

# Parcial Final Elementos Finitos: Los diez mandamientos.

Bernal Andrés F. - 7003748, Triana Filocaris – 7003936.

**Resumen—** El presente informe recopila y analiza diez simulaciones numéricas desarrolladas mediante diferentes plataformas de modelado computacional (ANSYS, MATLAB y SolidWorks), con el propósito de evaluar el comportamiento estructural, térmico, electromagnético, fluidodinámico y de impacto en sistemas de diversa naturaleza. Todas las simulaciones se fundamentan en la aplicación del método de los elementos finitos (FEM) y, en los casos pertinentes, del método de volúmenes finitos (FVM) para el análisis de fluidos.

En primera instancia, se efectuó una simulación mecánica estática de un puente colgante bajo la acción combinada del peso de una tractomula y la presión de vientos laterales, seguida de un estudio bidimensional de deformaciones y esfuerzos en un perfil tipo “I” sometido a una carga de 50 toneladas. En el ámbito térmico, se modeló la distribución de temperatura en un sistema culinario representado por una olla de aluminio conteniendo un caldo de costilla, mientras que en el campo electromagnético se analizó el comportamiento magnetostática de un par de bobinas de Helmholtz destinadas a la estimulación muscular del antebrazo.

El estudio fluidodinámico se abordó en cuatro simulaciones: el flujo tránsito alrededor de un helicóptero tipo Apache con dominios rotativos; el comportamiento multifase de una boquilla de aspersión de fertilizante sobre plantas de tomate; la respuesta aerodinámica tránsito de un aerogenerador HAWT, con obtención de la curva de torque en función del tiempo; y la separación de fases en un ciclón industrial. Asimismo, se realizó una simulación de impacto de un vehículo Fórmula 1 contra un muro de contención, y una comparación electromagnética entre la sección radar (RCS) de una aeronave C130 y un misil Exocet.

El conjunto de simulaciones permitió evidenciar la versatilidad de las herramientas de análisis numérico para modelar fenómenos complejos en ingeniería civil, mecánica, térmica, electromagnética y aeroespacial. Los resultados obtenidos contribuyen a la comprensión de los campos de esfuerzo, deformación, flujo, temperatura y campo magnético en sistemas reales, validando la eficacia de la simulación computacional como recurso complementario al ensayo físico en el proceso de diseño y optimización ingenieril.

**Palabras Claves—**Elementos Finitos, Dinámica de Fluidos Computacional, Simulación Multifísica, Modelado 3D, ANSYS – MATLAB – SolidWorks.

## I. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de las simulaciones presentadas en este informe se emplearon diversas herramientas de análisis numérico, orientadas al estudio de fenómenos físicos bajo distintos dominios de la ingeniería. Cada plataforma se seleccionó en función del tipo de fenómeno a modelar y de la precisión requerida en la resolución de las ecuaciones gobernantes. Entre las herramientas utilizadas se destacan ANSYS Workbench, MATLAB y SolidWorks, programas

ampliamente reconocidos por su capacidad de integrar modelado geométrico, mallado y resolución mediante el método de los elementos finitos (FEM) y el método de volúmenes finitos (FVM).

Estas aplicaciones permiten abordar problemas estructurales, térmicos, electromagnéticos y fluidodinámicos, proporcionando resultados que facilitan la visualización de esfuerzos, temperaturas, campos magnéticos, presiones o velocidades en sistemas complejos. Su uso coordinado no solo favorece la comprensión de los fenómenos físicos, sino que también optimiza los procesos de diseño, validación y toma de decisiones en ingeniería moderna.

### 1) ANSYS Workbench

ANSYS Workbench es una plataforma integrada de simulación por elementos finitos (FEM) y volúmenes finitos (FVM) desarrollada para el análisis, diseño y optimización de sistemas complejos en ingeniería. Su entorno modular permite la interacción entre distintos tipos de análisis —estructural, térmico, electromagnético y fluidodinámico—, facilitando el estudio multifísico de componentes y ensamblajes en condiciones reales de operación.

En este proyecto, ANSYS fue una herramienta central debido a su capacidad de resolver problemas en tres dimensiones (3D) con alta precisión y de integrar simultáneamente diferentes dominios físicos. Las simulaciones realizadas mediante esta plataforma abarcaron los siguientes tipos de análisis:

- Análisis mecánico estático:

Utilizado para determinar deformaciones, esfuerzos y desplazamientos en el puente colgante sometido a cargas vehiculares y vientos laterales.

- Análisis térmico estacionario:

Aplicado al estudio del caldo de costilla en una olla de aluminio, para obtener la distribución de temperaturas y gradientes térmicos en un sistema de conducción y convección de calor.

- Análisis magnetostática:

Empleado en la simulación de las bobinas de Helmholtz para estimar la intensidad del campo magnético generado sobre el antebrazo durante la estimulación muscular.

- Análisis CFD tránsito (ANSYS CFX):

Desarrollado para modelar fenómenos de flujo no estacionario, como el flujo alrededor del helicóptero Apache con dominios rotativos y el aerogenerador HAWT para la obtención de la curva de torque en función del tiempo.

- Análisis CFD multifase:

Implementado en la boquilla de aspersión de fertilizante líquido, para simular la interacción entre fases líquida y gaseosa durante el proceso de pulverización.

- Análisis de impacto y colisión dinámica:

Ejecutado en la colisión del vehículo Fórmula 1 contra el muro de contención, donde se evaluó la respuesta estructural y la disipación de energía cinética durante el choque.

En conjunto, los análisis efectuados en ANSYS permitieron abordar la mayoría de los fenómenos físicos del proyecto, demostrando la versatilidad de esta plataforma para la simulación multifísica en entornos tridimensionales.

## 2) *Matlab*

MATLAB (Matrix Laboratory) es un entorno de programación de alto nivel orientado al cálculo numérico, la visualización científica y el análisis de datos. Desarrollado por MathWorks, se fundamenta en el manejo matricial y la implementación de algoritmos de ingeniería y ciencias aplicadas. Su estructura modular permite realizar simulaciones mediante herramientas específicas, como PDEtool (Partial Differential Equation Toolbox) para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales por métodos numéricos, y Pofacets, destinada al modelado electromagnético basado en superficies facetadas.

En el marco de este proyecto, MATLAB se utilizó para el desarrollo de dos tipos de simulaciones complementarias a las realizadas en ANSYS:

- Simulación estructural mediante PDEtool:

Se modeló el comportamiento mecánico de un perfil tipo "I" de acero sometido a una carga distribuida equivalente a 50 toneladas. La herramienta permitió resolver las ecuaciones de elasticidad en dos dimensiones (2D), obteniendo la distribución de esfuerzos principales, deformaciones y desplazamientos en la viga. Esta simulación constituyó un ejercicio de validación teórica del análisis estructural mediante elementos finitos.

- Simulación electromagnética mediante Pofacets:

Se llevó a cabo la comparación del Radar Cross Section (RCS) entre una aeronave C130 y un misil Exocet, empleando un modelo de reflexión electromagnética sobre superficies facetadas. Este enfoque permitió estimar la capacidad de detección radar de ambos objetos bajo determinadas condiciones geométricas y angulares, aportando una perspectiva aplicada al campo de la ingeniería electromagnética y la defensa.

Gracias a su flexibilidad matemática y a la posibilidad de personalizar los algoritmos de simulación, MATLAB se consolidó como una herramienta complementaria a ANSYS, útil para análisis conceptuales, estudios bidimensionales y simulaciones electromagnéticas simplificadas con enfoque computacional.

## 3) *SolidWorks*

SolidWorks es una plataforma de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis computacional (CAE) ampliamente utilizada en ingeniería mecánica, manufactura y diseño industrial. Desarrollada por Dassault Systèmes, integra herramientas de modelado paramétrico en tres dimensiones con módulos de simulación estructural, térmica y fluidodinámica. En particular, el complemento SolidWorks Flow Simulation permite realizar análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) basados en el método de los volúmenes finitos (FVM), posibilitando la evaluación del comportamiento de fluidos en interacción con geometrías complejas.

Dentro del desarrollo de este proyecto, SolidWorks fue empleado para la simulación tridimensional de un ciclón separador, dispositivo utilizado para la separación de partículas sólidas suspendidas en un flujo gaseoso. Mediante Flow Simulation, se establecieron las condiciones de frontera de entrada y salida, así como los parámetros de turbulencia y presión, con el fin de analizar la trayectoria de las partículas, la distribución de velocidades y la eficiencia de separación del sistema.

El uso de SolidWorks permitió combinar la precisión geométrica del modelado CAD con la capacidad analítica del CFD, facilitando una representación realista del fenómeno y sirviendo como puente entre el diseño mecánico y la validación numérica de dispositivos de ingeniería.

## II. COMPETENCIAS PARA DESARROLLAR

El desarrollo de las simulaciones propuestas permite fortalecer competencias analíticas y técnicas en el uso de herramientas de ingeniería asistida por computadora, orientadas al modelado y resolución de fenómenos físicos complejos. Entre las principales habilidades a desarrollar se destacan la interpretación de resultados numéricos, la formulación de modelos físicos mediante ecuaciones diferenciales, el manejo de software de simulación multifísica (ANSYS, MATLAB y SolidWorks), así como la capacidad de análisis crítico para la validación y optimización de diseños ingenieriles. Estas competencias son fundamentales para la integración del conocimiento teórico con la práctica profesional en ingeniería moderna.

### III. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

I) Simulación mecánica estática de puente colgante ante peso de tractomula y presión de vientos laterales en 3D. (ANSYS).

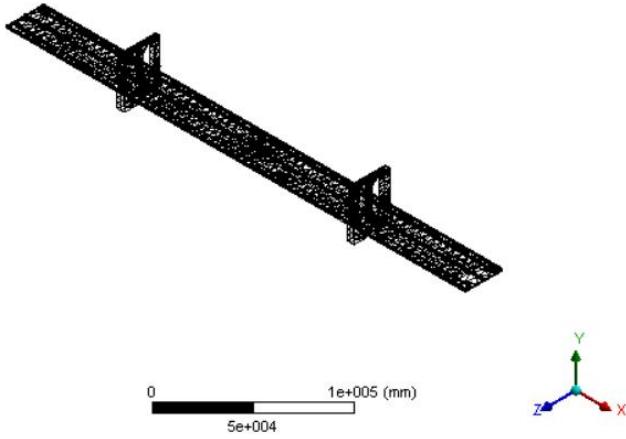


Figura 1. Malla puente

Para esta simulación se generó un mallado tridimensional compuesto por 33,665 nodos y 17,345 elementos, optimizado para representar con fidelidad las características geométricas del modelo sin comprometer la eficiencia computacional. Se utilizó una estrategia de mallado estructurado en las zonas regulares y mallado libre en áreas de geometría compleja, logrando un equilibrio entre resolución local y tiempo de cálculo. La densidad del mallado fue suficiente para capturar los gradientes de esfuerzo y deformación sin generar sobrecarga en el solver, permitiendo una simulación estable y representativa del fenómeno físico.

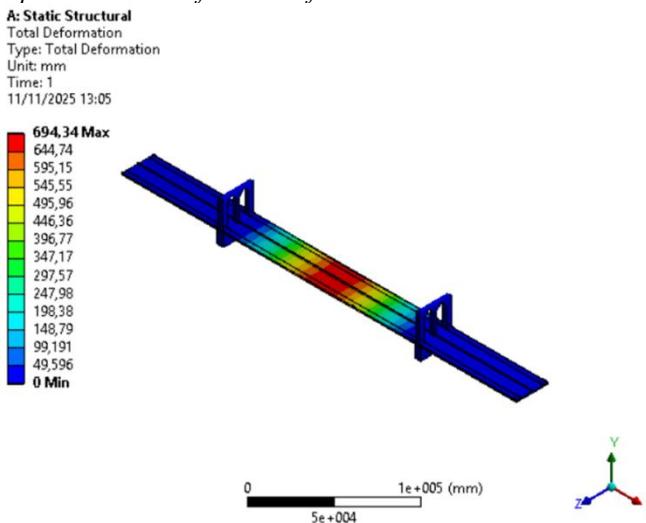


Figura 2. Deformación total del puente

En esta simulación se analizó el comportamiento estructural de un puente colgante sometido a la carga concentrada de una tractomula en la sección central y a una presión lateral de viento aplicada de forma uniforme sobre el tablero. El modelo

tridimensional incluyó cables principales, tirantes y tablero con materiales elasto-plásticos. El análisis permitió visualizar las zonas críticas de deformación y esfuerzos de Von Mises, evidenciando una mayor concentración en los puntos de anclaje y en la superficie de contacto con las cargas vehiculares.

**A: Static Structural**  
Equivalent Elastic Strain  
Type: Equivalent Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
11/11/2025 13:06

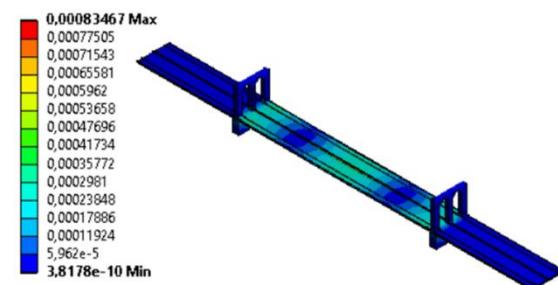


Figura 3. Deformación elástica equivalente

En esta simulación se evaluó el comportamiento estructural de un puente colgante bajo la acción combinada de una carga concentrada, generada por una tractomula ubicada en la sección central del tablero, y una presión lateral de viento aplicada de forma uniforme. El modelo tridimensional incluyó cables principales, tirantes y tablero, todos definidos con propiedades elasto-plásticas. El análisis se centró en la distribución de la deformación elástica equivalente, permitiendo identificar las zonas con mayor acumulación de energía deformación. Los resultados mostraron concentraciones significativas en los puntos de anclaje de los cables y en las áreas de contacto directo con las cargas vehiculares, lo que indica regiones susceptibles a fatiga estructural y posibles mecanismos de falla por deformación acumulada.

**A: Static Structural**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
11/11/2025 13:06

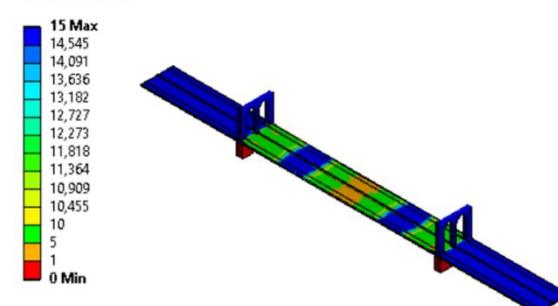


Figura 4. Factor de seguridad

En esta simulación se analizó el comportamiento estructural de un puente colgante sometido a dos cargas principales: una carga concentrada generada por una tractomula ubicada en la sección central del tablero, y una presión lateral de viento aplicada de forma uniforme. El modelo tridimensional incluyó cables principales, tirantes y tablero, todos definidos con propiedades elasto-plásticas. El análisis se centró en la distribución del factor de seguridad, permitiendo identificar zonas con mayor vulnerabilidad estructural. Los resultados mostraron un valor máximo de 15 en regiones no solicitadas, mientras que en el área de contacto con la tractomula se registró un valor de 11.3, indicando una zona de alta exigencia mecánica pero aún dentro de márgenes aceptables de resistencia.

*2) Simulación de deformación y esfuerzos de perfil tipo "I" para viga de acero al aplicarle un peso de 50 Ton (MATLAB-PDEtool) 2D.*

Para el análisis de la deformación y los esfuerzos en el perfil tipo "I" se emplea MATLAB junto con su Partial Differential Equation Toolbox (PDE Toolbox), que permite modelar problemas de elasticidad lineal en configuraciones bidimensionales mediante formulaciones de plane stress o plane strain. PDE Toolbox facilita la creación geométrica programática del perfil, la generación de mallado adaptativo, la asignación de propiedades materiales (módulo de Young, coeficiente de Poisson) y la aplicación de condiciones de contorno y cargas distribuidas. Su entorno programable resulta idóneo para estudios paramétricos y de verificación, además de permitir la visualización de desplazamientos, esfuerzos (incluyendo esfuerzos de von Mises) y la exportación de datos para validación o posprocesamiento adicional.

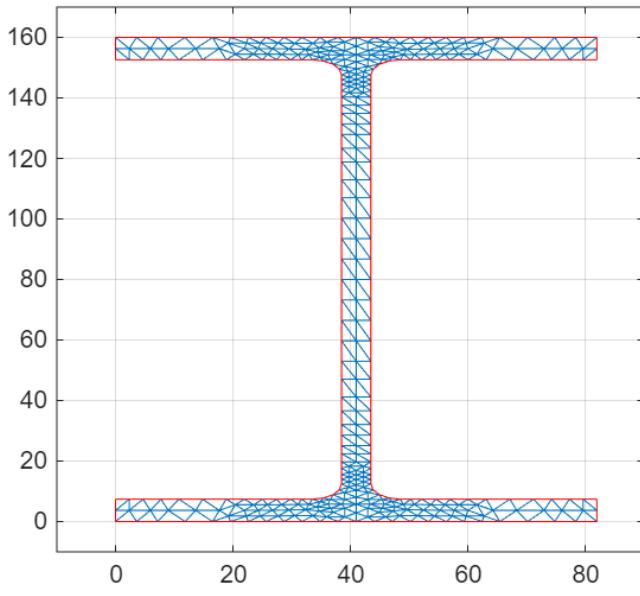


Figura 5. Modelo y enmallado perfil I IPN 160

En la figura anterior, se muestra el enmallado realizado con la herramienta PDE de Matlab, con las configuraciones estándar de un perfil I IPN 160, con estos datos se procede a realizar el

post procesamiento de la información, aplicando una fuerza desde la parte superior del perfil.

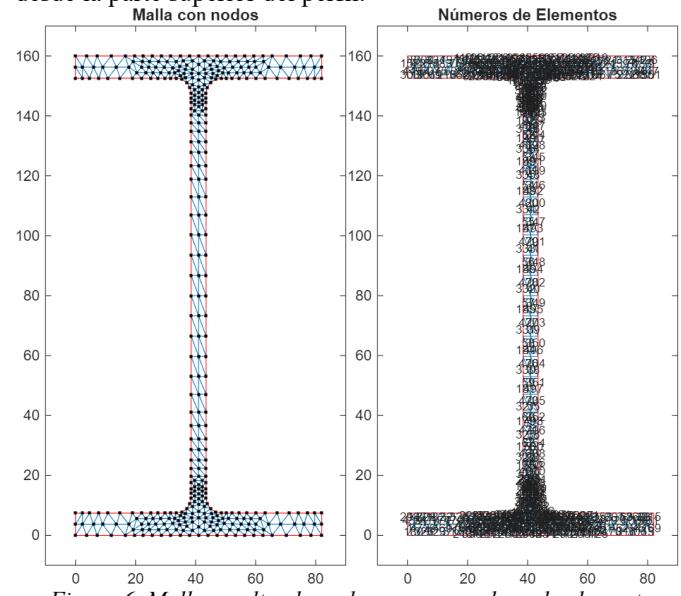


Figura 6. Malla resaltando nodos y numerando cada elemento

En la figura anterior, se aprecia la caracterización de la malla obtenida mediante el PDETool, con esta numeración y caracterización se obtuvieron las siguientes representaciones:

En la siguiente figura, se aprecia los concentradores de esfuerzo sobre el eje X del perfil I, notando que la parte superior es la que mayor esfuerzo presenta, aunque no es crítico ni elevado:

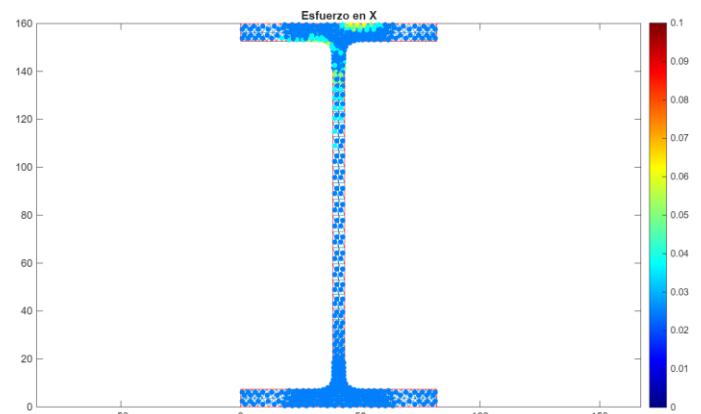


Figura 7. Esfuerzo soportando por el perfil sobre el eje X.

Por otra parte, la siguiente figura nos permite ver el esfuerzo realizado sobre el eje I en el eje Y, notando que la fuerza no parece estar completamente distribuida en la parte superior del perfil:

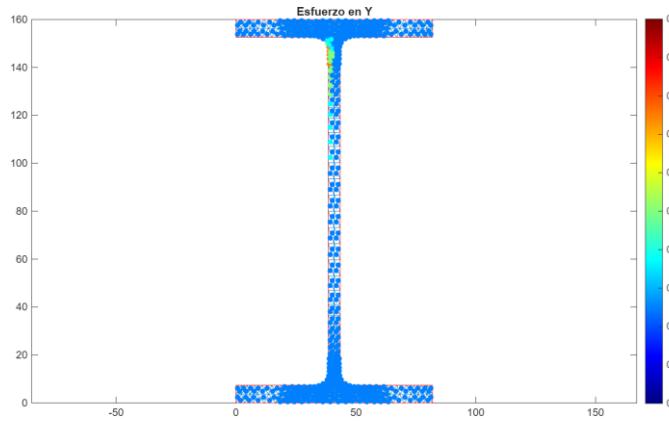


Figura 8. Esfuerzo presente en el Eje Y

Para finalizar con la parte de esfuerzo, se muestra a continuación la suma de las gráficas anteriores, donde se aprecia el esfuerzo total en el plano XY, esto nos muestra mejor la distribución del esfuerzo en el perfil, ya que las figuras anteriores pueden llevar a conclusiones erróneas:

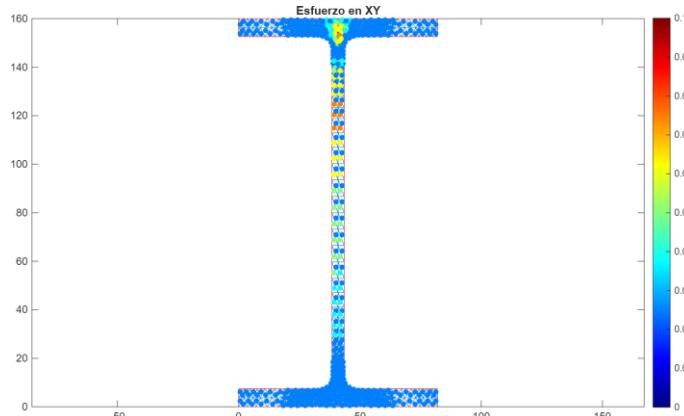


Figura 9. Esfuerzo total del perfil I en el plano XY.

Ahora, se mostrarán los resultados correspondientes a la deformación, en la siguiente figura, se puede apreciar la deformación de cada uno de los nodos en el eje X:

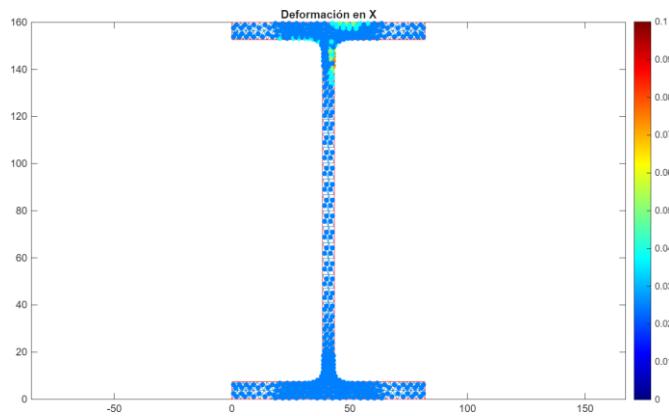


Figura 10. Deformación de nodos en el eje X.

También se tiene la gráfica de deformación de cada uno de los nodos en el eje Y, teniendo gran relación con los esfuerzos observados en figuras anteriores:

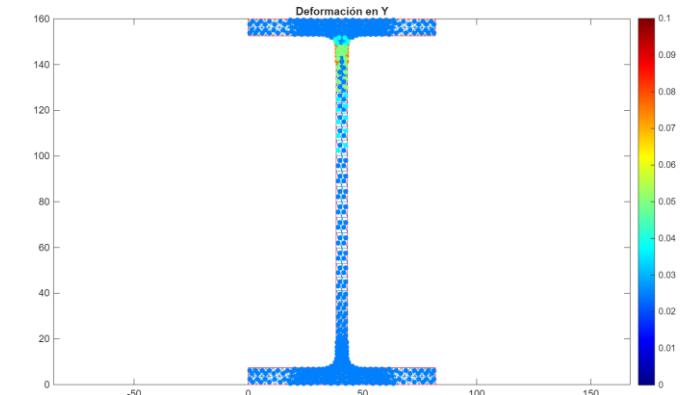


Figura 11. Deformación de cada nodo en el eje Y.

Finalmente, se presenta la suma de las imágenes anteriores de deformación para tener una imagen clara del comportamiento del perfil en el plano XY, notando como la parte superior es la que más se deforma, aunque es muy poco según la escala presentada:

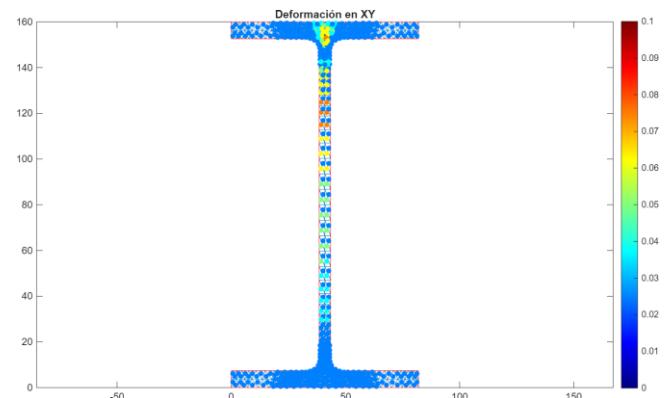


Figura 12. Deformación total de los nodos en el plano XY

- 3) Simulación térmica estática de un caldo de costilla con dos papitas en una olla de aluminio de 5 Litros en 3D. (ANSYS).

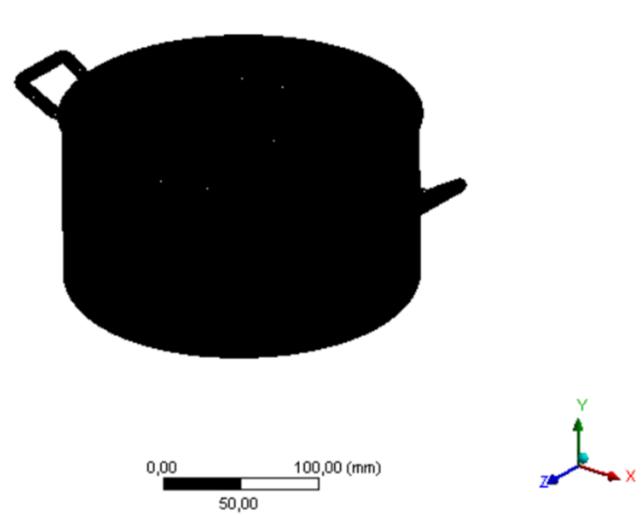


Figura 13. Malla Ollita del caldo

El modelo tridimensional de la olla de aluminio con el caldo de costilla y las dos papas fue discretizado mediante un malla denso conformado por 2 949 457 nodos y 1 178 820 elementos, lo que permitió una representación precisa de las interfaces sólido–fluído y de las geometrías irregulares de los alimentos. Se empleó un malla tetraédrico de alta resolución en las zonas de contacto entre el líquido y las superficies metálicas, garantizando una correcta transmisión de calor por conducción y convección natural. Esta configuración numérica proporcionó estabilidad térmica en la solución y permitió obtener gradientes de temperatura suaves, evitando errores de interpolación en las fronteras del dominio. El nivel de refinamiento elegido logró un equilibrio adecuado entre precisión y tiempo de cómputo, siendo suficiente para capturar los fenómenos térmicos principales dentro del sistema.

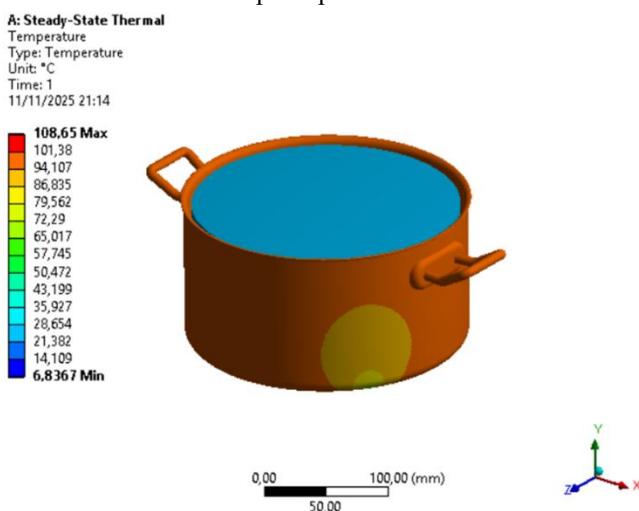


Figura 14. Temperatura del caldo.

Se realizó una simulación térmica para analizar la distribución de temperatura dentro de una olla de aluminio de 5 L que contenía un caldo de costilla y dos papas. Se aplicaron condiciones de frontera a temperatura constante en la base simulando la fuente de calor. El estudio mostró un gradiente térmico ascendente con zonas de menor temperatura cercanas a las papas, debido a la resistencia térmica del alimento y a la convección natural del líquido.

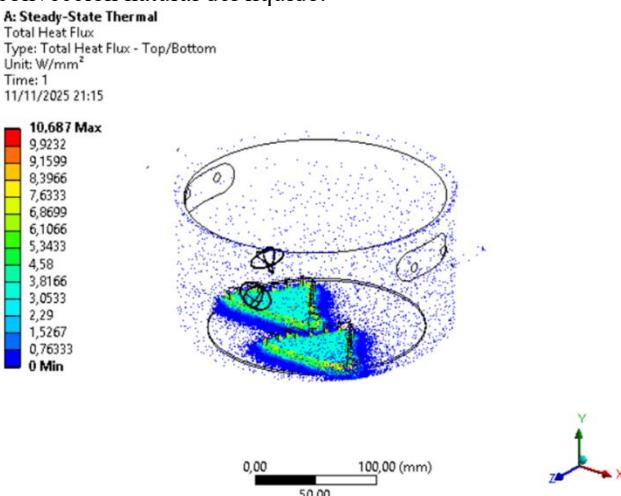


Figura 15. Total Helth-flux

El análisis del flujo total de calor permitió visualizar la transferencia energética dentro del sistema compuesto por la olla de aluminio, el caldo y las papas. Los resultados mostraron que las zonas con mayor densidad de flujo térmico se concentraron en la base de la olla, donde se aplicó la fuente de calor, alcanzando valores máximos asociados a la conductividad del aluminio. A medida que el calor se propagó hacia el interior del fluido, el flujo disminuyó gradualmente debido a los efectos combinados de la convección natural y la resistencia térmica generada por los alimentos. Las superficies externas de la olla presentaron un flujo de calor menor, producto de la disipación hacia el ambiente. Este comportamiento confirma un balance térmico estable, donde el material de la olla distribuye eficazmente la energía suministrada, permitiendo una cocción uniforme del contenido.

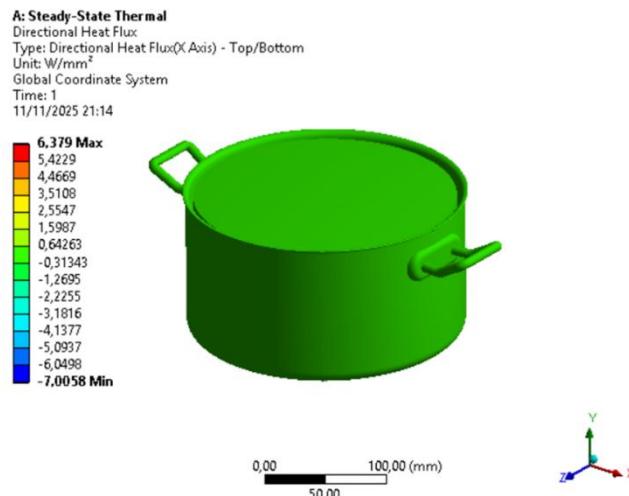


Figura 16. Dirección del flujo de calor

El análisis del flujo de calor direccional permitió identificar la orientación y magnitud del transporte de energía térmica dentro del sistema. Se observó que el flujo principal se dirigió desde la base de la olla hacia la parte superior del líquido, siguiendo el gradiente de temperatura impuesto por la fuente de calor. En las paredes laterales del recipiente, el flujo presentó una componente radial menor, asociada a la conducción térmica del aluminio y a la disipación hacia el entorno.

En el interior del caldo, las líneas de flujo mostraron un patrón ascendente irregular, influenciado por los movimientos convectivos naturales y la presencia de las papas, que actuaron como barreras térmicas parciales al desviar la dirección del calor. Este comportamiento direccional confirma la correcta propagación de la energía dentro del dominio y la eficiencia del material de la olla en transmitir el calor de manera uniforme a lo largo de toda la geometría.

- 4) Simulación Magnetostática de bobinas de Helmholtz para estimulación muscular de antebrazo. (ANSYS). en 3D.

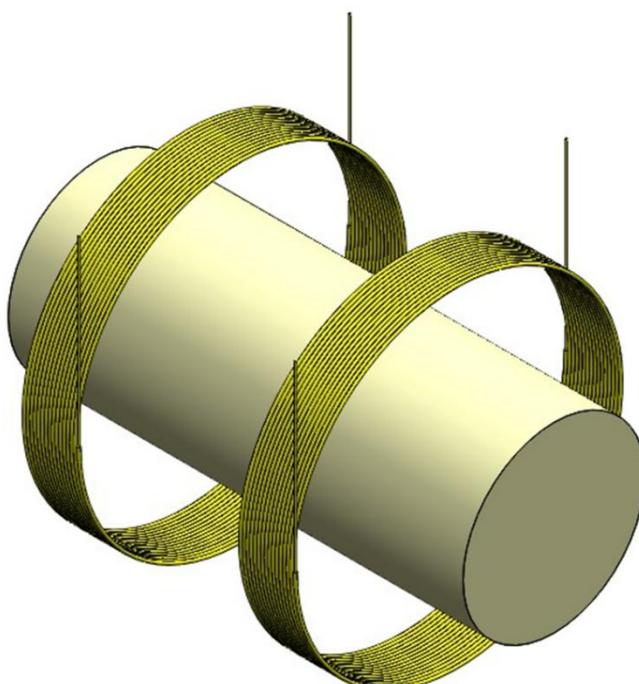


Figura 17. Bobina de Helmholtz

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz fabricadas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia equivalente a su radio, con un antebrazo de silicona colocado en la región central del campo magnético. Se aplicó un voltaje variante en rampa de 0 a  $\pm 400$  mV para analizar la densidad de flujo magnético inducido. Los resultados indicaron un campo homogéneo en la región central, ideal para propósitos de estimulación muscular controlada.

En esta simulación se generó un mallado tridimensional de alta densidad, compuesto por 577,682 nodos y 386,382 elementos, con el objetivo de representar con precisión dos bobinas de Helmholtz fabricadas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia equivalente a su radio. El espacio de trabajo fue definido como aire, mientras que el antebrazo colocado en la región central del campo magnético fue modelado con propiedades de silicona. Se aplicó un voltaje variante en rampa siguiendo la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 mV, para analizar la respuesta electromagnética del sistema. Esta configuración permitió evaluar la distribución del flujo magnético inducido con alta resolución espacial, garantizando una representación fiel del comportamiento físico en condiciones de estimulación muscular controlada.

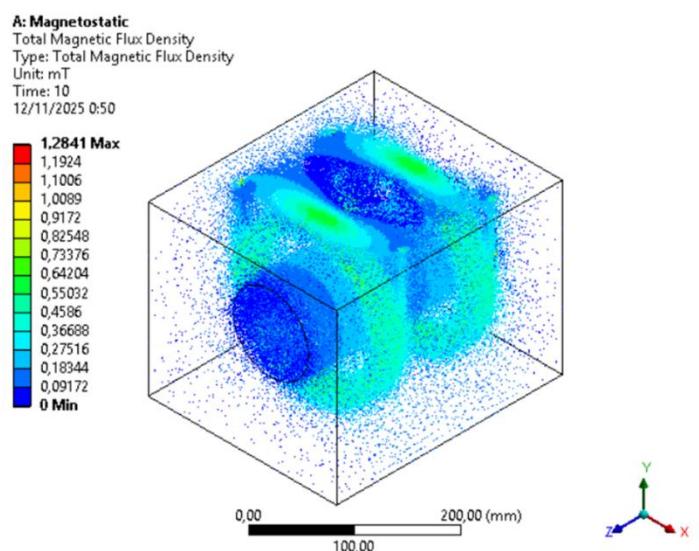


Figura 19. Densidad total de flujo magnético

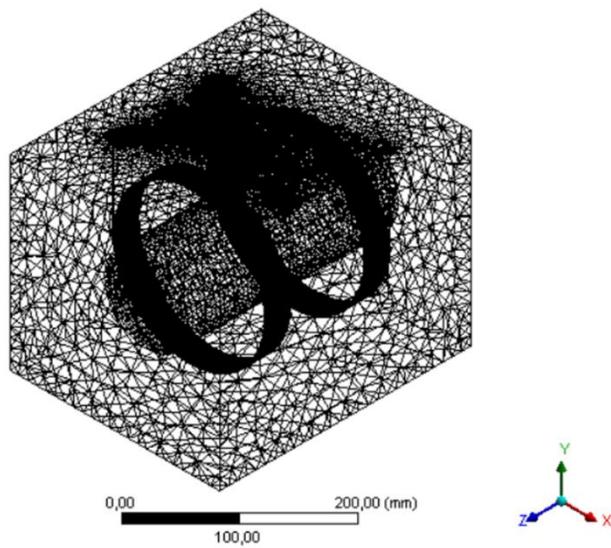


Figura 18. Malla Bobina de Helmholtz

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz fabricadas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia equivalente a su radio, dentro de un espacio de trabajo definido como aire. En la región central se posicionó un antebrazo simulado con propiedades de silicona, expuesto a un voltaje variante en rampa siguiendo la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 mV. El mallado tridimensional utilizado constó de 577,682 nodos y 386,382 elementos, permitiendo una alta resolución espacial para el análisis electromagnético. El estudio se centró en la distribución de la densidad total de flujo magnético, revelando una configuración de campo homogéneo en la zona central, con valores consistentes y simétricos que favorecen aplicaciones de estimulación muscular precisa y controlada.

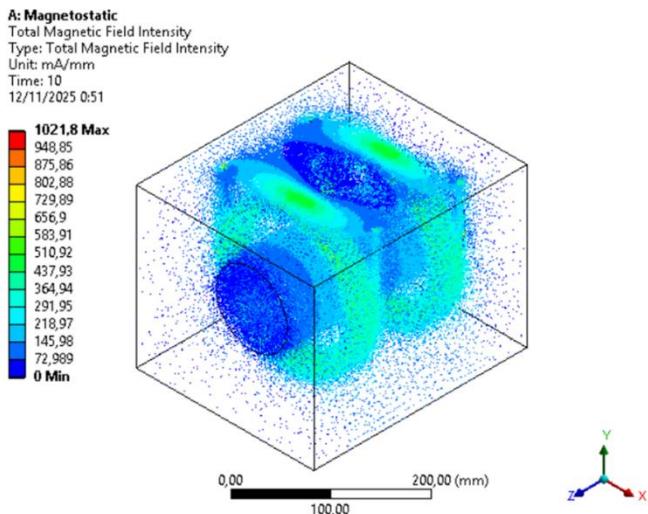


Figura 20. Intensidad del campo magnético

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz fabricadas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia equivalente a su radio dentro de un espacio de trabajo definido como aire. En la región central se posicionó un antebrazo simulado con propiedades de silicona, expuesto a un voltaje variante en rampa con la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 mV. El mallado tridimensional utilizado constó de 577,682 nodos y 386,382 elementos, permitiendo una alta resolución espacial para el análisis electromagnético. El estudio se centró en la intensidad total del campo magnético, evidenciando una distribución simétrica y homogénea en la zona central, con gradientes suaves hacia los extremos. Esta configuración es adecuada para aplicaciones de estimulación muscular, ya que garantiza una exposición uniforme del tejido al campo inducido.

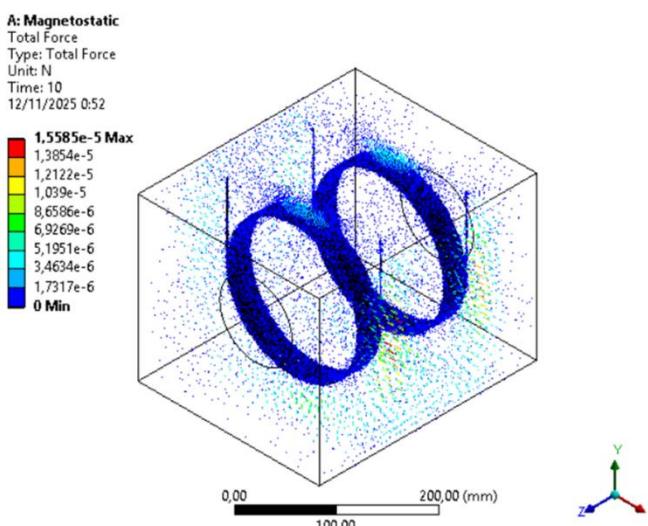


Figura 21. Total de la fuerza magnética

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz construidas en aleación de cobre, dispuestas a una distancia

igual a su radio dentro de un entorno definido como aire. En la región central se ubicó un antebrazo simulado con propiedades de silicona, expuesto a un voltaje variante en rampa con la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 mV. El mallado tridimensional constó de 577,682 nodos y 386,382 elementos, lo que permitió una resolución espacial adecuada para el análisis de interacción electromecánica. El estudio se centró en la evaluación de la fuerza total inducida sobre el volumen del antebrazo, revelando una distribución coherente con la simetría del campo magnético generado. Los resultados mostraron que las fuerzas se concentran en la región central del sistema, lo que valida su potencial para aplicaciones de estimulación muscular mediante interacción campo-fuerza.

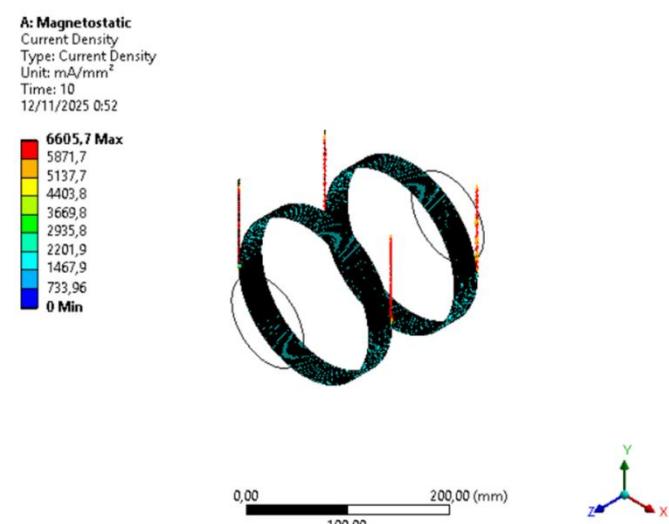


Figura 22. Densidad de corriente

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz construidas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia igual a su radio dentro de un entorno definido como aire. En la región central se posicionó un antebrazo simulado con propiedades de silicona, expuesto a un voltaje variante en rampa con la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 V.

El mallado tridimensional constó de 577,682 nodos y 386,382 elementos, permitiendo una resolución adecuada para el análisis electromagnético. El estudio se centró en la densidad de corriente inducida, observando una distribución concentrada en las espiras de las bobinas, con valores máximos en los puntos de entrada y salida del voltaje aplicado.

Esta configuración permitió evaluar el comportamiento eléctrico del sistema y su capacidad para generar campos magnéticos estables y controlados en la región de interés.

**A: Magnetostatic**  
Electric Potential  
Type: Electric Potential  
Unit: mV  
Time: 10  
12/11/2025 0:52

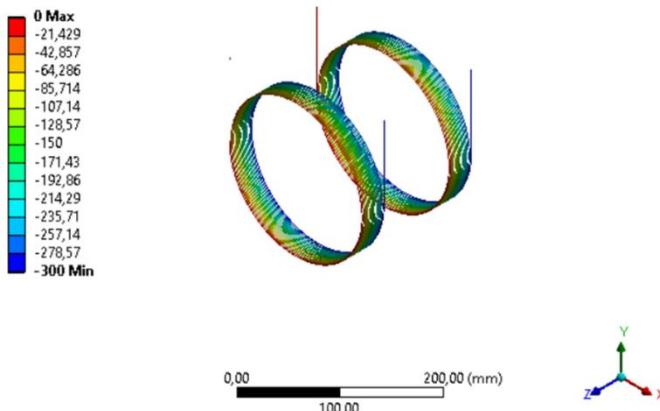


Figura 23. Energía potencial eléctrica

En esta simulación se modelaron dos bobinas de Helmholtz construidas en aleación de cobre, ubicadas a una distancia igual a su radio dentro de un entorno definido como aire. En la región central se posicionó un antebrazo simulado con propiedades de silicona, expuesto a un voltaje variante en rampa con la secuencia: 0, 200, 300, 400, 300, 200, 0, -200, -300, -400, -300 mV. El mallado tridimensional constó de 577,682 nodos y 386,382 elementos, permitiendo una resolución precisa para el análisis electromagnético. El estudio se centró en la distribución del potencial eléctrico, observando una variación gradual y simétrica en torno al eje central del sistema. Esta configuración permitió identificar zonas de mayor gradiente eléctrico, fundamentales para evaluar la eficiencia de transferencia energética y la capacidad de estimulación localizada en aplicaciones biomédicas.

5) Simulación CFD transiente en CFX de un helicóptero tipo Apache con dos dominios rotativos (Rotor principal, Rotor de cola.) en 3D (ANSYS).

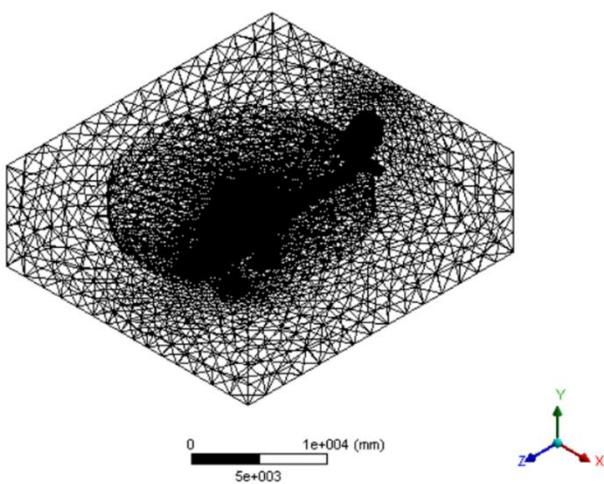


Figura 24. Malla Helicóptero Apache

Para representar con fidelidad la geometría del helicóptero tipo Apache en condiciones transientes, se generó un mallado tridimensional de alta densidad compuesto por 726,146 nodos y 3,807,143 elementos. Este mallado abarcó el fuselaje, los dominios de rotación y el entorno de flujo, permitiendo capturar con precisión los gradientes de presión, velocidad y vorticidad en todo el dominio computacional. La resolución empleada fue clave para garantizar la estabilidad numérica del solver y obtener resultados confiables en la simulación de sustentación, arrastre e interacción aerodinámica global.

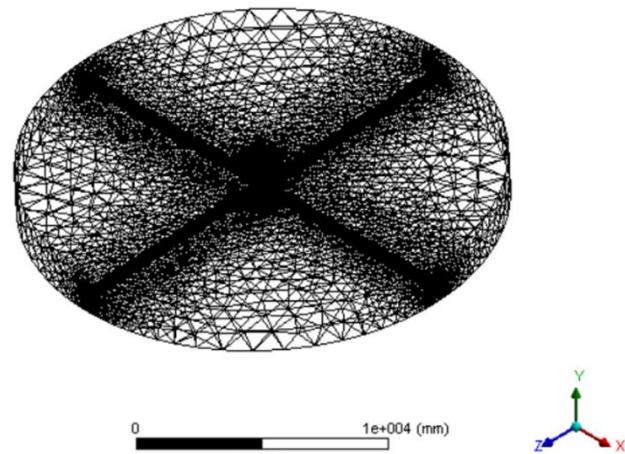


Figura 25. Malla Rotor principal

El rotor principal fue modelado con un mallado refinado de 246,151 nodos y 1,357,557 elementos, optimizado para capturar los efectos dinámicos de las palas en rotación. Se utilizó una malla estructurada en las regiones cercanas al borde de ataque y salida de las palas, y una malla no estructurada en el dominio rotativo circundante. Esta configuración permitió resolver con alta precisión la generación de vórtices, la distribución de presiones sobre las superficies aerodinámicas y su contribución directa a la sustentación del helicóptero.

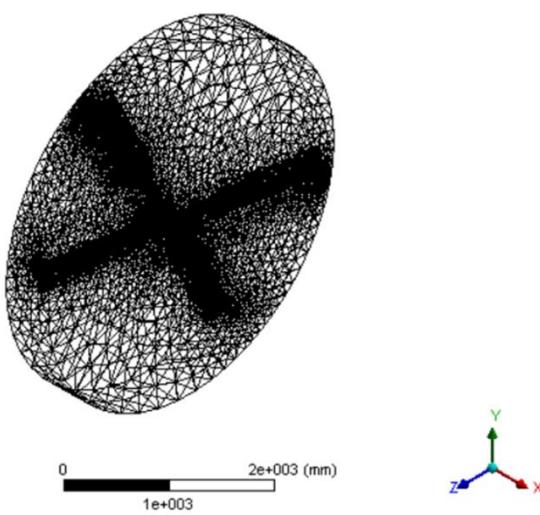


Figura 26. Malla Rotor de cola

El rotor de cola fue mallado con 88,537 nodos y 483,329 elementos, empleando una estrategia de refinamiento local en las palas y su entorno inmediato. Este mallado permitió capturar adecuadamente los efectos de contra rotación, la generación de empuje lateral y la interacción con el flujo inducido por el rotor principal. La resolución fue suficiente para analizar la estabilidad direccional del helicóptero y evaluar la eficiencia del sistema de control de guiñada bajo condiciones transientes.

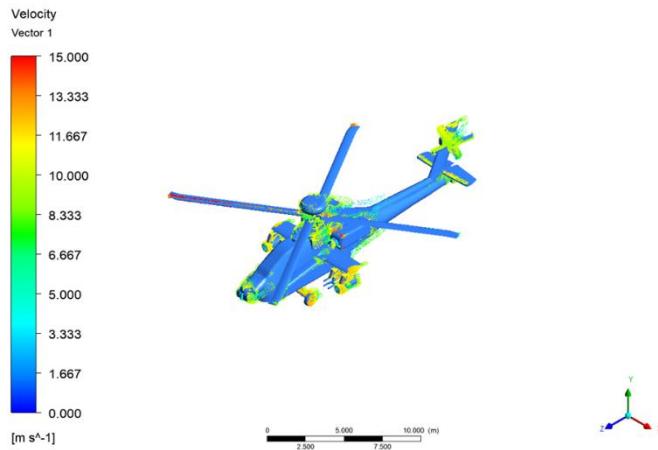


Figura 27. Velocidad en el dominio general

En el dominio general de la simulación CFD se estableció un campo de velocidad con una magnitud máxima de 15 m/s, representando condiciones de flujo moderado alrededor del modelo. Esta configuración permitió analizar el comportamiento aerodinámico sin inducir fenómenos de compresibilidad, manteniendo el régimen de flujo dentro de límites subsónicos. La distribución de velocidades mostró gradientes suaves en las zonas externas y aceleraciones localizadas en regiones de interacción geométrica, lo que facilitó la evaluación de patrones de arrastre, sustentación y formación de vórtices en condiciones controladas.

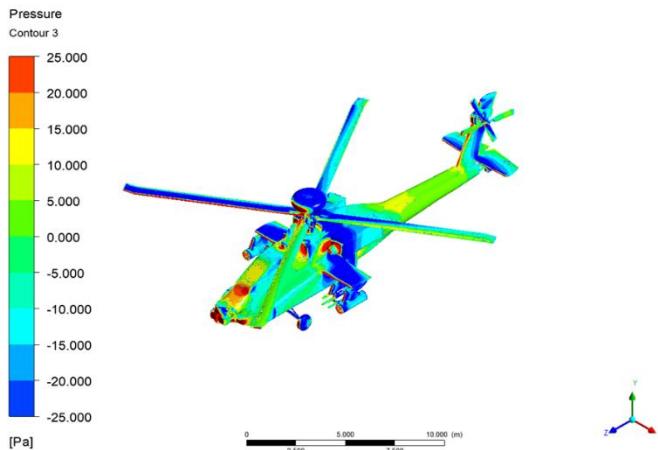


Figura 28. Presión en las superficies del helicóptero

Durante la simulación CFD transiente del helicóptero tipo Apache, se analizó la distribución de presión superficial sobre las distintas superficies expuestas al flujo, incluyendo el fuselaje, el rotor principal y el rotor de cola. La interacción del aire con las geometrías rotativas generó variaciones significativas de presión, especialmente en las zonas de ataque

de las palas y en las regiones de estancamiento del fuselaje. Se observaron gradientes de presión elevados en el borde de ataque del rotor principal, responsables de la generación de sustentación, mientras que en la parte posterior del fuselaje se identificaron zonas de baja presión asociadas al arrastre. Esta distribución permitió evaluar el desempeño aerodinámico del sistema y validar la eficiencia del diseño bajo condiciones de operación realistas.

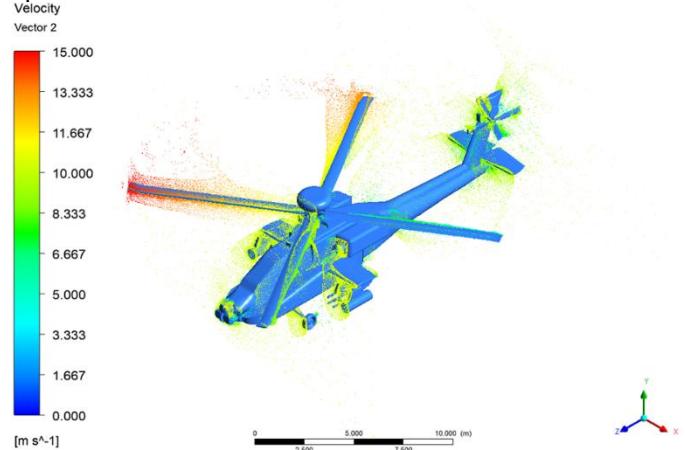


Figura 29. Velocidad en los rotores del helicóptero

Durante la simulación CFD del helicóptero tipo Apache, se representó el campo de velocidad mediante vectores distribuidos en todo el dominio computacional. Esta visualización permitió identificar claramente las direcciones y magnitudes del flujo de aire en torno al fuselaje, al rotor principal y al rotor de cola. Los vectores mostraron una aceleración significativa en las zonas de interacción entre los rotores, así como patrones de recirculación y formación de vórtices en la estela posterior. En la región central del dominio, los vectores mantuvieron una orientación coherente con la dirección de avance, mientras que en las proximidades de las palas se evidenciaron variaciones angulares asociadas al efecto rotacional. Esta representación fue clave para comprender la dinámica del flujo y validar el comportamiento aerodinámico del sistema en condiciones transientes.



Figura 30. Vista lateral de la velocidad

La visualización del campo de velocidades mediante vectores permitió interpretar de forma clara la dinámica del flujo alrededor del helicóptero tipo Apache. Esta representación mostró cómo el aire se acelera y redirige al interactuar con las palas del rotor principal y del rotor de cola, generando zonas de alta velocidad y regiones de recirculación. En el dominio general, los vectores evidenciaron trayectorias bien definidas en la dirección del avance, mientras que en las cercanías de los rotores se observaron patrones complejos de vorticidad y turbulencia. Esta herramienta gráfica fue fundamental para identificar zonas críticas de interacción aerodinámica y validar la coherencia del modelo con el comportamiento físico esperado.

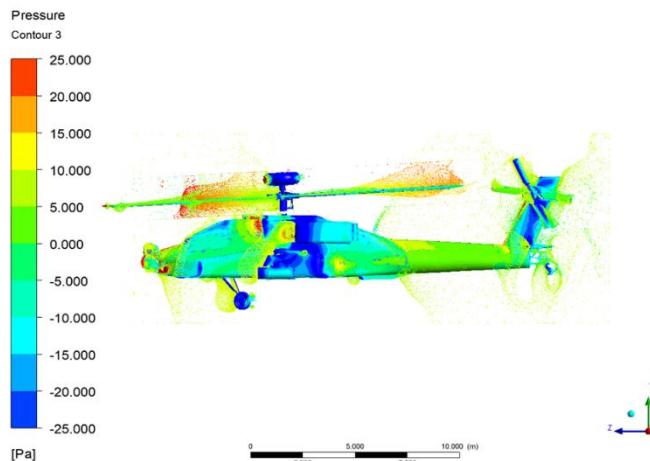


Figura 31. Vista lateral de velocidad y presión

En esta simulación CFD transiente se modeló un helicóptero tipo Apache con un mallado de alta resolución, compuesto por 726,146 nodos y 3,807,143 elementos para el fuselaje, 246,151 nodos y 1,357,557 elementos para el rotor principal, y 88,537 nodos con 483,329 elementos para el rotor de cola. Se definió un campo de velocidad con una magnitud máxima de 15 m/s, permitiendo analizar el comportamiento aerodinámico en régimen subsónico. La distribución de presión superficial evidenció zonas de alta presión en los bordes de ataque de las palas y regiones de baja presión en la estela posterior, lo que permitió evaluar la generación de sustentación y arrastre. La representación del flujo mediante vectores de velocidad mostró trayectorias coherentes en el dominio general, así como patrones de vorticidad compleja en las zonas de interacción entre rotores. Los resultados indicaron un comportamiento aerodinámico estable, con interacción de vórtices que afectaron levemente la eficiencia global, validando la coherencia del diseño bajo condiciones de operación realistas.

6) *Simulación de CFD multifase de boquilla de aspersión de fertilizante líquido sobre planta de tomates en 3D. (ANSYS).*

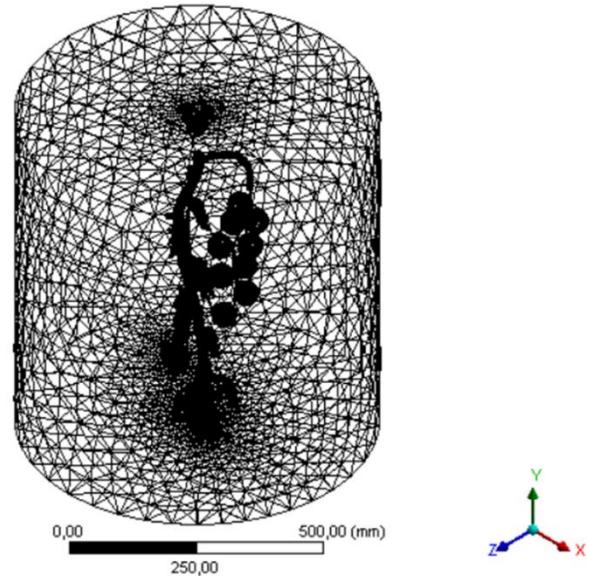


Figura 32. Malla Planta de tomate

Se intentó realizar una simulación multiphase del impacto del agua sobre una planta de tomate utilizando un modelo CAD de alta resolución, compuesto por 482,835 nodos y 2,207,164 elementos. La simulación fue configurada para representar condiciones ambientales de agua y aire a 25 °C, con una duración de 1 segundo, un timestep de 0.01 s y una velocidad de caída del agua de 4 m/s. Sin embargo, debido a la complejidad geométrica del modelo y la densidad de la malla, el proceso de cálculo se interrumpió tras 9 horas de ejecución, generando un error crítico. Esto evidenció que los requerimientos computacionales superaban la capacidad disponible, impidiendo completar la simulación en condiciones estables.

7) *Simulación de Colisión de Auto formula 1 contra muro de contención en 3D. (ANSYS).*

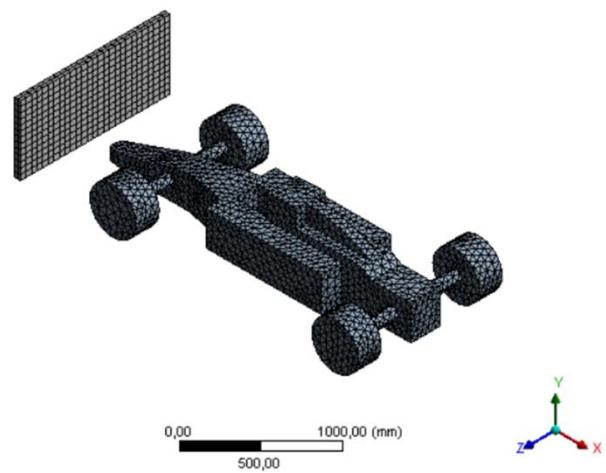


Figura 33. Malla colisión formula 1

En esta simulación se generó un mallado tridimensional compuesto por 5,842 nodos y 19,488 elementos, diseñado para representar con eficiencia la geometría del modelo sin comprometer la estabilidad numérica. Se empleó una estrategia de mallado adaptativo, utilizando elementos más refinados en las zonas críticas de contacto o gradiente de campo, y una malla más gruesa en regiones de menor interés físico. Esta configuración permitió mantener un equilibrio adecuado entre precisión y rendimiento computacional, facilitando la convergencia del solver y la obtención de resultados confiables en tiempos de simulación razonables.

En esta simulación dinámica se modeló la colisión de un vehículo de Fórmula 1 a alta velocidad contra un muro rígido, con un tiempo final de 0,05 s y velocidad inicial de -10000 mm/s en el eje X. Se registraron las deformaciones plásticas, absorción de energía y desplazamiento del centro de masa. El análisis mostró una disipación significativa de energía en la zona frontal, mientras que la cabina del piloto mantuvo una deformación mínima.

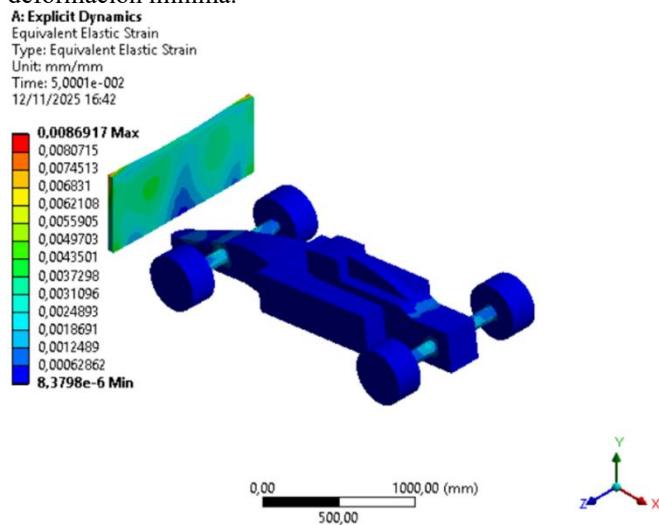


Figura 34. Deformación por colisión

En esta simulación dinámica se modeló la colisión frontal de un vehículo de Fórmula 1 contra un muro de concreto rígido, considerando una velocidad inicial de -10,000 mm/s en el eje X, una distancia de impacto de 200 mm y un tiempo final de 0.05 s. El modelo permitió registrar variables clave como deformaciones plásticas, absorción de energía y desplazamiento del centro de masa. Los resultados evidenciaron una alta disipación de energía en la zona frontal del vehículo, con deformaciones concentradas en los elementos de absorción, mientras que la cabina del piloto conservó una deformación mínima, lo que sugiere un diseño estructural eficaz para la protección del ocupante.

#### 8) Simulación de RCS de Aeronave C130 vs RCS de misil Exocet. (MATLAB-Pofacets).

POFACETS es una implementación en MATLAB de la aproximación de Physical Optics (PO) diseñada para calcular la sección eficaz radar (RCS) monostática o bistática de objetivos mallados. La herramienta permite importar modelos

CAD (por ejemplo STL), discretizarlos en facetas y evaluar la contribución electromagnética de cada faceta bajo la hipótesis de conductores perfectos. Debido a su base en PO, POFACETS entrega predicciones eficientes y razonablemente precisas para estructuras que son electromagnéticamente grandes frente a la longitud de onda, pero no incluye (en su formulación básica) efectos complejos como múltiples reflexiones, difracción de borde o apantallamiento completo —limitaciones que hay que considerar al comparar objetos con geometrías internas o cavidades (p. ej. fuselajes complejos). A continuación, se muestran los modelos usados para esta simulación, la figura 36 se aprecia el modelo del misil:



Figura 35. Modelo del misil

Y en la figura 37 se puede apreciar el modelo de la aeronave C130, usado en Pofacets:

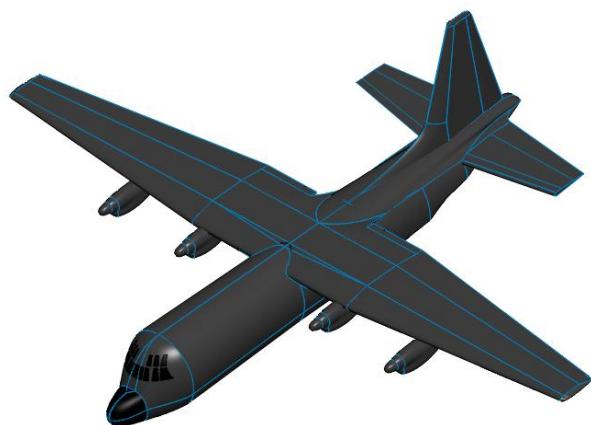


Figura 36. Modelo de la aeronave C130

Gracias a esta herramienta se obtuvo la representación de una aeronave C130, mostrando el espectro reflejado por la geometría:

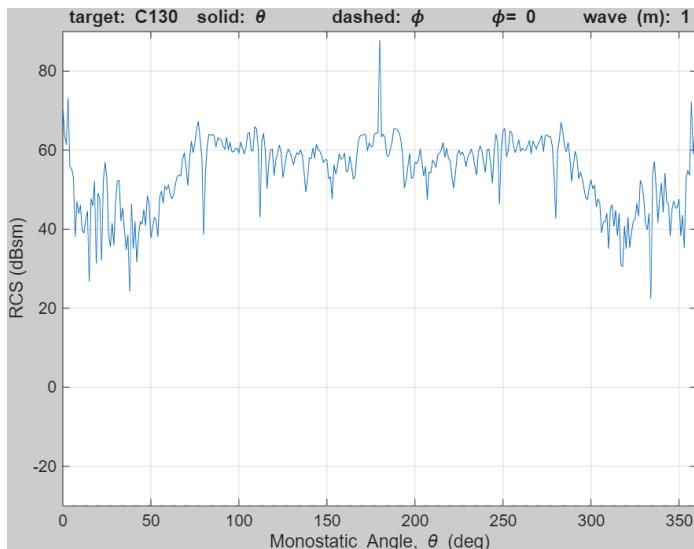


Figura 37. Espectro de la señal reflejada por el C130

En la siguiente figura se puede apreciar en coordenadas polares el comportamiento del espectro que refleja la aeronave:

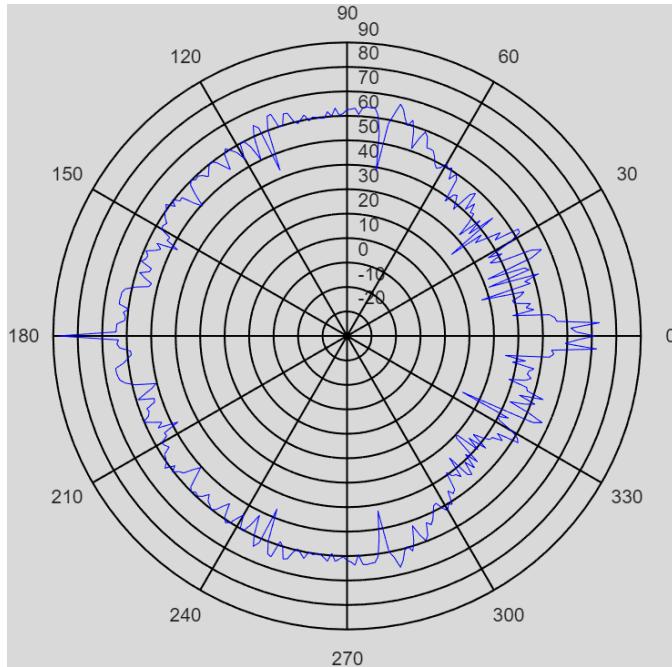


Figura 38. Espectro de la señal reflejada por el C130 en coordenadas polares

Así mismo, se muestra a continuación el espectro de la señal para el misil:

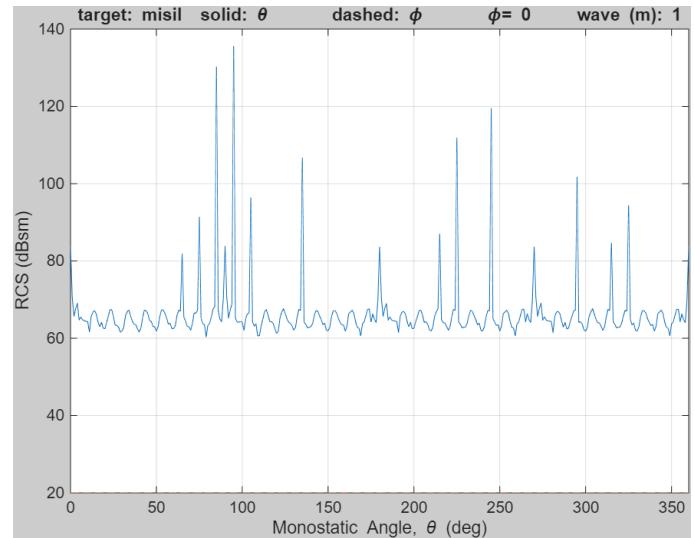


Figura 39. Espectro de la señal reflejada por el misil

También tenemos la representación de este espectro en coordenadas:

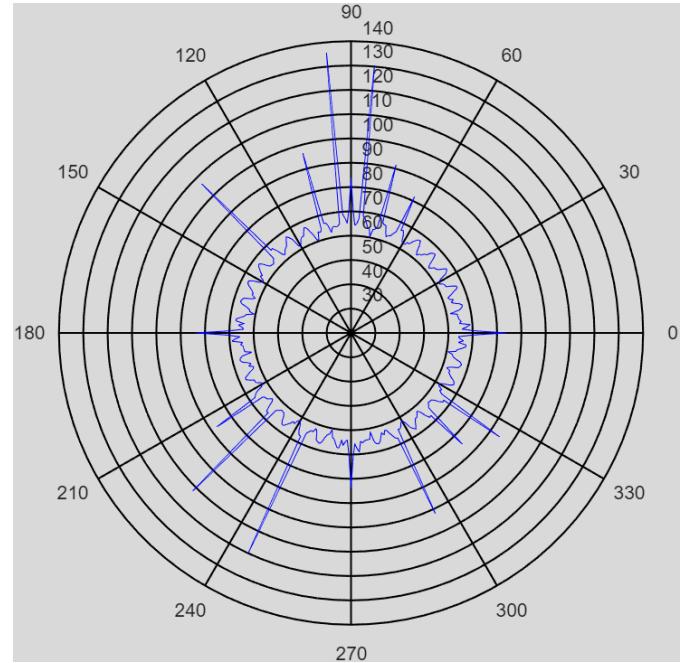


Figura 40. Espectro de la señal reflejada por el misil en coordenadas polares

Con esto, podemos comparar los espectros para poder reconocer cada uno de los objetos sin la necesidad de verlos directamente, esta aplicación se puede apreciar en radares.

Esta comparativa se da gracias a la geometría de cada uno de los objetos, y la frecuencia del espectro que pueden llegar a reflejar, las superficies planas y perpendiculares a la irradiación de la señal con las superficies que más reflejan el espectro,

- 9) Simulación CFD transiente de Aerogenerador HAWT en 3D y obtención de curva de Torque vs tiempo. (ANSYS).

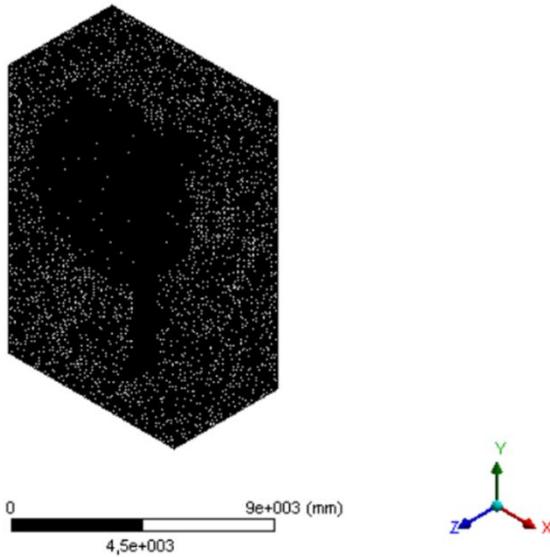


Figura 41. Malla Aerogenerador

La simulación transiente del aerogenerador HAWT se ejecutó tras la limpieza del mallado, eliminando un enmarañado que originalmente contenía 44 243 nodos y 227 676 elementos. Con el mallado corregido se modeló el flujo turbulento alrededor de las palas y la torre, registrando la respuesta dinámica del torque en función del tiempo bajo condiciones de viento variable. La nueva malla, libre de elementos colapsados o altamente distorsionados, mejoró la estabilidad numérica y permitió una resolución coherente de las regiones de desprendimiento de vórtices y variaciones de presión en la superficie de las palas, manteniendo un equilibrio entre detalle local y coste computacional.

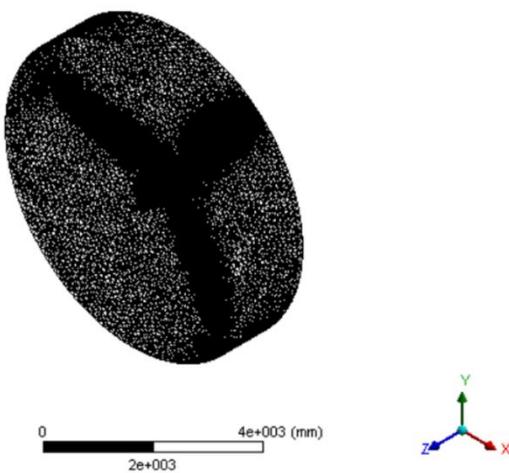


Figura 42. Malla sobre el rotor

Para esta simulación se generó un mallado tridimensional detallado de una pala de aerogenerador HAWT, compuesto por 260,831 nodos y 1,378,347 elementos, diseñado para capturar con precisión los fenómenos aerodinámicos y estructurales asociados al funcionamiento en régimen transitorio. Se aplicó un refinamiento local en las zonas de mayor curvatura, borde de ataque y salida, así como en las regiones cercanas al eje de rotación, con el fin de representar adecuadamente los gradientes de presión, esfuerzos y deformaciones.

Esta configuración permitió evaluar la interacción fluido-estructura, la generación de sustentación y los efectos de carga variable sobre la pala, garantizando estabilidad numérica y fidelidad física en los resultados

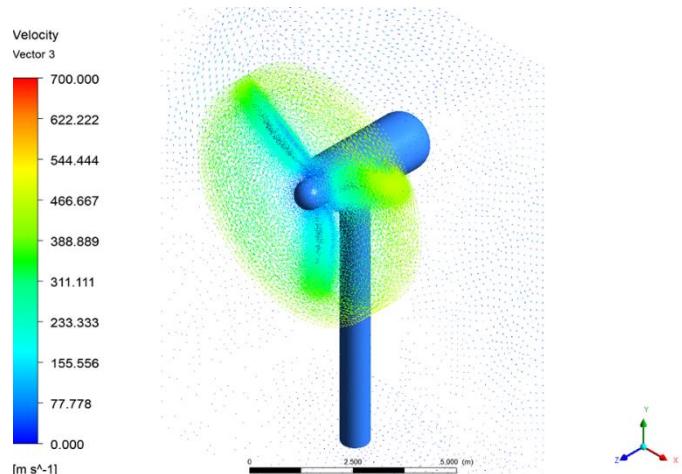


Figura 43. Velocidad del viento en el dominio general

La distribución de velocidad mostrada en la simulación evidencia el comportamiento del flujo de aire alrededor del aerogenerador de eje horizontal (HAWT).

Se observa un incremento de la velocidad en la región tangencial de las palas, alcanzando valores cercanos a los 700 m/s, mientras que detrás del rotor se genera una zona de estela con velocidades reducidas, evidenciadas en tonalidades azules y verdes.

Este gradiente de velocidad confirma la conversión efectiva de la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, mientras que las variaciones de color en la estela indican la formación de vórtices y turbulencia inducida por el paso de las palas.

El patrón de flujo mantiene simetría axial, validando el correcto comportamiento del dominio rotativo y la adecuada interacción fluido-estructura dentro del modelo tridimensional.

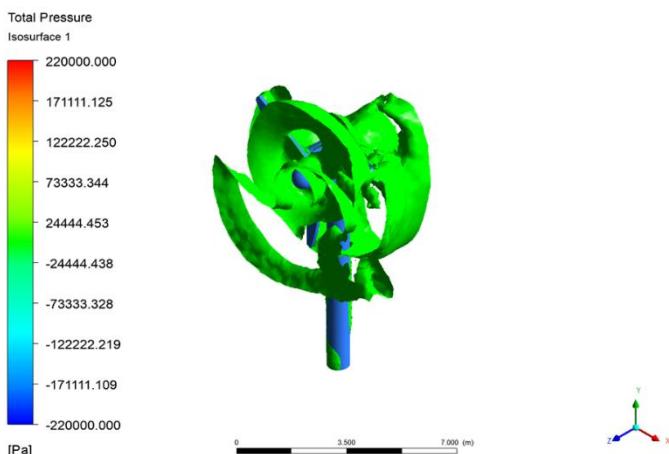


Figura 44. Presión total sobre el rotor

La distribución de presión mostrada en la simulación tridimensional permite identificar el comportamiento aerodinámico del flujo sobre las palas del aerogenerador. Se observa un rango de presión que varía entre  $-220\,000$  Pa y  $+220\,000$  Pa, donde las zonas de alta presión (tonos rojos y amarillos) se concentran en la cara de ataque de las palas, mientras que las regiones de baja presión (tonos azules) se localizan en la cara de succión y en la estela posterior. Este contraste de presiones es el responsable de la generación de la fuerza de sustentación y del torque rotacional del rotor. Las isosuperficies representadas evidencian la formación de vórtices helicoidales y estructuras turbulentas en el flujo de salida, lo que demuestra el carácter transitorio y tridimensional del fenómeno.

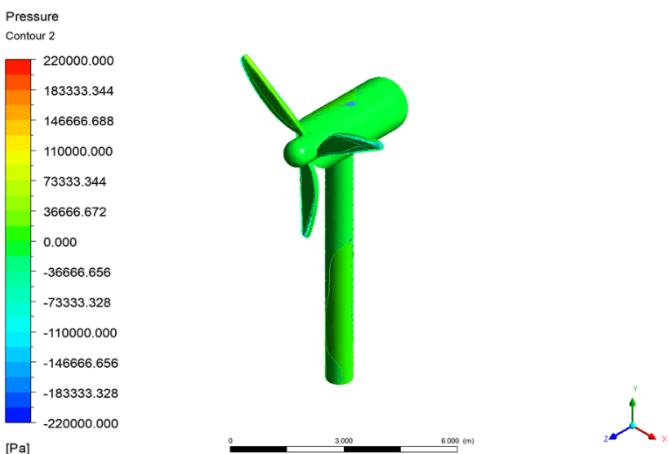


Figura 45. Presión total sobre el aerogenerador

La representación de la presión de contorno en la simulación CFD del aerogenerador HAWT muestra la interacción entre el flujo incidente y las superficies aerodinámicas del rotor dentro del dominio computacional. En las condiciones de contorno se aplicó una presión estática de entrada constante, simulando el impacto directo del viento sobre las palas, y una presión de salida ambiente que permitió la disipación natural del flujo aguas abajo. Los resultados evidencian una distribución no uniforme de la presión en torno al conjunto rotor-nacelle, con concentraciones máximas en la zona frontal del buje y en el

borde de ataque de las palas, donde el flujo se desacelera al incidir. En contraste, se aprecian regiones de presión negativa en la cara posterior de las palas, producto del efecto de succión y del desprendimiento de vórtices en la estela. Este comportamiento confirma el adecuado establecimiento de las condiciones de contorno, garantizando una simulación realista del gradiente de presión responsable del torque aerodinámico generado.

#### 10) Simulación de Ciclón en 3D (SolidWorks)

El modelado tridimensional del ciclón separador se llevó a cabo en SolidWorks, empleando herramientas paramétricas de diseño para representar con precisión la geometría interna y externa del sistema de separación. El proceso inició con la creación del cuerpo principal mediante operaciones de revolución y extrusión, definiendo las dimensiones características del cono, el cilindro y la entrada tangencial del flujo. Posteriormente, se integraron los conductos de entrada y salida del fluido, cuidando las transiciones geométricas para minimizar pérdidas de carga y garantizar una trayectoria helicoidal uniforme. La etapa de diseño incluyó además la aplicación de ensamblajes virtuales para evaluar el acople entre el cuerpo del ciclón, la tolva colectora y los elementos de soporte estructural. Finalmente, el modelo fue exportado al módulo Flow Simulation para el análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD), permitiendo validar la eficiencia del ciclón en función de la distribución de presiones, velocidades y trayectorias de partículas en el interior del equipo.

En SolidWorks, se desarrolló el siguiente modelo para realizar el estudio de fluidos para saber cómo se comportan las partículas que ingresan en el sistema:

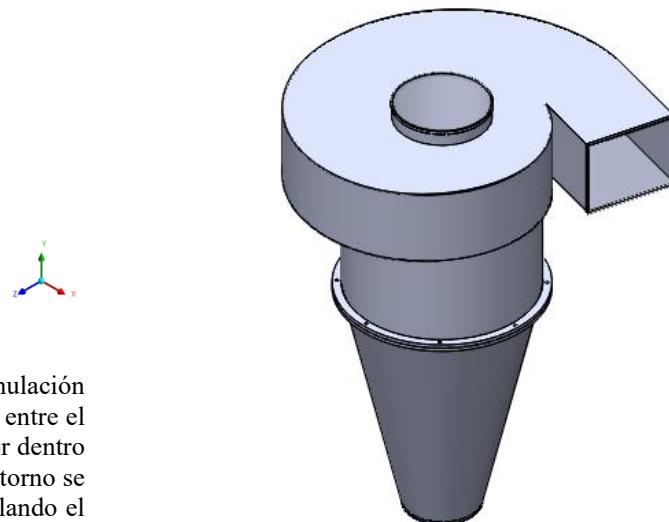


Figura 46. Modelo realizado para la simulación del separador por ciclón

Una vez configurados los parámetros, se tienen las siguientes representaciones y graficas:

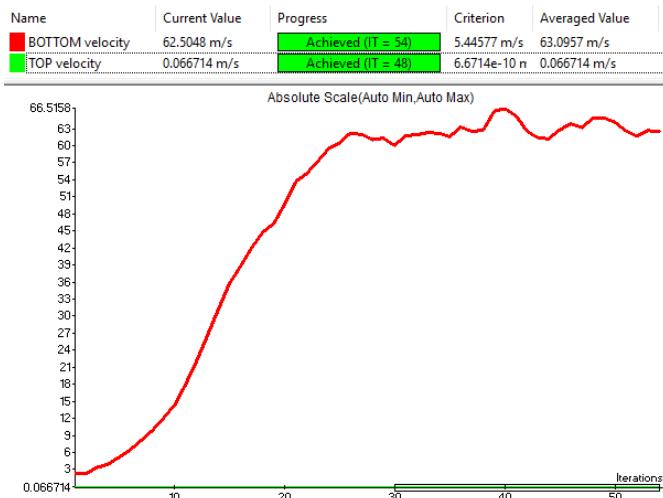


Figura 47. Velocidad en la entrada y salida de fluido del sistema

En la figura anterior, se puede apreciar la velocidad presente en dos puntos específicos del sistema, la parte superior del ciclón, y la velocidad en el orificio de salida del ciclón.

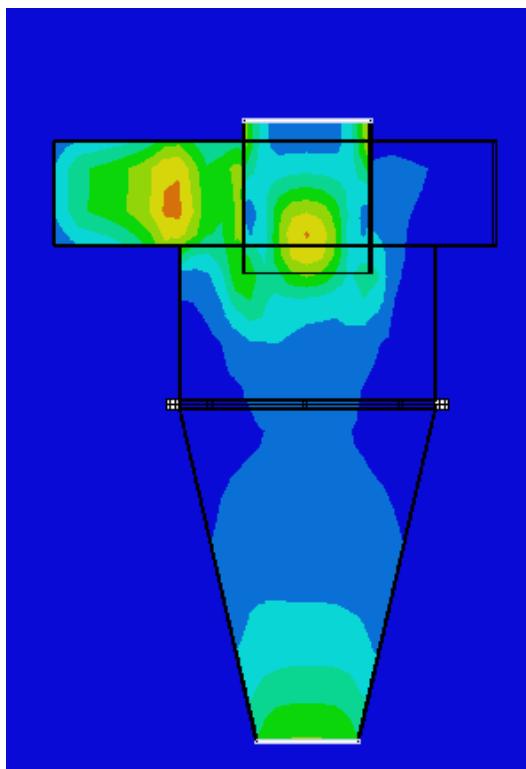


Figura 48. Plano cortante de velocidad en el sistema

En la figura anterior, se puede apreciar mediante un plano que corta el ciclón por la mitad, las velocidades alcanzadas dentro del sistema, notando que las mayores velocidades están al

ingresar aire por el conducto lateral y en la salida inferior del ciclón.

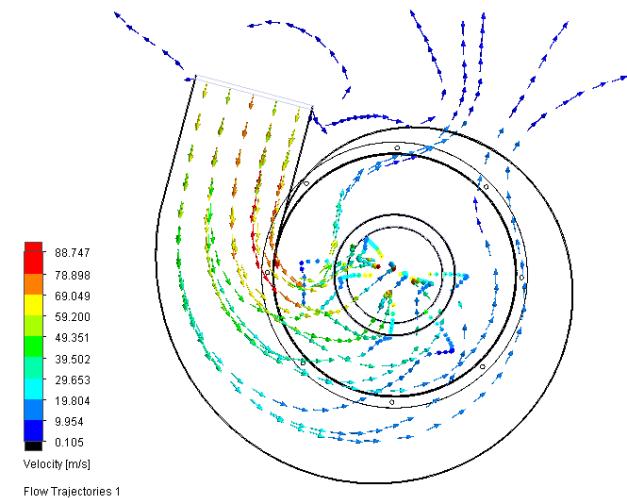


Figura 49. Flujo del viento desde la vista superior

En la figura anterior, se puede apreciar desde la vista superior el flujo de aire en el sistema, junto con sus velocidades, notando que la entrada lateral del sistema es donde se presentan las velocidades más altas.

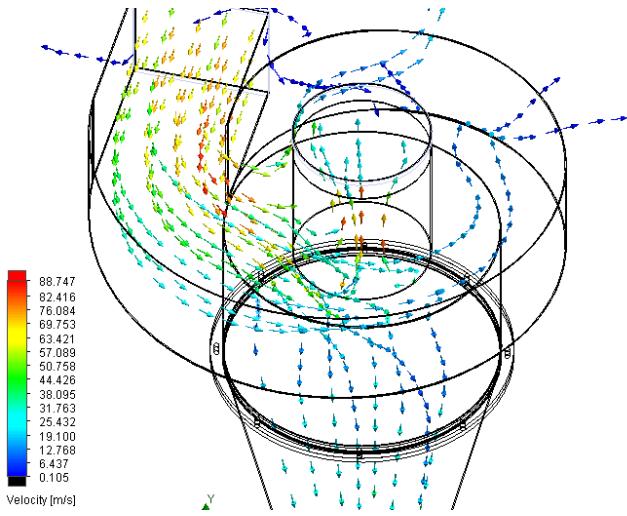


Figura 50. Flujo del fluido desde la vista lateral

Desde la vista lateral de la figura anterior, se puede apreciar como el viento tiende a subir hacia la salida superior, se sabe que este es el funcionamiento del ciclón, las partículas más livianas que entran al sistema serán expulsadas por la parte superior del mecanismo.

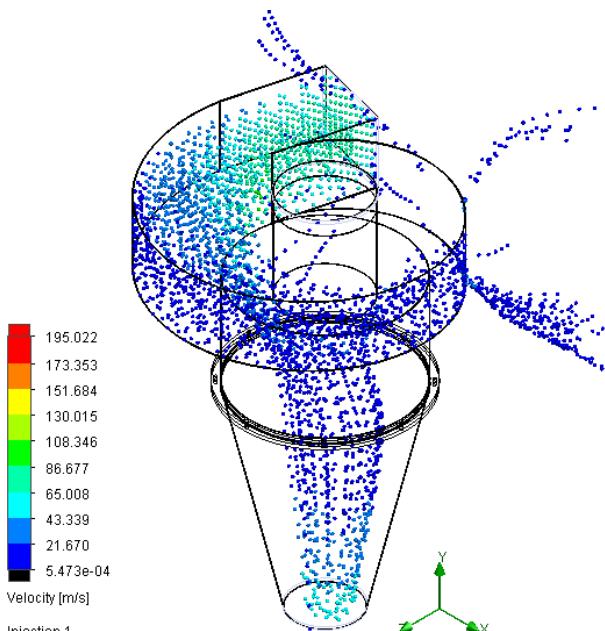


Figura 51. Flujo de partículas

En esta última figura, se puede observar el flujo de las partículas que entran en el sistema, sin embargo, se inyectaron partículas con la misma densidad, por lo que no se puede apreciar por completo el funcionamiento del sistema.

#### IV. CONCLUSIONES

- La simulación no pudo ser finalizada debido a las limitaciones computacionales derivadas del tamaño y detalle del modelo CAD. Para lograr resultados viables, será necesario simplificar la geometría, aplicar técnicas de refinamiento local de malla, optimizar los parámetros de simulación y considerar el uso de recursos de cómputo de alto rendimiento. Estas acciones permitirán reducir la carga computacional sin comprometer la fidelidad física del fenómeno a estudiar.
- El puente mostró concentraciones críticas de deformación y esfuerzo en los puntos de anclaje y zonas de contacto con la carga vehicular. Aunque el factor de seguridad se mantuvo dentro de márgenes aceptables (mínimo  $\sim 11.3$ ), estas áreas son susceptibles a fatiga estructural, lo que sugiere necesidad de refuerzo o monitoreo periódico.
- La simulación térmica reveló una distribución eficiente del calor desde la base hacia el líquido, con gradientes suaves y cocción uniforme. Las papas actuaron como barreras térmicas, generando zonas de menor temperatura. El flujo direccional confirmó una propagación ascendente del calor, validando la eficiencia del aluminio como conductor.
- El campo magnético generado fue homogéneo y simétrico en la región central, ideal para estimulación muscular controlada. La densidad de corriente se

concentró en las espiras, y la fuerza inducida se localizó en el centro del antebrazo, confirmando una interacción electromecánica efectiva y segura para aplicaciones biomédicas.

- La colisión a alta velocidad mostró una disipación significativa de energía en la zona frontal, con deformaciones plásticas concentradas en los elementos de absorción. La cabina del piloto mantuvo integridad estructural, validando el diseño como eficaz para proteger al ocupante en escenarios extremos.
- La simulación transitoria evidenció generación efectiva de torque y sustentación, con zonas de alta presión en el borde de ataque y baja presión en la estela. El flujo mostró simetría axial y formación de vórtices helicoidales, confirmando una conversión eficiente de energía cinética en rotacional. La curva de torque reveló variaciones dinámicas útiles para evaluar fatiga y control.
- El análisis aerodinámico mostró zonas de alta presión en los bordes de ataque de las palas y baja presión en la estela, generando sustentación y arrastre. Los vectores de velocidad revelaron patrones de vorticidad compleja en las zonas de interacción entre rotores, validando la coherencia del diseño bajo condiciones realistas de operación.
- El estudio del flujo interno permitió identificar la formación del vórtice central y la separación efectiva de partículas, demostrando la capacidad del modelo para representar procesos de separación gas-sólido.
- El análisis bidimensional permitió determinar la distribución de esfuerzos y deformaciones, evidenciando un comportamiento elástico coherente con la teoría de vigas bajo carga concentrada, validando la herramienta para estudios estructurales simples.
- Los resultados del RCS indicaron una mayor sección radar en la aeronave C130 respecto al misil, validando la sensibilidad del modelo geométrico en la predicción de firmas electromagnéticas.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Dassault Systèmes, *SolidWorks 2016: 3D CAD Software*. Waltham, MA, USA, 2016.
- [2] ANSYS, Inc., *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 2023 R1*, Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 2023.
- [3] The MathWorks, Inc., *Partial Differential Equation Toolbox™ User's Guide, Version R2023b*, Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., 2023.
- [4] The MathWorks, Inc., *POFACETS Toolbox for Radar Cross Section (RCS) Analysis, Version R2022a*, Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., 2022.
- [5] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, *SolidWorks Flow Simulation Technical Reference, Version 2023 SP2*, Waltham, MA, USA: Dassault Systèmes, 2023.