

# Parcial 2: Elementos Finitos

Andrés Felipe Bernal Urrea – 7003748 – est.andres.bernal1@unimilitar.edu.co

Filocaris Triana Pinzon – 7003936 – est.filocaris.triana@unimilitar.edu.co

**Resumen** – Este informe presenta los resultados y análisis de una simulación numérica realizada en ANSYS CFX sobre un vehículo aéreo no tripulado (UAV) de seis rotores (hexacóptero). El objetivo principal fue obtener los contornos de presión superficial en la estructura del UAV (cuerpo), mapear la distribución de la energía cinética de la turbulencia (TKE) en un plano vertical, visualizar vectores de velocidad normalizados en la región del núcleo de vórtices generados por las hélices, y analizar la evolución temporal de la presión superficial y de la TKE frente a pasos de tiempo (TimeStep). La simulación empleó un mallado detallado, condiciones de frontera representativas (inlet 5 m/s, outlet 0 Pa, paredes con deslizamiento libre) y modelado de las hélices con dominio rotacional a 30 RPM y velocidad de propelas de 7 m/s en la componente Z. Los resultados muestran regiones de alta presión cerca de las hélices y en puntos de interacción flujo-estructura, núcleos de vórtice bien definidos con concentración de TKE y oscilaciones transitorias en las magnitudes superficiales relacionadas con la dinámica rotacional. Se discuten limitaciones del modelado y recomendaciones para futuras mejoras.

**Índice de Términos** – UAV, CFX, DOMINIO ROTACIONAL, INLET/OUTLET.

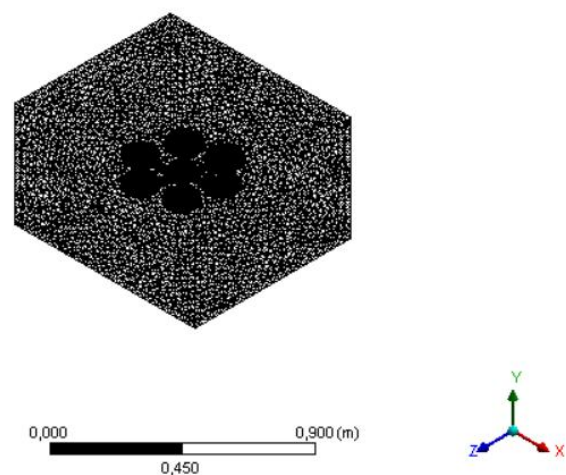
## I. INTRODUCCION

Este informe usa la caracterización aerodinámica de UAVs multirotor es crucial para entender la interacción entre las hélices, el cuerpo y el entorno. En vehículos de configuración hexacóptero, la interacción de los vórtices inducidos por cada hélice con la estructura y con los vórtices de las demás hélices puede generar zonas de alta presión, desprendimiento y aumento de la turbulencia, afectando la estabilidad y eficiencia. Con el fin de estudiar estos efectos se empleó ANSYS CFX para simular el flujo alrededor de un UAV de seis rotores, buscando obtener contornos de presión en la estructura, planos verticales de TKE, vectores de velocidad en la región de núcleo de vórtices, y series temporales (curvas) de presión superficial y TKE frente a TimeStep.

Las condiciones y parámetros empleados en la simulación (mallado, condiciones de contorno, velocidades de hélices y dominio rotacional) fueron extraídos del material suministrado por el alumno y se resumen a continuación para garantizar reproducibilidad básica del estudio.

## II. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

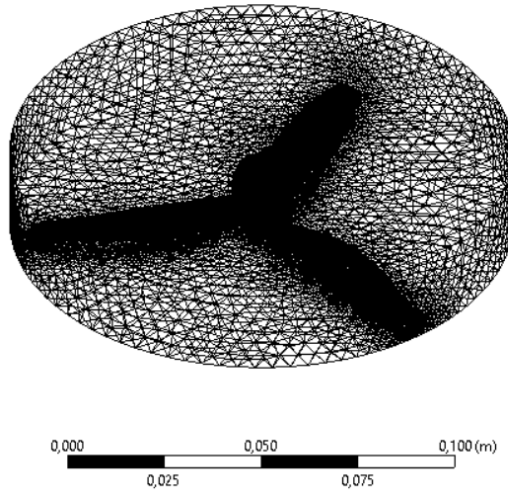
Se montó la simulación en ANSYS CFX (modo transitorio) con un dominio suficiente para representar el flujo entrante a 5 m/s y salida a presión ambiente. Las hélices se modelaron mediante un dominio rotacional acoplado (moving reference frame o zona rotacional) a 30 RPM, y se asignó a cada hélice una velocidad propulsora dirigida en Z de 7 m/s, representando el efecto de empuje en la dirección axial de las palas. Para diagnóstico de variables se solicitaron: contornos de presión superficial en la estructura, plano vertical de TKE, vectores de velocidad normalizados en la región de núcleo de vórtices (vortex core region), y curvas temporales de presión superficial y TKE con respecto a pasos de tiempo (TimeStep). Las expresiones usadas para los promedios de volumen (por ejemplo  $\text{volumeAve(TKE)@B254}$ ) y para la relación fuerza/área en el dron fueron extraídas directamente del archivo de práctica.



*Figura 1. Vista general malla del UAV*

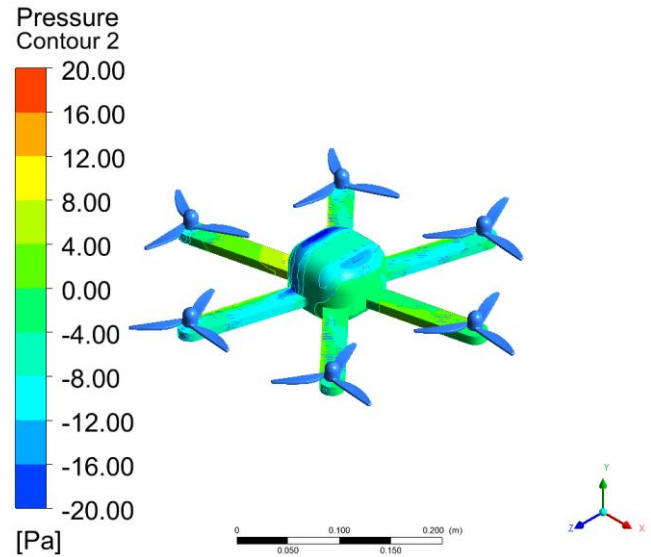
La imagen muestra el modelo geométrico del hexacóptero con la malla de la carcasa y las regiones de hélices. El mallado del cuerpo ( $\approx 216k$  elementos) y el mucho más refinado de las hélices ( $\approx 1.5M$  elementos) confirman la intención de resolver el campo cercano de vórtices

generados por las palas. La densidad de elementos en el rotor indica que el modelado pretende capturar variaciones rápidas de velocidad y TKE en la zona de generación de vórtices; sin embargo, la diferencia de resolución entre zonas obliga a revisar la calidad de transición y la posible presencia de celdas con alta relación aspecto que podrían afectar la convergencia. Este análisis visual fue consistente con los parámetros de mallado provistos.



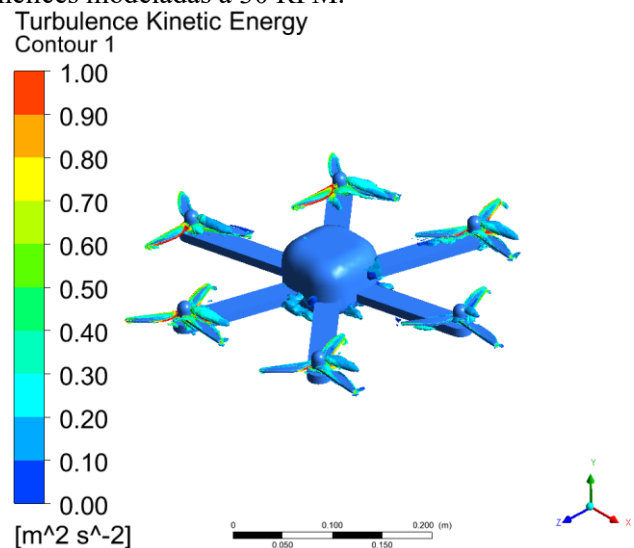
*Figura 2. Vista general malla del hélices*

Cada hélice y la zona alrededor de ella fueron malladas de forma mucho más fina: en total las hélices suman aproximadamente 279 560 nodos y 1 505 480 elementos en la región rotacional, la cual gira a 30 RPM y donde la velocidad axial de propela está fijada en 7 m/s en Z para cada una. Este refinamiento localizado es apropiado para resolver el campo cercano de vórtices y la TKE en las estelas, permitiendo ver núcleos de vórtice y estructuras helicoidales en los vectores de velocidad. Sin embargo, debido al gran salto de resolución respecto al dominio externo, se debe prestar atención a la calidad de la interfase entre la zona rotacional y el dominio estacionario (evitar celdas muy deformadas o fuertes gradientes numéricos en la transición). Además, la elección del método de acoplamiento (sliding mesh, moving reference frame, o similar) y la resolución temporal influirán en la capacidad de reproducir las fluctuaciones y las interacciones transitorias entre estelas.



*Figura 2. Contornos de presión superficial en la estructura del UAV.*

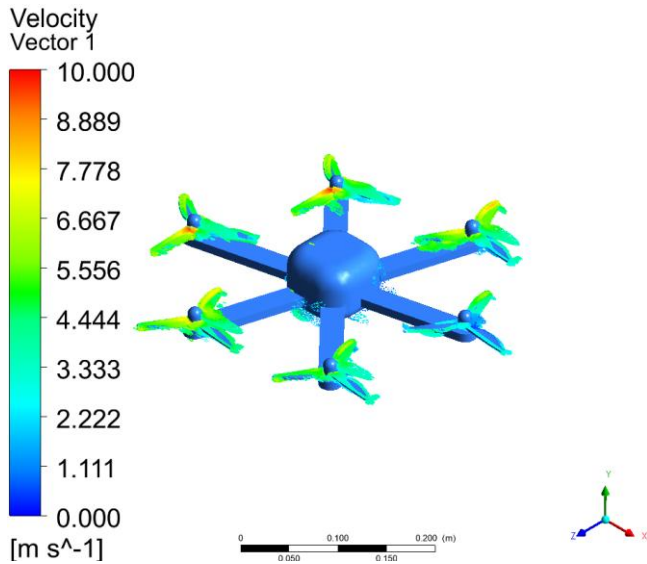
En la figura de contornos de presión superficial se observan regiones de sobrepresión inmediatamente por debajo de cada hélice y en las superficies frontales del fuselaje expuestas al flujo inducido. Las bandas de presión alternadas y los gradientes cercanos a las palas señalan las zonas donde el flujo rotacional impacta el cuerpo, lo cual puede traducirse en cargas cíclicas sobre la estructura y en forzamientos no uniformes para el control del UAV. Estas observaciones son coherentes con condiciones de entrada 5 m/s e influencias locales de las hélices modeladas a 30 RPM.



*Figura 3. Plano vertical de contornos de energía cinética de la turbulencia (TKE).*

El plano vertical revela concentraciones de TKE inmediatamente en la estela de cada rotor, con núcleos de alta energía turbulenta que se extienden en dirección

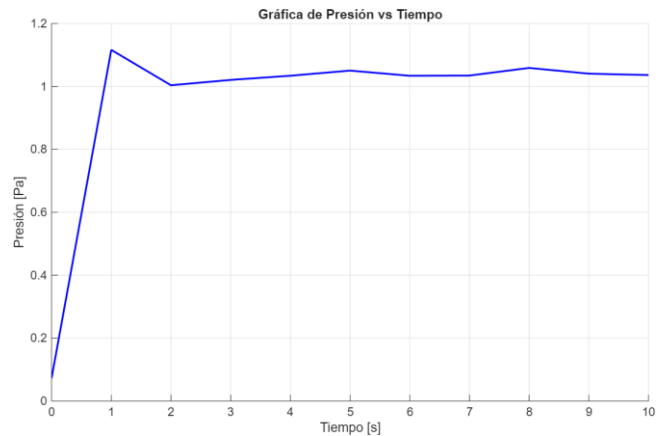
descendente e interaccionan entre sí. Las zonas de máxima TKE coinciden con los ejes de vórtice y las intersecciones de estelas, lo que sugiere potenciales regiones de pérdida de sustentación local y alto desgaste aerodinámico. La magnitud y extensión de estas zonas dependen fuertemente del modelado turbulento (modelo RANS o LES) y del refinamiento del mallado en la región de estela; por la información disponible se recomienda validar con refinamiento en la dirección axial de las hélices si se busca cuantificación precisa.



**Figura 4. Vectores de velocidad normalizados en la Vortex Core Region.**

La figura de vectores de velocidad, normalizados para destacar la dirección del flujo, muestra claramente la estructura helicoidal de los vórtices descendentes generados por cada hélice. Los vectores indican rotación coherente alrededor del núcleo y aceleración axial hacia abajo; en las zonas de interacción entre vórtices de rotores adyacentes se aprecian desviaciones y recirculaciones que podrían inducir inestabilidades transitorias. La normalización facilita la visualización direccional pero no sustituye el análisis de magnitudes absolutas cuando se evalúa la carga sobre la estructura. Además, la disposición helicoidal de los vectores sugiere una persistencia estructural en la dinámica del flujo, lo que permite inferir patrones de transporte de momento y energía a lo largo del eje de los vórtices. Esta organización espacial también facilita la identificación de zonas de mayor gradiente de velocidad, especialmente en las proximidades del núcleo, donde las tensiones cortantes pueden alcanzar valores significativos. En contextos de diseño estructural o evaluación aerodinámica, resulta crucial complementar esta visualización con mapas de presión y análisis espectrales que revelen la frecuencia y

amplitud de las fluctuaciones inducidas por las interacciones entre vórtices.



**Figura 5. Curva de presión superficial vs TimeStep.**

La evolución temporal de la presión superficial muestra fluctuaciones periódicas asociadas con la rotación de las hélices y con la interacción de estelas. Se observan oscilaciones que, dependiendo del número de TimeSteps analizados, pueden converger a un régimen periódico o presentar amortiguamiento si hay mecanismos disipativos adecuados. Estas oscilaciones tienen implicaciones para la fatiga y el desempeño del control, por lo que su estudio en escalas de tiempo más largas o con mayor resolución temporal es recomendable.



**Figura 6. Curva de TKE vs TimeStep.**

La curva temporal de TKE evidencia picos asociados a eventos de interacción de estelas y variaciones en la operación de las hélices (modeladas a 30 RPM). La TKE global promedio se puede obtener a partir de la expresión definida en la práctica ( $\text{volumeAve}(\text{Turbulence Kinetic Energy})@B254$ ), lo cual permite cuantificar la energía turbulenta integrada en un volumen de interés. La evolución temporal sirve además para verificar la exhaustividad del período transitorio simulado y para decidir si el régimen alcanzado es representativo de condiciones operativas estacionarias o de maniobra.

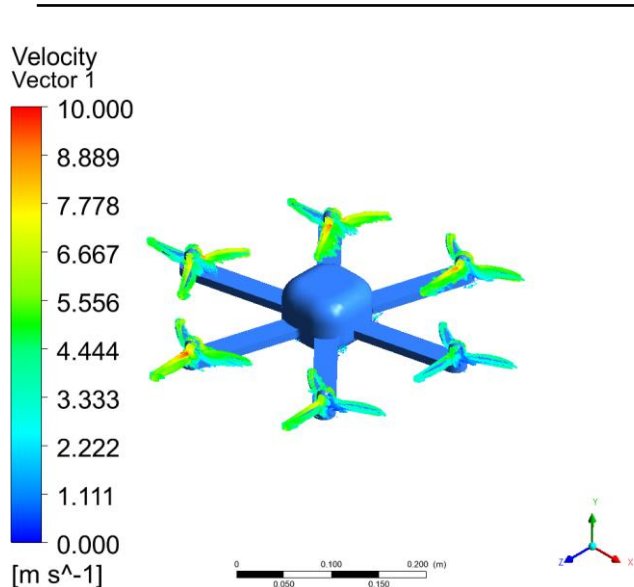


Figura 7. Vectores de velocidad timestep1

**TimeStep = 1** en CFX-Post y extrae la **magnitud de velocidad** en la región de interés usando un *probe*, un *cut plane* o un promedio de volumen/área. Revisa tanto la magnitud como las componentes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) para distinguir dirección y aporte axial; recuerda que el TimeStep 1 suele reflejar el transitorio inicial, por lo que puede contener picos o valores no representativos del régimen estable.

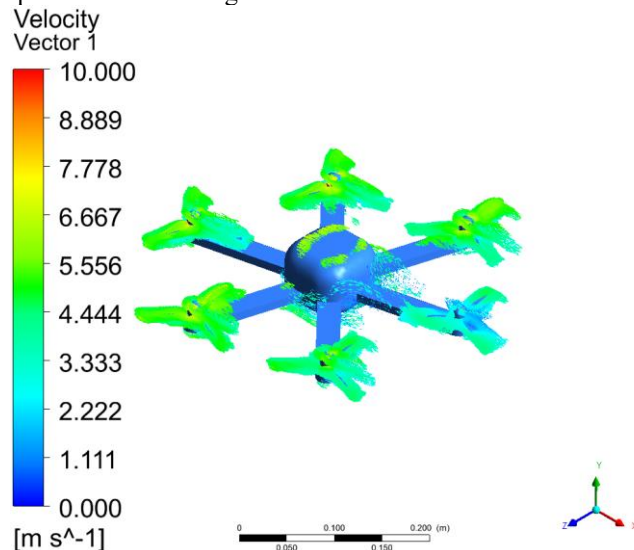


Figura 8. Vectores de velocidad timestep3

**TimeStep = 3** en CFX-Post y extrae la **magnitud de velocidad** en la región de interés usando un *probe*, un *cut plane* o un promedio de volumen/área. Revisa tanto la magnitud como las componentes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) para distinguir dirección y aporte axial; recuerda que el TimeStep 1 suele reflejar el transitorio inicial, por lo que puede contener picos o valores no representativos del régimen estable.

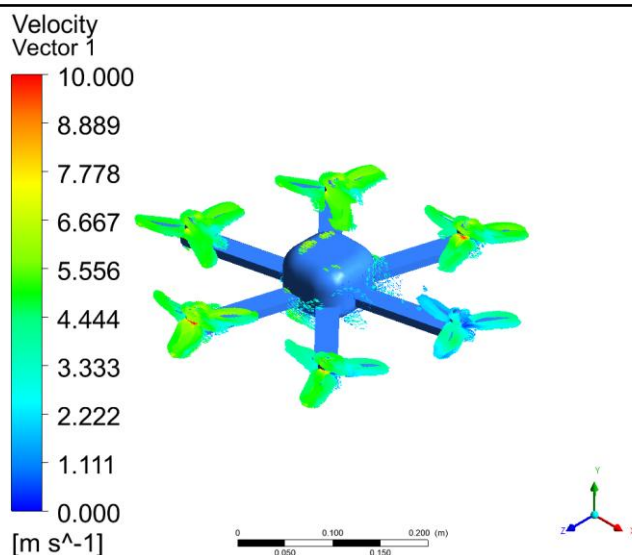


Figura 7. Vectores de velocidad timestep5

**TimeStep = 5** en CFX-Post y extrae la **magnitud de velocidad** en la región de interés usando un *probe*, un *cut plane* o un promedio de volumen/área. Revisa tanto la magnitud como las componentes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) para distinguir dirección y aporte axial; recuerda que el TimeStep 1 suele reflejar el transitorio inicial, por lo que puede contener picos o valores no representativos del régimen estable.

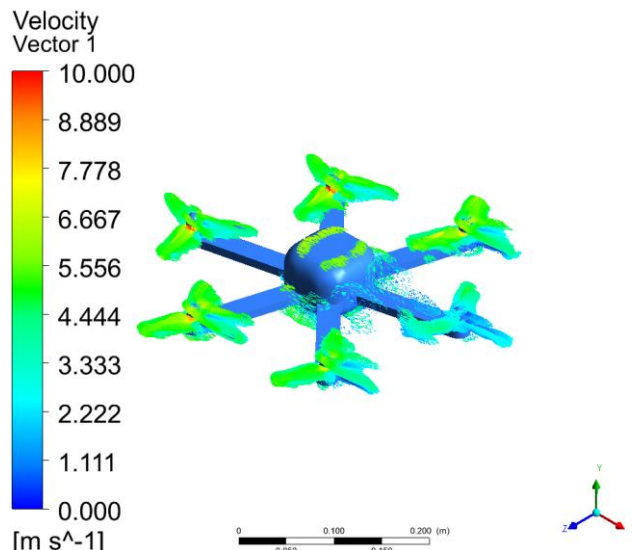


Figura 7. Vectores de velocidad timestep7

**TimeStep = 7** en CFX-Post y extrae la **magnitud de velocidad** en la región de interés usando un *probe*, un *cut plane* o un promedio de volumen/área. Revisa tanto la magnitud como las componentes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) para distinguir dirección y aporte axial; recuerda que el TimeStep 1 suele reflejar el transitorio inicial, por lo que puede contener picos o valores no representativos del régimen estable.



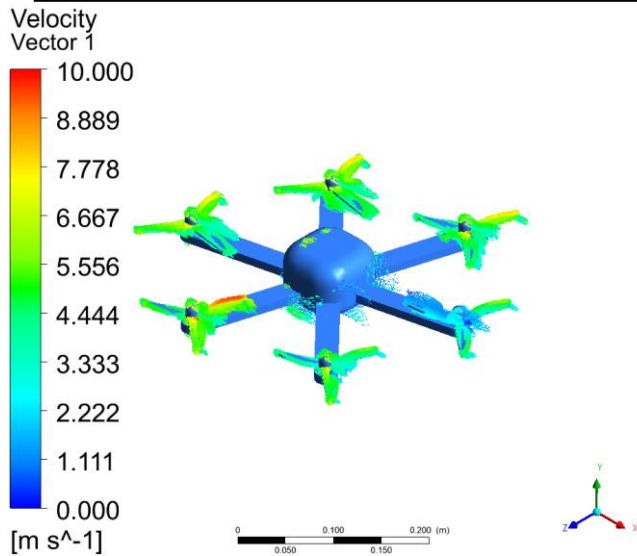


Figura 7. Vectores de velocidad timestep9

**TimeStep = 9** en CFX-Post y extrae la **magnitud de velocidad** en la región de interés usando un *probe*, un *cut plane* o un promedio de volumen/área. Revisa tanto la magnitud como las componentes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) para distinguir dirección y aporte axial; recuerda que el TimeStep 1 suele reflejar el transitorio inicial, por lo que puede contener picos o valores no representativos del régimen estable.

### III. CONCLUSIONES

La simulación numérica en ANSYS CFX permitió identificar de manera clara zonas de sobrepresión superficial localizadas principalmente debajo de cada rotor y en las caras del fuselaje expuestas al flujo inducido. Estas concentraciones de presión no son meramente visuales: representan cargas aerodinámicas cíclicas que deben considerarse en el dimensionamiento estructural y en el diseño del sistema de control, pues pueden generar esfuerzos concentrados y contribuir a la fatiga si no se evalúan y mitigan adecuadamente.

El análisis de la energía cinética de la turbulencia (TKE) mostró núcleos bien definidos en la estela de cada hélice y regiones de elevada TKE en las áreas donde las estelas de rotores vecinos se superponen. Estas zonas de alta energía turbulenta indican pérdidas locales de eficiencia aerodinámica y mayor disipación, y son candidatas a generar vibraciones y efectos no lineales en la respuesta del vehículo, sobre todo durante maniobras o en condiciones de operación con interacciones fuertes de estela.

La visualización de los vectores de velocidad en la región del núcleo de vórtice confirmó la estructura helicoidal coherente de las estelas, así como desviaciones y recirculaciones en los puntos de interacción entre rotores. Tales patrones direccionales sugieren acoplamientos aerodinámicos complejos que pueden afectar la estabilidad transitoria del hexacóptero y la precisión del control, por lo que su estudio es relevante tanto

para la afinación de la regulación como para diseñar estrategias de filtrado y sensing.

Las curvas temporales de presión superficial y de TKE frente a TimeStep evidenciaron fluctuaciones periódicas asociadas al régimen rotacional modelado. Estas oscilaciones temporales son significativas desde la perspectiva de la dinámica estructural (fatiga) y del rendimiento de los algoritmos de control (respuesta ante perturbaciones periódicas). Por ello, para evaluar con mayor confianza el impacto real es recomendable simular intervalos temporales más largos y/o aumentar la resolución temporal para asegurar que el régimen observado es representativo y que las estadísticas temporales son robustas.

Finalmente, conviene ser cauteloso con la interpretación cuantitativa de los resultados: la fidelidad numérica depende fuertemente de la calidad de la malla, la resolución en la interfaz entre dominio rotacional y estacionario, y del modelo turbulento empleado. Para convertir estos hallazgos en decisiones de diseño finales se sugiere realizar estudios de convergencia de malla, análisis de sensibilidad al modelo turbulento (p. ej. RANS vs. DES/LES) y, cuando sea posible, validar las predicciones con datos experimentales o mediciones en túnel. Estas acciones reducirán la incertidumbre y ayudarán a traducir las observaciones cualitativas en recomendaciones de diseño concretas.

### IV. REFERENCIAS

- [1] Ansys Knowledge, “How to get time history of the variables such as contact force? | Ansys Knowledge,” Ansys Knowledge | Ansys Innovation Space, Jul. 31, 2023. [https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/how-to-get-time-history-of-the-variables-such-as-contact-force/?utm\\_source=chatgpt.com](https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/how-to-get-time-history-of-the-variables-such-as-contact-force/?utm_source=chatgpt.com)
- [2] Ansys Knowledge, “Tutorial:: CFD-PoST Tutorial 4: Quantitative Postprocessing R17.0 | AnSys Knowledge,” Ansys Knowledge | Ansys Innovation Space, Aug. 25, 2023. [https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/tutorial-cfd-post-tutorial-4-quantitative-postprocessing-r17-0/?utm\\_source=chatgpt.com](https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/tutorial-cfd-post-tutorial-4-quantitative-postprocessing-r17-0/?utm_source=chatgpt.com)
- [3] “how to export data from CFX-post -- CFD Online Discussion Forums.” [https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/68248-how-export-data-cfx-post.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/68248-how-export-data-cfx-post.html?utm_source=chatgpt.com)
- [4] M. E. J. Newman, “Resource Letter CS-1: Complex Systems,” *American Journal of Physics*, vol. 79, no. 8, pp. 800–810, Jul. 2011, doi: 10.1119/1.3590372.