peso y las fuerzas activas de separación que se ejercen sobre el módulo.

Bajo estas condiciones, el evento de apertura posee una simetría tal que no se esperan variaciones en la orientación del módulo, y las semicofias desarrollan rotaciones de apertura en espejo. A su vez, dado que la suma de fuerzas activas sobre el módulo es nula, se esperan bajas aceleraciones ocasionadas únicamente por las fuerzas reactivas ejercidas por las bisagras.

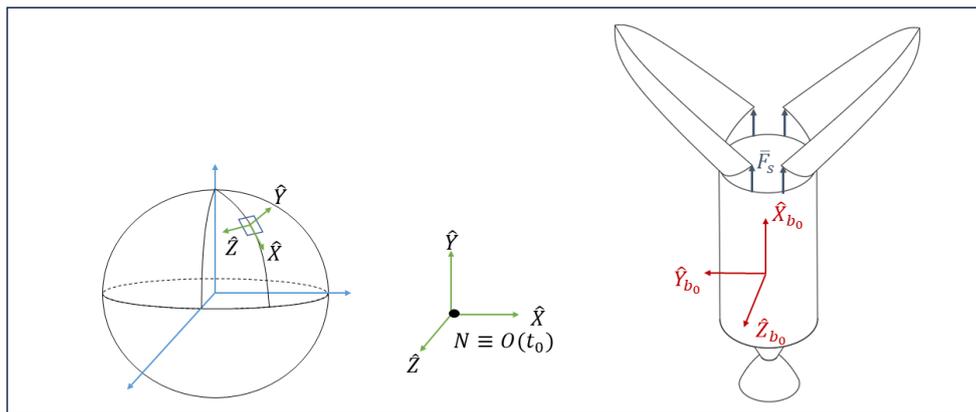


Figura 4. Primer caso de verificación

En base a esta última observación, y teniendo en cuenta que la inercia del módulo es ampliamente superior a la de las semicofias, se propone un modelo simplificado en el que el módulo se traslada sin rotar a velocidad constante. Luego, la dinámica de cada semicofia queda desacoplada, pues se corresponde con el movimiento rotatorio de un cuerpo rígido en torno a una articulación que se desplaza a velocidad constante. Este modelo simplificado permite caracterizar el evento de apertura por completo a partir de la resolución de una única ecuación diferencial de segundo orden para el ángulo de apertura de una de las semicofias.

Los resultados numéricos obtenidos a partir del modelo simplificado, que desprecia las reacciones dinámicas sobre el módulo, se comparan con los obtenidos para el modelo completo en la Figura 5. Tal como fue mencionado anteriormente, no se observan variaciones en la orientación del módulo, y el comportamiento de las semicofias es simétrico. Los resultados obtenidos a partir de ambos métodos de análisis son concordantes, y se determinan errores porcentuales relativos que no superan el 0.2%.

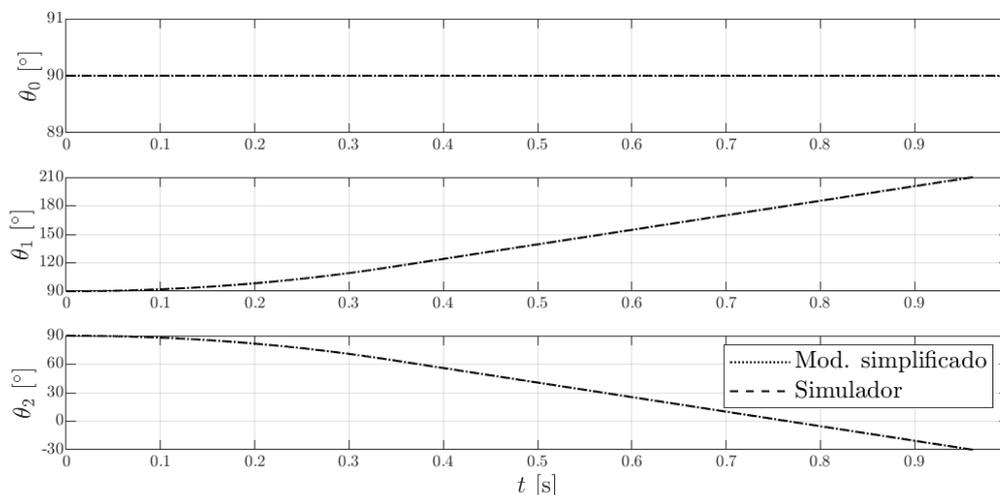


Figura 5. Comparación de resultados para el primer caso de verificación

Habiendo verificado un caso con simetría, se propone un segundo caso de verificación en que la magnitud de la fuerza de separación ejercida sobre cada semicofia difiere, tal como se esquematiza en la Figura 6. En particular, se propone un caso en el que:

- El centro de masas del módulo se ubica sobre el eje longitudinal del lanzador, y su terna cuerpo es principal de inercia.
- Las semicofias son simétricas.
- El lanzador inicia el evento de apertura sobre el plano $\hat{X}\hat{Y}$ de la terna inercial, con una inclinación de 30° respecto a la horizontal.
- Se emplean cuatro actuadores de fuerza constante, distribuidos de forma simétrica respecto al plano $\hat{X}\hat{Y}$ de la terna inercial. La fuerza ejercida por los dos actuadores que inciden sobre la semicofia superior dobla en magnitud a la fuerza ejercida por los actuadores restantes.

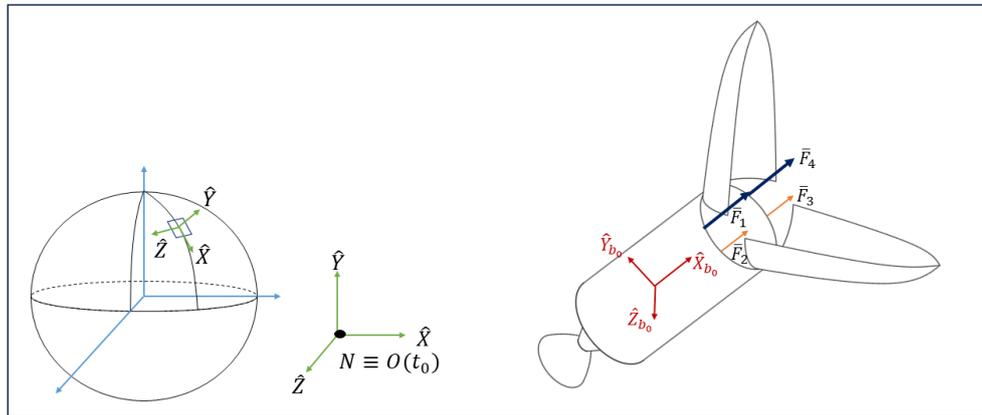


Figura 6. Segundo caso de verificación

Dada la diferencia en la fuerza de separación ejercida sobre cada semicofia, se espera que el proceso de apertura de cada una de estas difiera, conservando la simetría respecto al plano $\hat{X}\hat{Y}$. De este modo, las magnitudes cinemáticas que representan movimientos fuera del plano de simetría deberán resultar nulas. A su vez, este caso es útil para verificar las tres fases de apertura, pues el evento inicia con las dos semicofias vinculadas, pero su liberación se realiza en forma escalonada debido a la diferencia en el impulso recibido por cada una. Teniendo en cuenta que la dinámica de los tres cuerpos se ve acoplada en este caso, se comparan los resultados de la simulación con los obtenidos a partir de un modelo FEM. Dicha comparación se muestra en la Figura 7, donde se observa que ambos métodos predicen variaciones en la orientación de los tres cuerpos, con errores porcentuales relativos que no superan el 0.3%.

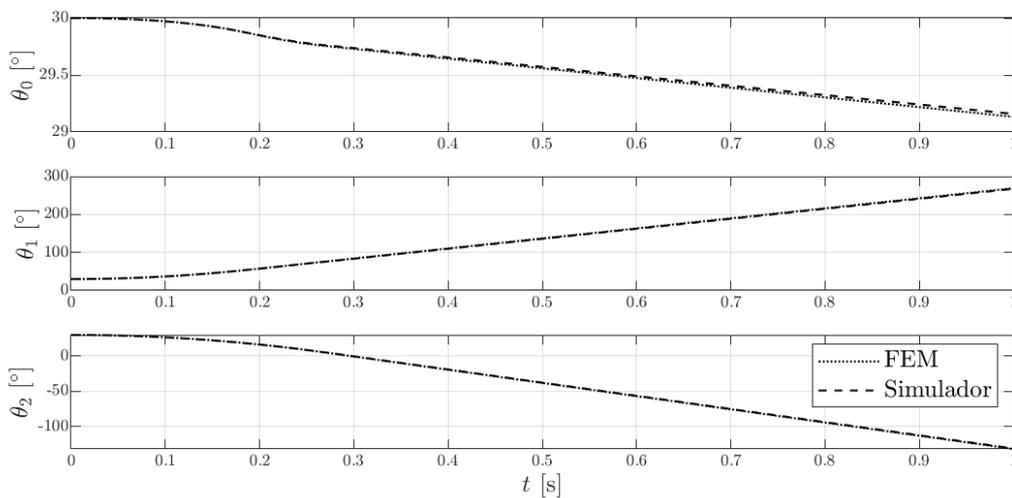


Figura 7. Comparación de resultados para el segundo caso de verificación

CONCLUSIONES

El evento de apertura de cofia es una instancia crítica de cualquier misión espacial que busque la inyección orbital de cargas pagas, debido a que su falla podría ocasionar daños en la integridad del vehículo y de la carga paga que transporta. En este trabajo se ha presentado el modelado teórico de la dinámica del evento y la verificación de los resultados obtenidos a partir del estudio de casos particulares. Se concluye que el modelo responde de forma adecuada en los casos analizados, constituyendo así una herramienta útil para el diseño preliminar del vehículo y, en particular, del sistema de apertura que emplea.

REFERENCIAS

1. Cheng, S. C. (1999). Payload fairing separation dynamics. *Journal of Spacecraft and Rockets*.
2. Hanspeter Schaub (2003). *Analytical mechanics of space systems*. AIAA education series.