



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

REDISEÑO Y MONTAJE DE UNA MAQUETA PARA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL DE D 1,6 M

Alumno: Juan Antonio Valera Jiménez

Tutor: FRANCISCA MARIA GUERRERO VILLAR

Dpto: Ingeniería mecánica y minera

Septiembre, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don FRANCISCA MARIA GUERRERO VILLAR, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: REDISEÑO Y MONTAJE DE UNA MAQUETA PARA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL DE D 1,6 M, que presenta Juan Antonio Valera Jiménez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2023

El alumno:

Los tutores:

Juan Antonio Valera Jiménez

FRANCISCA MARIA GUERRERO VILLAR

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.....	4
1.1. OBJETIVOS.....	4
2. INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA.....	5
2.1 Clasificación de aerogeneradores.....	6
2.2 Historia de los VAWT	9
3. Análisis de la situación de la energía eólica	12
3.1 La energía eólica a nivel mundial.....	12
3.1.1 Crecimiento de la capacidad instalada	12
3.1.2 Factores impulsores del crecimiento.....	12
3.1.2 Desafíos	13
3.1.3 Países líderes en capacidad instalada.....	13
3.1.4 Países con una evolución destacada	14
3.1.5 Factores clave para la evolución	14
3.2 Energía eólica en España.....	15
4. Equipo Inicial-Montaje y modificaciones preliminares.....	17
5. PROTOTIPADO RÁPIDO Y MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.....	44
6. Simulación CFD	60
7. Diseño y fabricación de álabes usando impresión FDM	79
8. Diseño, simulación por elementos finitos y fabricación de un componente para reducir la flexión en el eje del aerogenerador.....	98
Bibliografía	115

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

El siguiente proyecto tiene el objetivo de analizar la situación de la energía eólica, así como de realizar las modificaciones pertinentes al prototipo de un generador eólico de eje vertical Darrieus-H ya construido para solucionar algunos problemas que éste presentaba y optimizar tanto su rendimiento como su fiabilidad y rendimiento en la medida de lo posible. [22]

A su vez se usarán distintos software y técnicas de fabricación como Fusion 360, Simflow, Catia V5, Cura para mejorar ciertos aspectos tales como el peso, resistencia del eje y pérdidas de potencia asociadas al rozamiento.

El principal interés encontrado para realizar este trabajo de fin de grado es la gran variedad de aspectos a mejorar, suponiendo cada uno de ellos un reto y una gran oportunidad de aprendizaje y desarrollo, a la vez que la contribución a un sector constantemente en desarrollo como es el sector eólico.

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden alcanzar con este trabajo de final de grado son:

- Analizar la situación de la energía eólica a nivel nacional y mundial
- Organizar tanto los archivos como los componentes de una maqueta de un generador Darrieus en H de 3 álabes [22]
- Analizar el funcionamiento y posibles problemas del prototipo ya existente del generador mencionado anteriormente.
- Analizar las fuerzas que afectan al generador, así como su aerodinámica haciendo uso de una simulación CFD

2. INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la fuerza del viento. Es uno de los recursos más antiguos aprovechados por la humanidad para generar energía mecánica y eléctrica. A lo largo de los siglos, los molinos de viento se han utilizado para moler granos, bombear agua y realizar diversas tareas agrícolas e industriales. Sin embargo, en las últimas décadas, la energía eólica ha experimentado un renacimiento significativo como fuente viable y sostenible de electricidad a gran escala.

La conversión de la energía cinética del viento en electricidad se logra mediante aerogeneradores, que son estructuras altas equipadas con aspas o palas giratorias. Estas aspas capturan la energía cinética del viento y la transfieren a un generador eléctrico, donde se convierte en electricidad utilizable. La energía eólica presenta numerosos beneficios ambientales y económicos, lo que la convierte en una alternativa atractiva a los combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovable.

En esta introducción al campo de la energía eólica, exploraremos los principios fundamentales de su funcionamiento, los tipos de aerogeneradores utilizados, las ventajas y desafíos asociados con esta tecnología, así como su papel en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible. A medida que las preocupaciones sobre el cambio climático y la seguridad energética continúan creciendo, la energía eólica se posiciona como un componente crucial del panorama energético global y como una herramienta esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir nuestra dependencia de los recursos no renovables.

Producir energía limpia y renovable es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad hoy en día. En ese contexto, los aerogeneradores juegan un papel fundamental en la producción de electricidad sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Entre los diferentes tipos de aerogeneradores, el generador Darrieus-H se presenta como una solución eficiente y rentable para el aprovechamiento de la energía eólica.

2.1 Clasificación de aerogeneradores

Podemos clasificar los generadores eólicos según los siguientes criterios[21]:

- Potencia
- Número de palas
- Velocidad de trabajo
- Eje del rotor

Potencia

- Microturbinas:(<3kW):

Normalmente son generadores de eje vertical de 3-4 alabes y diámetros pequeños de entre 1 y 4 metros. Trabajan a velocidades de rotación elevadas y variables según la velocidad del viento.

Sus principales usos son dar energía a sistemas aislados como bombas hidráulicas que se encargan de extraer agua de pozos

- Pequeños aerogeneradores (<50 kW)

Tienen una función similar a los anteriores pero aportando mayor potencia, también suelen ser combinados con otros tipos de energía como la solar, trabajando en conjunto para aplicaciones tales como iluminación de granjas.

En los generadores más potentes se utilizan cajas de engranajes para regular la velocidad del rotor.

- Grandes aerogeneradores (<850 kW) y Aerogeneradores multimegawat (1-3MW)

En este tipo de generadores, la electricidad producida no se usa in situ, es decir, que se inyecta a la red eléctrica. Suelen ser generadores de eje horizontal de 3 palas con diámetros de hasta 55 metros para los grandes aerogeneradores y hasta 90 metros para los multimegawatt. Es necesario acoplarlos a una caja de engranajes para aumentar la velocidad del generador. Los parques eólicos están compuestos de este tipo de generadores.

Número de palas

· Hélices monopala

Utilizar una sola pala aumentaría la velocidad de rotación y consecuentemente reduciría las masas a mover por el viento. Sus ventajas son principalmente económicas, ya que la fabricación de una sola pala es sencilla y requiere menos materiales.

Sus principales desventajas son la necesidad de un contrapeso que equilibre esta única pala y el nivel sonoro alcanzado por la alta velocidad.

· Hélices bipalas

Estos generadores son los menos utilizados, ya que no presentan ninguna ventaja respecto a otros tipos aunque si presentan diversas desventajas.

La única ventaja es que el costo de fabricación de hélices es menor que los tripalas, ya que hay que fabricar una pala menos, en cambio, se requieren dispositivos especiales para disminuir la carga, lo que hace que iguale o incluso aumente el coste de un tripala. Al tener más velocidad en la punta de pala, también son más sensibles a las vibraciones.

· Hélices Tripalas

Son las más utilizadas en los grandes aerogeneradores que forman los parques eólicos.

Debido a su configuración, este tipo de generador no tiene que soportar esfuerzos extra debido a la aceleración de Coriolis, lo cual representa una amplia ventaja ya que reduce los costes de fabricación.

Asimismo, de manera diferente a las hélices mono y bipalas, las de tres palas gozan de una gran aceptación pública en cuanto al impacto visual que ocasionan.

· Hélices multipalas

Los rotores multipala, tipo americano, tienen por uso casi excluyente el bombeo de agua. Su elevada fuerza de arranque y su relativo bajo costo los hace muy aptos para accionar bombas de pistón. Se estima que en el mundo existen más de 1.000.000 de molinos de este tipo en operación.

Velocidad de trabajo

Podemos diferenciar entre máquinas rápidas y lentas, encontrando en el primer tipo máquinas con menos número de palas, lo que facilita su construcción a mayor radio, que también permite situar el buje a mayor altitud, lo que nos lleva a aprovechar una mayor velocidad del viento.

En cuanto a las máquinas lentas, al contrario que las anteriores, cuentan un mayor número de palas (entre 12 y 24), que se pueden orientar mediante una veleta.

En comparación, las rápidas necesitan mayor velocidad de viento para el arranque, alcanzando su potencia nominal en velocidades de entre 12 y 15 m/s.

Eje del rotor

· Eje horizontal

Este tipo de aerogeneradores son los más comunes y los más eficientes en temas de conversión.

Las denominadas máquinas rápidas, con palas de perfil aerodinámico y casi exclusivamente empleadas para la generación de electricidad, tienen rotores de 1 a 3 palas. Los rotores con palas a sotavento no requieren de sistemas de orientación pues las fuerzas en juego tienden a orientarlo naturalmente, aunque en máquinas de gran tamaño se prefiere emplearlos para evitar los "cabeceos" que someterían las palas a vibraciones perjudiciales.

·Eje vertical

Este tipo de aerogeneradores tiene la ventaja de que no necesitan sistemas de orientación. Esto es una gran ventaja, ya que no habría que diseñar ni fabricar estos mecanismos tan complejos de direccionamiento y se eliminarían los esfuerzos a los que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor.

Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) son una alternativa a los tradicionales aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) para la generación de energía eléctrica a partir del viento. A diferencia de los HAWT, los VAWT presentan algunas ventajas en términos de eficiencia y adaptabilidad a distintas condiciones de viento, lo que ha llevado a su creciente interés en la industria eólica en los últimos años. En este trabajo, se revisará la historia y los tipos de VAWT existentes en la actualidad, con el objetivo de proporcionar una visión general de esta tecnología.

2.2 Historia de los VAWT

La historia de los VAWT se remonta al siglo XIX, cuando se desarrollaron los primeros molinos de viento de este tipo para la molienda de granos y la elevación de agua[2]. Sin embargo, fue a partir de la década de 1920 cuando se comenzaron a desarrollar los primeros diseños de VAWT con el objetivo de generar electricidad. Uno de los primeros ejemplos fue el rotor Darrieus, inventado por el francés Georges Darrieus en 1927. Este rotor consiste en dos o tres palas curvas que giran alrededor de un eje vertical, generando energía a través del movimiento de un generador conectado al eje.

Tipos de VAWT:

Actualmente existen varios tipos de VAWT, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas. A continuación, se describen brevemente algunos de los tipos más comunes:

Rotor Darrieus: Este es el diseño más antiguo de VAWT y se caracteriza por sus palas curvas en forma de "C". A pesar de que tiene una buena eficiencia en

términos de conversión de energía, su principal desventaja es su baja capacidad para arrancar por sí solo debido a la ausencia de un sistema de arranque.

Rotor Savonius: El rotor Savonius se compone de dos o tres palas en forma de "S" que giran alrededor de un eje vertical. A diferencia del rotor Darrieus, el Savonius tiene una buena capacidad para arrancar por sí solo y es capaz de generar energía con vientos de baja velocidad. Sin embargo, su eficiencia es menor que la de otros diseños.

Rotor Giromill: El rotor Giromill consta de tres o cuatro palas rectangulares que giran alrededor de un eje vertical. Su diseño es similar al de un molino de viento tradicional y tiene una buena capacidad para arrancar por sí solo. Además, su eficiencia es mayor que la de otros diseños, especialmente a altas velocidades de viento.

Rotor helicoidal: El rotor helicoidal es una variante del rotor Darrieus que presenta palas en forma de hélice. Este diseño tiene una alta eficiencia en términos de conversión de energía y una buena capacidad para arrancar por sí solo, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones domésticas y pequeñas instalaciones.

Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) y los de eje horizontal (HAWT) presentan diferentes características en cuanto a su diseño, funcionamiento y rendimiento. A continuación, se describen algunas de las ventajas y desventajas de los VAWT en comparación con los HAWT[4].

Ventajas de los VAWT:

Adaptabilidad al viento: Los VAWT son más adaptables a cambios en la dirección y velocidad del viento que los HAWT, ya que no necesitan orientarse hacia la dirección del viento. Esto significa que pueden funcionar incluso en condiciones de viento inestable y variable.

Menor impacto visual y acústico: Debido a su diseño vertical y compacto, los VAWT tienen un menor impacto visual y acústico en comparación con los HAWT, que pueden ser bastante altos y producir un ruido constante.

Facilidad de mantenimiento: Los VAWT suelen tener menos componentes móviles que los HAWT, lo que los hace más fáciles de mantener y reparar.

Aprovechamiento del viento desde cualquier dirección: Los VAWT pueden capturar el viento desde cualquier dirección, mientras que los HAWT necesitan ser orientados hacia la dirección del viento.

Desventajas de los VAWT:

Menor eficiencia: Los VAWT tienden a tener una menor eficiencia en la conversión de energía del viento a energía eléctrica que los HAWT. Esto se debe en parte a la menor velocidad del viento que atraviesa las palas verticales en comparación con las horizontales.

Problemas de arranque: Los VAWT tienen problemas para arrancar por sí solos en condiciones de viento bajo, lo que significa que pueden necesitar una ayuda externa para comenzar a girar.

Limitaciones en el tamaño: Los VAWT suelen ser más adecuados para instalaciones de pequeña y mediana escala, mientras que los HAWT se utilizan más frecuentemente en proyectos a gran escala.

Diseños complejos: Los diseños de VAWT pueden ser más complejos y difíciles de fabricar que los HAWT debido a la necesidad de crear un diseño eficiente que no presente vibraciones, torsiones y otros problemas mecánicos.

En conclusión, los VAWT presentan algunas ventajas en términos de adaptabilidad al viento, menor impacto visual y acústico, facilidad de mantenimiento y aprovechamiento del viento desde cualquier dirección, pero también tienen desventajas en cuanto a eficiencia, problemas de arranque, limitaciones en el tamaño y complejidad de diseño. Es importante evaluar cuidadosamente las necesidades y las condiciones específicas de cada proyecto antes de decidir qué tipo de aerogenerador utilizar.

3. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA

3.1 LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL MUNDIAL

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable que ha experimentado un crecimiento significativo en todo el mundo en las últimas décadas. Su contribución a la matriz energética global ha aumentado debido a varios factores, incluida la preocupación por el cambio climático, la disminución de los costos de generación y avances tecnológicos en la industria eólica[14].

3.1.1 Crecimiento de la capacidad instalada

Hasta 2021, la capacidad instalada de energía eólica a nivel mundial había experimentado un crecimiento constante. Según datos del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC por sus siglas en inglés), la capacidad eólica global superó los 700 GW a finales de 2020, un aumento significativo en comparación con la capacidad de menos de 100 GW en el año 2000.

3.1.2 Factores impulsores del crecimiento

Cambio climático y sostenibilidad: La creciente conciencia sobre el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha llevado a una mayor inversión en fuentes de energía renovable, incluida la energía eólica.

Reducción de costos: Los costos de generación de energía eólica han disminuido considerablemente en las últimas décadas debido a avances tecnológicos, economías de escala y una mayor competencia en el mercado.

Política y regulación: Muchos países han implementado políticas de energía renovable y objetivos de energía limpia que han fomentado la inversión en energía

eólica. Los incentivos fiscales y los subsidios también han impulsado la adopción de la energía eólica.

Tecnología avanzada: La mejora de la eficiencia de las turbinas eólicas, la capacidad de almacenamiento de energía y las tecnologías de predicción del viento han mejorado la viabilidad de la energía eólica como fuente de energía confiable.

3.1.2 Desafíos

A pesar del crecimiento continuo, la energía eólica enfrenta varios desafíos[1]:

Intermitencia: La generación eólica depende de la disponibilidad del viento, lo que la hace intermitente y no siempre coincidente con la demanda energética.

Impacto ambiental: La construcción de parques eólicos puede tener impactos ambientales locales, como la alteración del hábitat de aves y murciélagos, aunque estos impactos son generalmente menores en comparación con las fuentes de energía convencionales.

Almacenamiento de energía: La necesidad de desarrollar tecnologías de almacenamiento de energía efectivas para mitigar la intermitencia de la energía eólica sigue siendo un desafío importante.

3.1.3 Países líderes en capacidad instalada

China: China se ha consolidado como el líder mundial en capacidad instalada de energía eólica. Su enfoque en la expansión de las energías renovables como parte de su estrategia de reducción de emisiones ha sido impresionante. A través de inversiones masivas en la industria eólica y el establecimiento de parques eólicos a gran escala, China superó los 281 GW de capacidad instalada de energía eólica en 2020, lo que representa más del 40% de la capacidad global.

Estados Unidos: Estados Unidos ocupa el segundo lugar en capacidad eólica instalada. El país ha experimentado un crecimiento constante en esta área, con una

capacidad que superó los 122 GW a fines de 2020. Estados Unidos ha establecido una base sólida para la energía eólica terrestre y marina, con proyectos en expansión en todo el país, incluidos estados como Texas, Iowa y Oklahoma.

Alemania: Alemania ha sido un pionero en la energía eólica en Europa. A pesar de su limitado espacio terrestre, ha demostrado una sólida expansión en la energía eólica onshore y offshore. A finales de 2020, Alemania tenía más de 62 GW de capacidad instalada de energía eólica. Además, el país ha estado invirtiendo en proyectos offshore, lo que refleja su compromiso con la expansión de esta fuente de energía.

3.1.4 Países con una evolución destacada

India: India ha experimentado un rápido crecimiento en la capacidad de energía eólica en los últimos años. Gracias a sus ambiciosos objetivos de energía renovable y una política favorable, India tenía más de 38 GW de capacidad eólica instalada a finales de 2020. La inversión en parques eólicos terrestres y marinos ha sido fundamental para su crecimiento.

Brasil: Brasil ha emergido como un líder en América Latina en energía eólica. Su capacidad instalada superó los 20 GW a finales de 2020, y se espera que continúe creciendo debido a un entorno favorable para la inversión en energías renovables y abundantes recursos eólicos en áreas costeras.

Reino Unido: El Reino Unido ha experimentado una rápida expansión de la energía eólica offshore en su estrategia para reducir las emisiones de carbono. Con una capacidad instalada de más de 24 GW a finales de 2020, el país ha demostrado un compromiso con la energía eólica marina, lo que le permite aprovechar sus recursos eólicos en el Mar del Norte.

3.1.5 Factores clave para la evolución

Políticas y regulaciones favorables: Los países que han experimentado un crecimiento notable en la energía eólica suelen contar con políticas y regulaciones que promueven la inversión y el desarrollo de proyectos.

Inversiones en infraestructura: La inversión en la construcción de parques eólicos y la mejora de la infraestructura de transmisión son esenciales para aprovechar el potencial de la energía eólica.

Tecnología y eficiencia: La adopción de tecnologías más eficientes y la capacidad de generar energía en ubicaciones estratégicas, como zonas marinas, han impulsado la evolución de la energía eólica.

En resumen, la energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial, con China y Estados Unidos liderando la capacidad instalada. Varios países, incluidos India, Brasil y el Reino Unido, han demostrado una evolución impresionante en esta área, impulsados por políticas favorables y avances tecnológicos. A medida que la conciencia sobre el cambio climático continúa creciendo, se espera que la energía eólica siga siendo una fuente crucial de energía renovable en todo el mundo.

3.2 Energía eólica en España

3.2.1 Capacidad Instalada y Evolución

España ha sido un actor destacado en el desarrollo de la energía eólica en Europa y a nivel mundial. A lo largo de los años, el país ha experimentado un crecimiento constante en su capacidad instalada de energía eólica[13].

A finales de 2020, España contaba con más de 27 gigavatios (GW) de capacidad eólica instalada, lo que la situaba como uno de los principales productores de energía eólica en Europa. Aunque esta cifra se encuentra significativamente por debajo de líderes mundiales como China o Estados Unidos, es importante destacar que España ha continuado invirtiendo en esta fuente de energía renovable y se espera un crecimiento adicional en los próximos años.

3.2.2. Factores Impulsores del Crecimiento

Política Energética: España ha establecido una serie de políticas y regulaciones en apoyo a las energías renovables, incluida la energía eólica. El país ha promovido la inversión en parques eólicos a través de esquemas de subsidios y tarifas de alimentación a través de mecanismos como las subastas de energía renovable.

Recursos Eólicos Favorables: España cuenta con condiciones geográficas favorables para la generación de energía eólica, especialmente en regiones costeras y montañosas. Estas áreas ofrecen vientos constantes y fuertes que son ideales para la producción de energía eólica.

Tecnología Avanzada: La inversión en tecnología eólica avanzada ha permitido el desarrollo de turbinas más eficientes y confiables, lo que ha mejorado la producción de energía eólica en el país.

Participación de la Industria: La industria eólica española ha desempeñado un papel importante en la expansión de la energía eólica tanto a nivel nacional como internacional. Las empresas españolas se han destacado en la fabricación y exportación de componentes de turbinas eólicas.

3.2.3. Desafíos

A pesar del crecimiento constante, la energía eólica en España se enfrenta a desafíos similares a nivel global:

Intermitencia y Almacenamiento: La intermitencia inherente de la energía eólica requiere soluciones de almacenamiento de energía efectivas para garantizar un suministro de energía constante y confiable.

Impacto Ambiental: La construcción de parques eólicos puede tener impactos ambientales locales, que deben ser gestionados adecuadamente para minimizar su efecto en la biodiversidad y las comunidades locales.

3.2.4 Conclusión

España ha demostrado un compromiso continuo con el desarrollo de la energía eólica como parte de su transición hacia un sistema energético más sostenible y con bajas emisiones de carbono. La capacidad instalada de energía eólica en el país sigue creciendo, impulsada por políticas favorables, recursos naturales adecuados y avances tecnológicos.

A medida que España continúa invirtiendo en energías renovables, se espera que la energía eólica siga siendo una parte crucial de su matriz energética. La expansión de la energía eólica no solo contribuirá a la reducción de las emisiones de

carbono, sino que también fomentará el desarrollo de la industria eólica y la creación de empleo en el país.

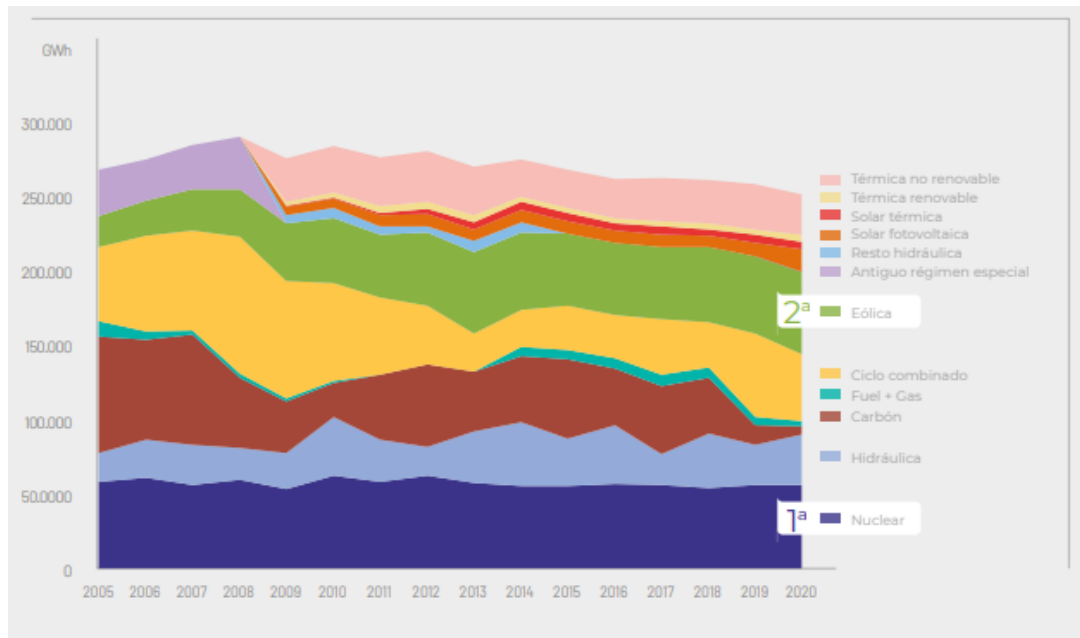


Ilustración 1-Principales fuentes de energía renovables en España

4. EQUIPO INICIAL-MONTAJE Y MODIFICACIONES PRELIMINARES

El equipo inicial, localizado en el laboratorio de Metrología de la escuela politécnica superior de Jaén, se trata de un aerogenerador tipo Darrieus en H de 3 palas.

El prototipo se encontraba almacenado sin estar montado completamente, por lo que el primer paso a la hora de tratar es identificar los componentes y montar el prototipo para su posterior evaluación.

El prototipo está compuesto por un eje, 3 álabes formados por perfiles alares NACA, 4 placas circulares de metacrilato, que junto a 6 varillas roscadas metálicas constituyen la base, 6 varillas de sección rectangular unidas a 2 piezas circulares fabricadas con impresión FDM, que unidas servirán de unión entre el eje y los álabes. A parte, también dispone de un sistema de frenado que es usado para la medición de la potencia instantánea generada y otro mecanismo para regular el pitch de los álabes.

Además de los componentes mencionados anteriormente también se dispone de otras piezas como rodamientos, tornillería varia, rodamientos y otras piezas fabricadas con impresión FDM cuyo principal propósito es servir de unión entre base y eje, a la vez que sirve de soporte para este último.

Una vez identificados todos los componentes y ubicados dentro del laboratorio, es necesario hacer algunas modificaciones y crear algunas piezas auxiliares que no se encontraban disponibles.

4.1 Taladrado del eje

Entre las piezas que se ha comentado en el apartado anterior que son necesarias de fabricar, la primera y más importante se trata de un nuevo eje principal, ya que el anterior no se encuentra entre los componentes disponibles en el laboratorio.

Para fabricar el eje, partimos de una varilla de sección rectangular de 15x15 mm de sección y 2000 mm de altura.

Para hacer los agujeros, se usó uno de los taladros disponibles en el taller mecánico de la Universidad de Jaén, siguiendo el siguiente esquema.

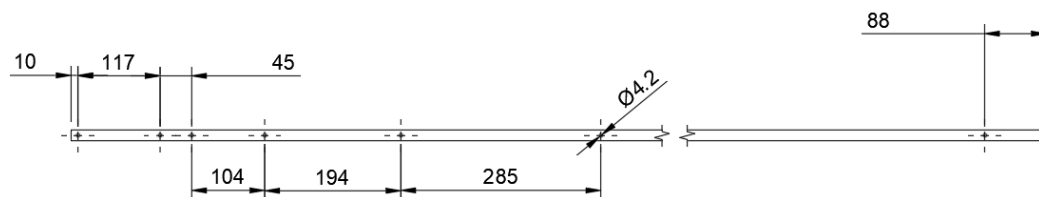


Ilustración 2-Plano del eje

4.2 Organización de archivos CAD

El primer paso a realizar será trasladar los archivos CAD proporcionados a Fusion 360, organizar todos ellos para facilitar el trabajo e interpretación de los mismos tanto para este trabajo de final de grados como para otros proyectos futuros.

Antes de continuar, me gustaría detallar los motivos por los que, a pesar de Catia V5 ser un programa mas eficiente y potente para el diseño, he elegido Fusion 360 como programa de diseño CAD a utilizar:

1.-Acceso basado en la nube y colaboración: Fusion 360 se basa en la nube, lo que significa que se puede acceder a los diseños desde cualquier lugar con conexión a Internet y colaborar en tiempo real con otros miembros del equipo, en este caso he realizado el proyecto yo mismo pero esto facilitaba que el tutor pudiese supervisar o resolver dudas en el momento, lo cual agiliza en gran medida el proceso de trabajo.

2.-Amplia gama de herramientas: Fusion 360 ofrece una amplia gama de herramientas de diseño, desde modelado 3D y superficies hasta simulación, análisis de estrés y renderizado. Tener todas las herramientas resulta bastante útil a la hora de trabajar tanto con diseños paramétricos como con mallas, aunque como veremos posteriormente, también se usará la herramienta Meshmixer para tratar las mallas. Además, también se hará uso más adelante de herramientas tales como simulaciones y optimización de topología, estas herramientas, al igual que el diseño se procesan de forma totalmente online, lo que facilita el trabajo para equipos poco potentes, a tal punto de poder realizarlas desde dispositivos móviles incluso.

3.-Asequibilidad: Fusion 360 ofrece una suscripción asequible, en nuestro caso, podemos optar por una suscripción de estudiante, que nos habilita las herramientas tanto de diseño como de simulaciones ilimitadas sin costes adicionales.

4.-Experiencia: Como factor algo más personal, me gustaría indicar que a la vez que he estado desarrollando este trabajo de fin de grado he estado trabajando en una empresa donde se utilizaba este programa, dándome una gran versatilidad y habilidad con esta herramienta en concreto.

Una vez expuesto los motivos del trabajo con Fusion 360, es momento de detallar el proceso de cambio de entorno de trabajo y organización de los archivos.

Para ello, primero abriremos los archivos en su formato original (.CATpart y .CATproduct) usando el programa CATIA V5 y montamos todos los diseños usando

las medidas tomadas en el laboratorio sobre la maqueta, también se diseñarán las ruedas que lleva acopladas para facilitar su transporte y que no estaban diseñadas previamente, no se dan muchos detalles de esta parte que se trata de una parte meramente estética y que no influirá en el funcionamiento del equipo.

Una vez todo esté correcto, se guarda el product en formato .STEP, este paso es importante, ya que este formato es un formato 'universal', es decir, que se puede abrir con cualquier programa de diseño.

En Fusion 360, lo único que tendremos que hacer es cargar el archivo .STEP que hemos generado con CATIA V5 e importarlo a nuestro entorno de trabajo, una vez hecho ya tendremos disponible nuestro montaje para trabajar con el desde cualquier equipo.

Al cargar los archivos a Fusion 360, podemos observar, como se muestra en la siguiente figura que los archivos aparecen desordenados y en inglés, ya que fueron creados en ese idioma.

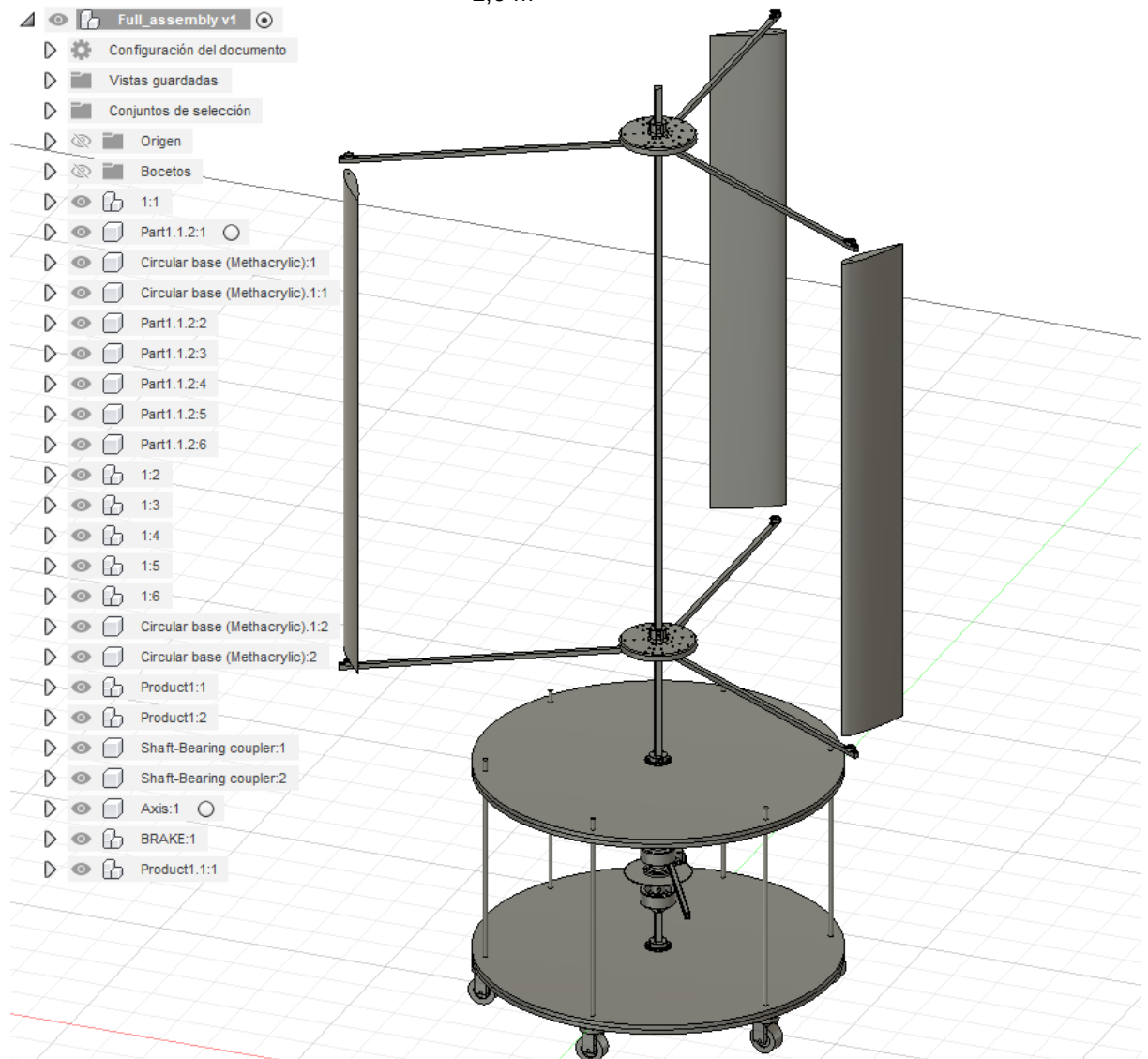


Ilustración 3-Ensamblaje CAD del generador

Para facilitar el trabajo en los posteriores diseños, se hará uso de la herramienta ‘Conjuntos de selección’.

Los conjuntos de selección son una característica útil en Fusion 360 que permite organizar y gestionar los componentes de un diseño de manera más eficiente, especialmente cuando se trabaja en ensamblajes complejos, como es nuestro caso. Esta herramienta permite agrupar componentes relacionados y acceder a ellos de manera más rápida y sencilla.

La única ‘desventaja’ de esta herramienta es que para crear los grupos hay que seleccionar uno a uno los componentes que queremos agregar, aunque a posteriori nos permitirá ahorrar mucho más tiempo.

Los grupos de selección creados son los siguientes:

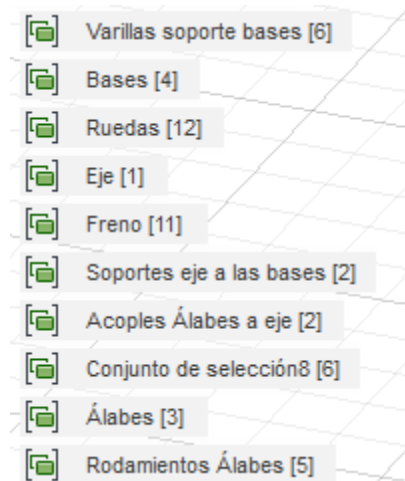


Ilustración 4-Grupos de selección del modelo

Una vez creados, ya podemos a empezar a trabajar en la optimización del diseño, así como diseñar nuevas piezas o hacer las modificaciones pertinentes de manera más sencilla.

4.3 Descripción del equipo Inicial

Teniendo todos los archivos CAD organizados, ahora podemos hacer una descripción más a fondo de cada uno de los componentes.

1. Conjunto del álabe:

El álabe se compone de un perfil NACA impreso en FDM, un eje en su centroide, que lo une a los brazos a través de un rodamiento, y de 2 varillas de sección cuadrada usadas para alinear todos los componentes del álabe, a la vez que para proporcionar algo de rigidez extra.

En la parte superior en inferior también hay 2 piezas que sirven que están unidas al álabe mediante tuercas y sirven para hacer de tope para las varillas de sección rectangular.

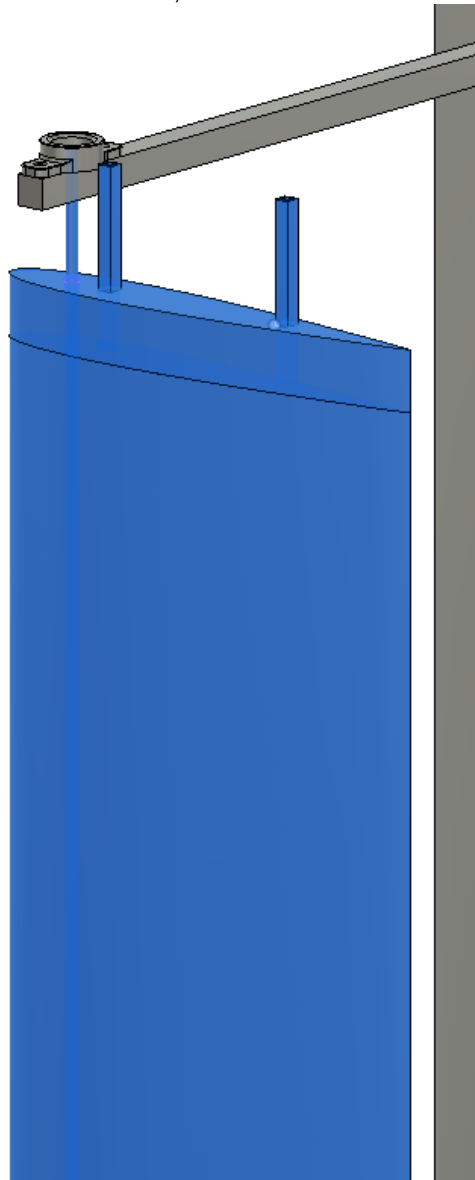


Ilustración 5-Ensamblaje del álabes en CAD

2. Brazos de los álabes y acopladores álabes-eje:

Este subconjunto se compone de 6 varillas de sección rectangular de sección 10x10 mm (3 para la parte superior y 3 para la inferior) que se encargan de unir los álabes con el eje.

La union entre los álabes y estos brazos se realiza mediante una pieza impresa en FDM y unida a los brazos mediante 2 tornillos que aloja un rodamiento, este rodamiento también es el alojamiento de la varilla mencionada en el apartado anterior.

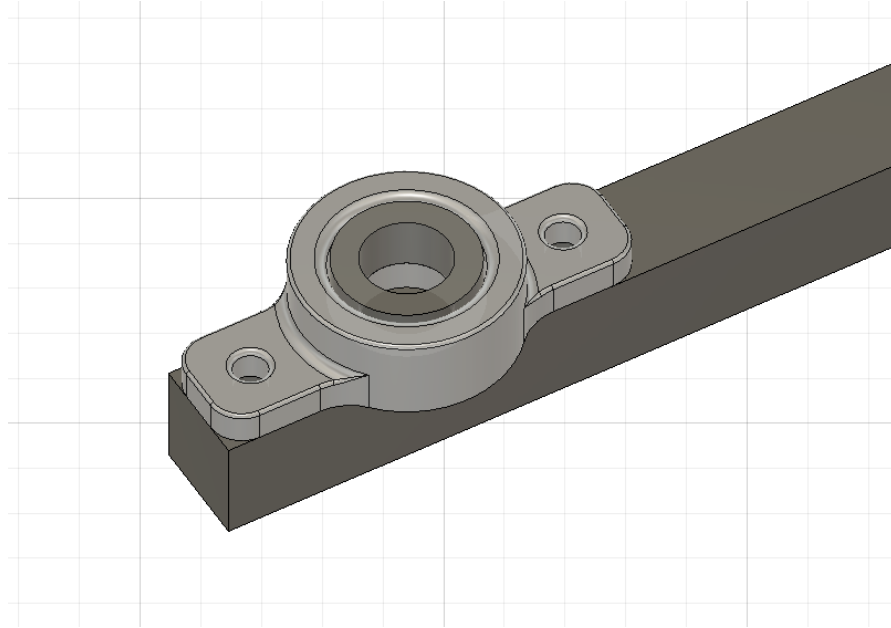


Ilustración 6-Rodamientos de los álabes en CAD

Las varillas también van unidas mediante un conjunto tornillo-tuerca a la pieza impresa en FDM, que a su vez, también va atornillada al eje.

Esta pieza es de sección circular, con 3 angulaciones diferentes en las que colocar los álabes.

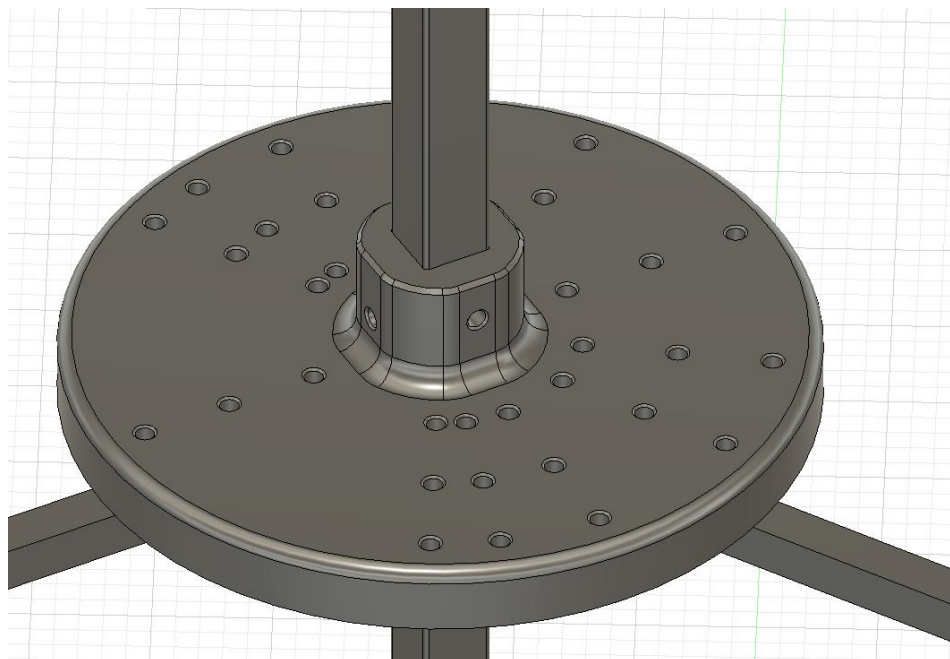


Ilustración 7-Pieza de soporte de los brazos

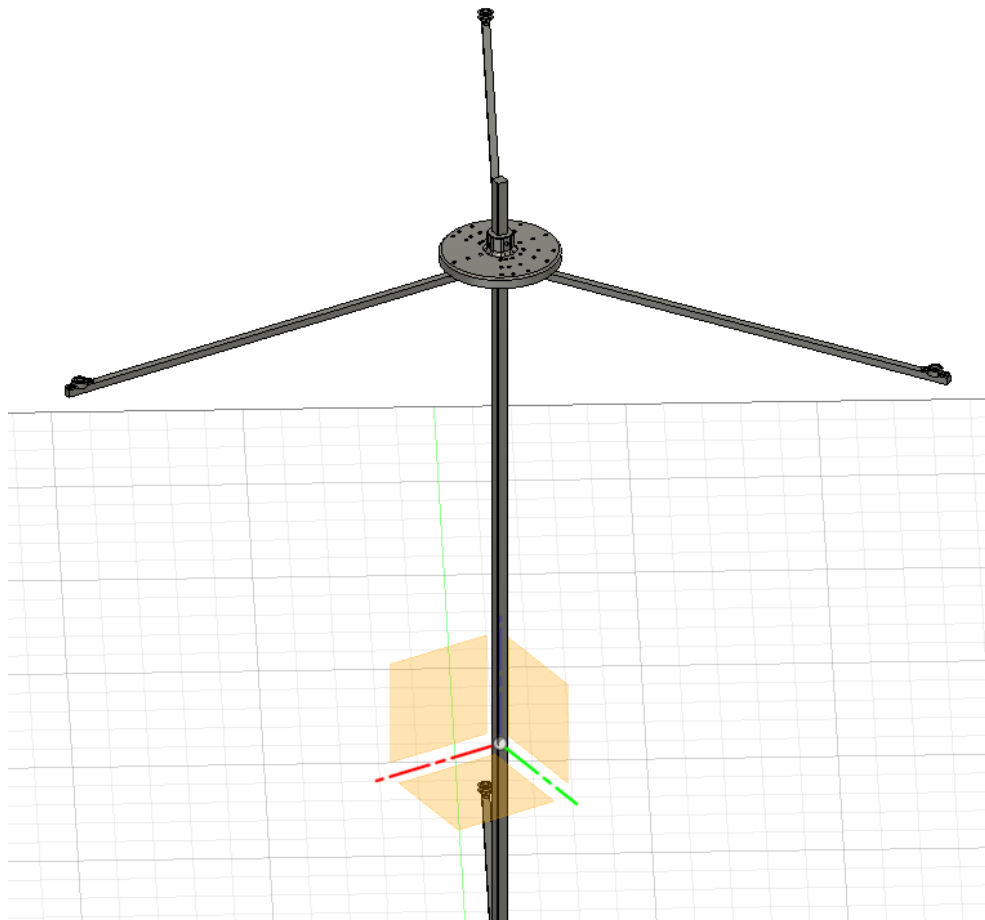


Ilustración 8-Ensamblaje de los soportes de los álabes

3. Bases y uniones al eje

El generador dispone de 2 niveles de bases, cada uno de ellos compuesto de 2 láminas circulares de metacrilato de 10 mm de espesor, la base inferior también dispone de una lámina de aluminio de 3 mm de espesor.

Estas bases van unidas entre ellas por 6 varillas roscadas y aseguradas por una tuerca con tapón por cada varilla, al final de estas varillas también se han colocado unas ruedas para facilitar el transporte.

Las bases, al igual que los álabes en el apartado anterior van unidas al eje mediante rodamientos, que a su vez asientan en una pieza impresa en FDM atornillada al eje.

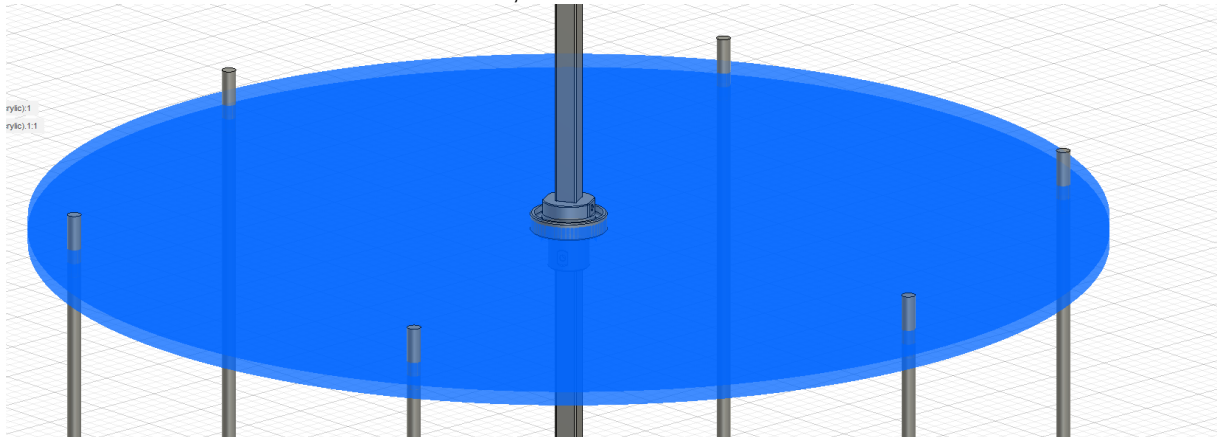


Ilustración 9-Bases y uniones al eje

4. Sistema de frenado y medición de potencia.

Finalmente, en la parte inferior encontramos el sistema de medición de potencia.

Este sistema está compuesto por un freno de bicicleta unido al eje.



Ilustración 10-Sistema de frenado

Cuando el generador está girando el sistema se queda estático, es decir, no gira solidario con el eje, pero al activarlo se unen y desplaza una varilla, que hace tope con un dinamómetro, el cual muestra la fuerza que transmite el generador.

Con este valor de la fuerza se puede calcular fácilmente la potencia que estaba generando el generador en ese momento.



Ilustración 11-Dinamómetro usado

4.3 Teoría aerodinámica de álabes que rotan paralelamente al eje azimutal

La velocidad de corriente libre del viento se representa como V_{∞} , mientras que α indica el ángulo de ataque del álabe y c representa la longitud de la cuerda del álabe. F se refiere al empuje aerodinámico, cuya componente perpendicular al viento se conoce como "Lift" (sustentación), mientras que la componente paralela al viento se denomina comúnmente "Drag" (arrastre)[4].

Además, L representa la fuerza de sustentación por unidad de longitud del álabe o pala, y D es la fuerza de arrastre por unidad de longitud del álabe o pala. La resultante F también se puede descomponer en las componentes Normal y Axial, que son perpendiculares y paralelas, respectivamente, a la cuerda del álabe.

Para presentar las fuerzas de empuje y sustentación de manera adimensional, se utilizan los coeficientes C_L y C_D [10].

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c},$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot c},$$

Es importante destacar que los coeficientes de sustentación y arrastre dependen tanto del ángulo de ataque α como de la velocidad de la corriente de aire en la que operan, representada por V_∞ .

En el caso de los álabes utilizados en turbinas S-VAWT, el ángulo de ataque abarca un rango que va desde -180° hasta $+180^\circ$.

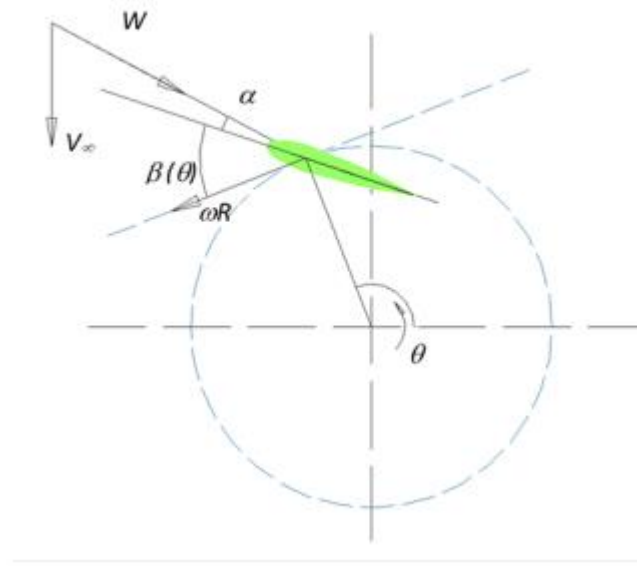


Ilustración 12-Esquema del ángulo de ataque

Estas fuerzas son producidas por la diferencia de presión en los extremos de los perfiles NACA empleados como álabes en este tipo de generadores.

4.3.1 Perfiles NACA

Los perfiles NACA son un tipo de perfil aerodinámico utilizado en la industria aeronáutica y de la aviación desde principios del siglo XX. Estos perfiles fueron desarrollados por el National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), una agencia gubernamental estadounidense responsable de la investigación y el desarrollo en el campo de la aviación.

Historia del Perfil NACA

Durante los 3 últimos siglos se han producido una gran cantidad de avances para un periodo relativamente corto como este.

Estos avances comenzaron en 1799, cuando Sir George Cayley postuló que el aire, al fluir encima de una superficie fija y curvada se aceleraría y crearía una fuerza hacia arriba, llamada sustentación.

El siguiente cambio de produce en 1866, cuando **Francis Herbert Wenham** publicó el informe: 'Locomocion aerea' . En este documento se introdujo el concepto de alas superpuestas en una máquina voladora, un concepto que ya había sido probado por el mismo 8 años atrás, creando un planeador que nunca llegó a volar. En este mismo año 1866 el diseño fue patentado y se convirtió en la base de los biplanos, triplanos y multiplanos que planearon en las décadas de hasta 1890 .HERbert Wentham también es considerado, junto a John Browning, el primero en diseñar el primer túnel de viento, donde pudieron validar experimentalmente que las alas larga y estrechas presentan una relación más favorable entre las fuerzas de sustentación y arrastre que las alas cortas y gruesas.

En 1884, Horatio Frederick Philips patentó una serie de perfiles, llamados sustentadores, que habían sido analizados previamente en un túnel de viento que el mismo había ideado y que, a diferencia de los túneles de viento de la época, funcionaba mediante un flujo de vapor y no de agua.

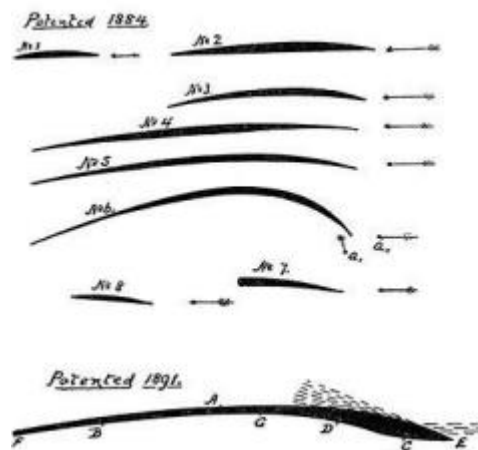


Ilustración 13-Perfiles sustentadores

En esa misma época, Otto Lilienthal compartía la visión de que uno de los factores más importantes para el éxito del vuelo era un diseño correcto de la curvatura.

Gracias a su visión de la aerodinámica, realizó un estudio de la forma de las alas de distintos tipos de aves y estudió y experimento con algunos perfiles parecidos, variando espesor y radio de curvatura. Todo fue recogido en su libro 'bird flight as the basis of aviation'.

Gracias a las 2 últimas investigaciones, los hermanos Wright experimentaron con un túnel aerodinámico las fuerzas de sustentación producidas por distintos perfiles alares. Gracias a este estudio fue posible construir el Flyer I, el primer aeroplano en realizar un vuelo controlado.

Se siguieron desarrollando perfiles aerodinámicamente sustentadores, sobre todo a partir de la necesidad de mejora de la aviación que creó la primera guerra mundial. Los más exitosos fueron el Clark Y y la serie de perfiles RAF(Royal Aircraft Factory), diseñados por el gobierno británico.

En 1915 se creó la NACA(National Advisory Committee for Aeronautics), que desde un principio hizo énfasis en la mejora de la eficiencia de los perfiles existentes.

A partir de los años 30, la NACA desarrolla 3 familias de perfiles, de 4,5 y 6 dígitos.

Hoy en día, los perfiles tienen un rango de aplicaciones muy amplio, desde ventiladores hasta aeronaves y, algunos de ellos, sobre todo los más antiguos, dadas sus características se han vuelto menos apropiados. Actualmente, en Internet se encuentran una multitud de bases de datos donde los ingenieros pueden consultar la geometría y las características de infinidad de perfiles, una herramienta que ha facilitado mucho la selección del tipo de perfil.

Un perfil aerodinámico es una sección transversal de un cuerpo que se mueve a través del aire. El diseño del perfil es crucial para el rendimiento aerodinámico de un vehículo, ya que afecta la resistencia del aire y la capacidad del vehículo, o aerogenerador en nuestro caso, para generar levantamiento. Los perfiles NACA fueron diseñados específicamente para optimizar estas propiedades y mejorar la eficiencia del vuelo.

Los perfiles NACA se caracterizan por su forma particularmente lisa y sin obstáculos. Esto se debe a que se han diseñado para minimizar la resistencia del aire y reducir la fricción en el flujo del aire sobre el perfil. Esta forma lisa también permite que los perfiles NACA generen una gran cantidad de levantamiento, lo que es esencial para el vuelo de los aviones.

Además de su forma lisa, los perfiles NACA también se caracterizan por su sección transversal curva y su sección media cóncava. Esta forma curva permite que el aire fluya suavemente por el perfil y minimiza la turbulencia, lo que a su vez reduce la resistencia del aire y mejora la eficiencia del vuelo.

En resumen, los perfiles NACA son un tipo de perfil aerodinámico altamente eficiente y versátil que ha sido ampliamente utilizado en la industria aeronáutica durante más de un siglo. Su forma lisa y sin obstáculos, junto con su sección transversal curva y sección media cóncava, hacen que estos perfiles sean excelentes para minimizar la resistencia del aire y generar levantamiento, lo que los convierte en una opción popular para la fabricación de aviones y otros vehículos aéreos[21].

- Principio de Bernoulli:

Este teorema establece que un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento y en régimen de circulación por un conducto cerrado mantiene la energía que posee el fluido constante, lo que significa que la presión y la velocidad del aire están inversamente relacionadas. En otras palabras, cuanto más rápido se mueve el aire, menor es la presión. Los perfiles NACA se diseñan para que el aire fluye más rápido sobre la parte superior del perfil y más lento por debajo, lo que genera una diferencia de presión y provoca un levantamiento.

La energía consta de 3 componentes;

- El cinético, debida a la velocidad del flujo.
- El potencial gravitacional, debida a la altitud del fluido.
- La energía de flujo, debida a la presión a la que está sometido el fluido

Este teorema es una aplicación del principio de conservación de la energía. Si despreciamos los esfuerzos de viscosidad y consideramos un flujo estacionario e irrotacional, obtenemos:

$$\rho \nabla \left(\frac{U^2}{2} \right) = -\rho \nabla(gz) - \nabla p \quad (1)$$

Simplificando el gradiente:

$$\partial \Phi = \nabla \Phi \cdot \partial \vec{r}$$

Obtenemos:

$$\rho \partial \left(\frac{U^2}{2} \right) = -\rho \partial(gz) - \partial p \quad (2)$$

Integrando esta última ecuación en 2 puntos(1 y 2):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + gz_2$$

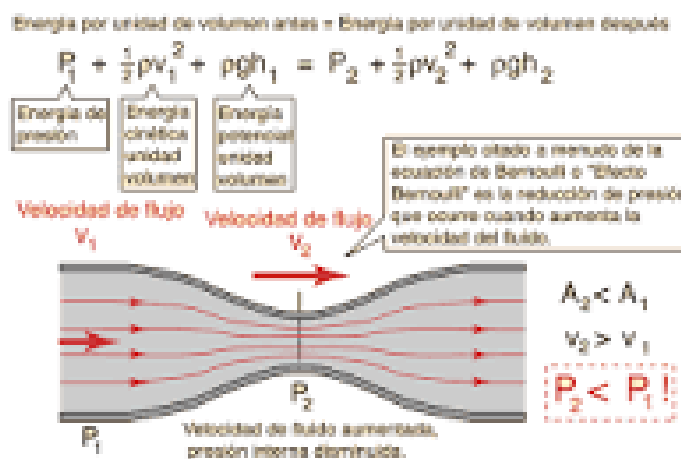


Ilustración 14-Principio de Bernoulli

Cogiendo un perfil como ejemplo y como hemos mencionado antes, el fluido tiene más velocidad en el extrados que en el intrados. Entonces, razonando, sabemos que en el extrados tendremos menos presión, al tener el fluido más velocidad en esta zona.



Figura 3.11: Principio de Bernoulli aplicado al perfil alar (Fuente: Alas)

Ilustración 15-Funcionamiento de un perfil NACA

Ley de Newton de la viscosidad: Esta ley establece que la fuerza de fricción o viscosidad entre dos fluidos es proporcional al producto de la viscosidad del fluido y la superficie de la capa límite. Los perfiles NACA se diseñan para minimizar la fricción entre el aire y la superficie del perfil y reducir la resistencia del aire.

Partes de un perfil NACA de 4 dígitos y nomenclatura:

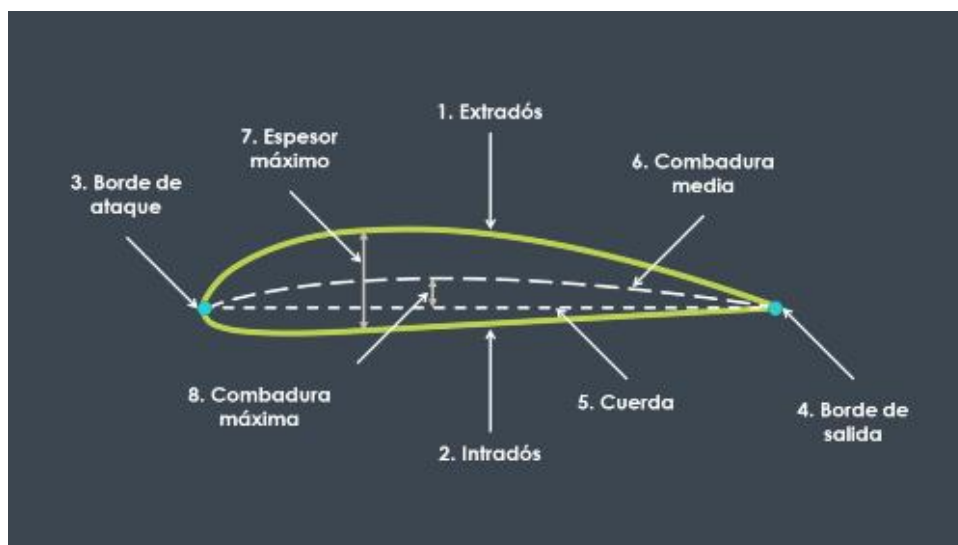


Ilustración 16-Partes de un perfil NACA

Primero encontramos al extradós. Esta es la parte superior del perfil, normalmente en esta parte es donde se genera una presión menor a la atmosférica para permitir el vuelo.

El intradós es la parte inferior.

Se conoce como borde de ataque al punto delantero del perfil.

El borde de salida o borde de fuga es el punto trasero.

La cuerda, es la línea recta imaginaria que une el borde de ataque y el borde de salida.

La línea de combadura media es una línea imaginaria que pasa a través del perfil entre el extradós y el intradós justo por en medio de estos desde el borde de ataque hasta el borde de salida.

El espesor máximo del perfil es donde se encuentra la mayor separación entre el extradós y el intradós. Este parámetro es importante para dejar espacio suficiente para el diseño de la estructura del ala.

La combadura máxima del perfil se refiere a la mayor distancia encontrada entre la cuerda y la línea de combadura media. La combadura máxima del perfil está muy relacionada con la cantidad de sustentación y arrastre que genera un perfil.

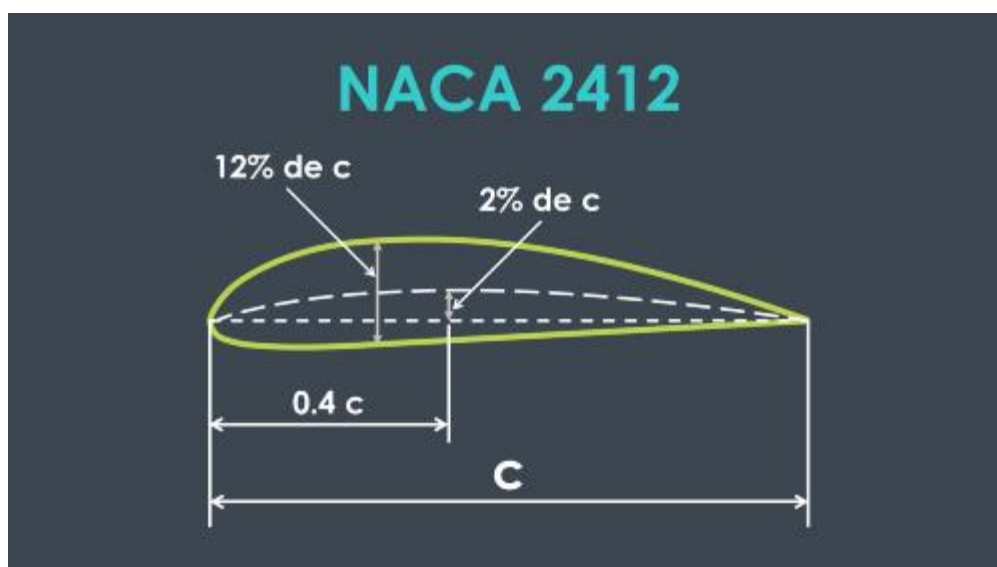


Ilustración 17-Ejemplo de nomenclatura de un perfil NACA

Por ejemplo: supongamos que el perfil de la imagen es un NACA 2412.

El primer dígito nos dice que la combadura máxima del perfil equivale al 2% de la cuerda del perfil.

El segundo dígito nos indica que la posición de la combadura máxima está al 40% de la cuerda.

Los últimos dos dígitos indican el espesor máximo de este perfil, equivale al 12% del valor de la cuerda.

En la web airfoiltools.com, podemos encontrar una base de datos de mas 1600 tipos de perfiles alares, pudiendo exportar puntos para crear nuestros perfiles en CAD.

En nuestro caso, el perfil usado en los álabes del generador es un NACA 0015 con 16 cm de cuerda. Podemos generarlo en la web mencionada anteriormente:

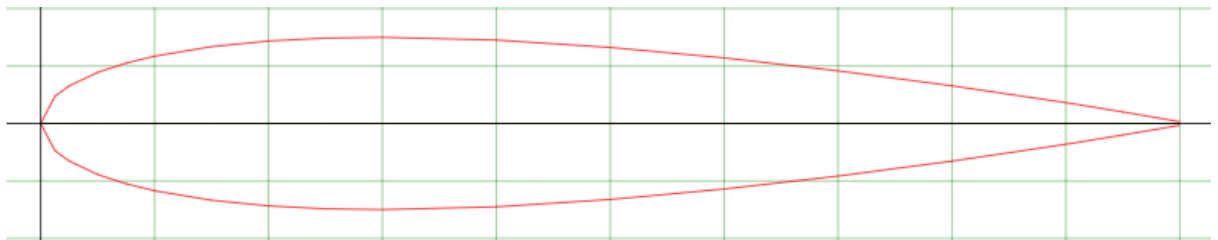


Ilustración 18-Perfil NACA 0015

También podemos encontrar algunas gráficas interesantes para relacionar, por ejemplo el C_d con el ángulo de ataque

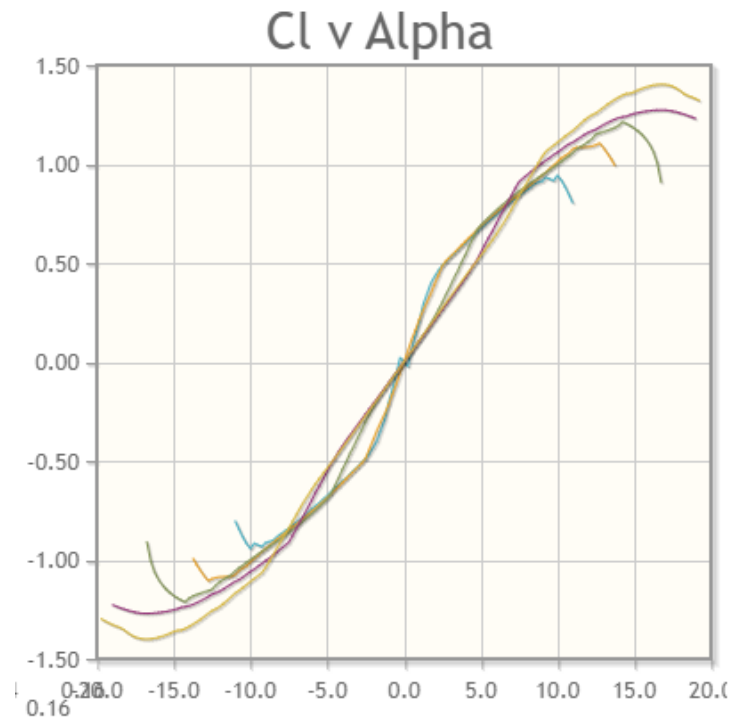


Ilustración 19-Cl de un perfil NACA 0015 respecto al ángulo de ataque

Estos datos nos serán útiles mas adelante, a la hora de colocar los álabes

4.3.2 Regulación del 'Pitch'

La definición de Pitch es el ángulo formado entre el álabe y la línea tangencial. En el caso particular del álabe representado en la figura, el Pitch es igual a cero, lo que significa que el álabe no tiene inclinación con respecto a la trayectoria tangencial; está alineado perfectamente con ella.

En una turbina Darrieus convencional , la posición del álabe en relación con la trayectoria tangencial no cambia; sin embargo, el problema radica en que el ángulo de ataque varía a lo largo de la trayectoria, y la mayoría del tiempo supera los 30 grados. Esto significa que el álabe opera en una situación de pérdida de sustentación y experimenta un alto arrastre.

4.4. Montaje, primera prueba y modificaciones.

Una vez hecho el montaje en CAD, identificados todos los componentes disponibles en el laboratorio y fabricado el nuevo eje, ya tenemos todos los recursos disponibles para montar el prototipo y hacer una prueba.

Pasos en el montaje del prototipo:

1. Montaje de las ruedas y varillas roscadas en las bases de metacrilato:



Ilustración 20-Montaje de ruedas sobre la base

2. Colocación de las bases de metacrilato superiores:

Una vez las ruedas y las varillas están colocadas, es hora de colocar la base superior, para asegurarlas, se usan tuercas tipo tapón.



Ilustración 22-Ensamblaje de las bases



Ilustración 21-Tuerca con tapón

3. Ensamblaje de los soportes para las varillas roscadas de los álabes.

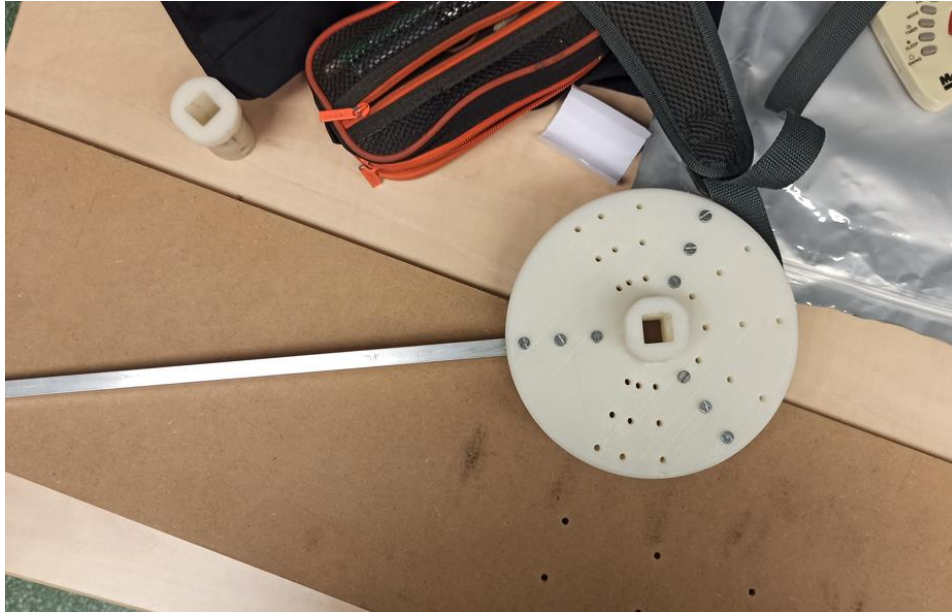


Ilustración 23-Soporte de los brazos del álabe

4. Ensamblaje de los álabes y el mecanismo de regulación del "pitch":



Ilustración 24-Sistema de regulación del pitch

5. Ensamblaje del mecanismo de frenado y medición de potencia:

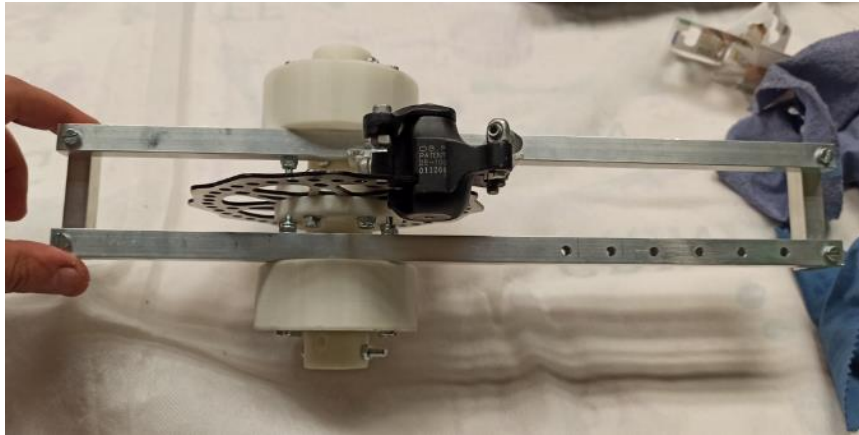


Ilustración 25-Sistema de frenado

6. Montaje de todos los componentes en el eje:

Una vez todos los componentes están ensamblados, el último paso es montarlos en el eje, para las sujeciones de los álabes y del sistema de frenado esto se hace atornillando las piezas auxiliares al eje.

Para los álabes, es suficiente con insertar el eje interior a los pequeños rodamientos unidos a las varillas de perfil rectangular que unen los álabes con los soportes para el eje.

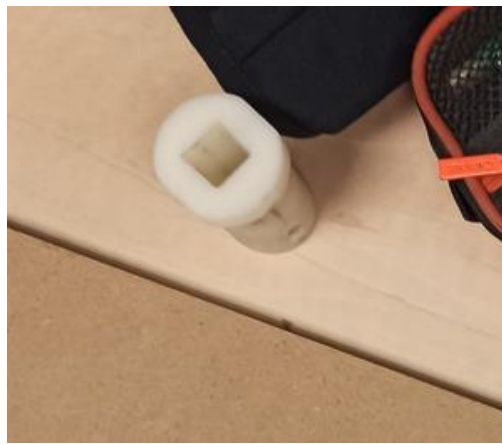


Ilustración 26-Pieza de unión rodamiento-eje



Ilustración 27-Montaje de todos los componentes sobre el eje

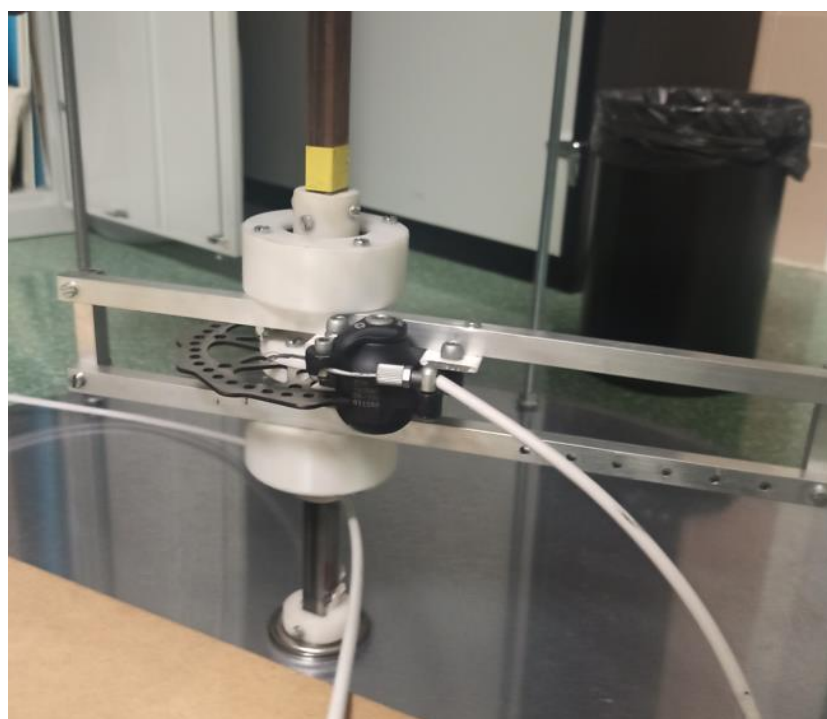


Ilustración 28-Sistema de frenado montado

4.4.1. Pruebas Iniciales

Una vez el prototipo se encuentra montado completamente, es recomendable hacer una primera prueba.

Para esta prueba, se ubicó el prototipo en la terraza del edificio A3 de la Escuela Politécnica Superior de Jaén durante un período de prueba de aproximadamente 1 mes, durante el mes de Agosto de 2022.



Ilustración 29-Prototipo en la terraza del edificio A3 de la EPSJ

Desafortunadamente, durante esta época del año el viento no tiene la velocidad necesaria para poder hacer pruebas a altas velocidades de V_{∞} .

Por otra parte, es una época beneficiosa para probar su resistencia a las inclemencias climáticas, ya que durante ese mes de prueba se sucedieron días de altas temperaturas con días puntuales de lluvia y alta velocidad de viento.

Al colocar el prototipo, a pesar de la poca velocidad del aire, este comenzó a girar sin ningún tipo de ayuda, alcanzando velocidades de giro relativamente bajas pero con resultados muy buenos teniendo en cuenta las condiciones.

En cuanto a la resistencia del prototipo, al recoger la maqueta se observaron cuáles eran sus puntos débiles, los cuales tienen soluciones fáciles.

Por una parte, al estar girando tanto tiempo, a pesar de ser a bajas velocidades, las varillas de fibra de vidrio que sirven como eje individual para cada álabe estaban dañadas. La solución para este problema es cambiar las varillas de fibra de vidrio por otras varillas de la misma medida pero de acero, esto mejorará la resistencia e impedirá que se vuelvan a deteriorar pero también añadirá peso a los álabes, lo que producirá una pérdida de potencia, de la cual no hay que preocuparse ya que será ínfima.



Ilustración 30-Varillas de fibra de vidrio



Ilustración 31-Varillas roscadas metálicas

El siguiente defecto encontrado en la prueba, está relacionado al anterior, en este caso, los perrillos que sujetan las varillas, debido al desgaste se habían soltado, ya que la rosca estaba algo dañada, la solución fue cambiarlos por unos del mismo modelo.



Ilustración 32-Perrillo de sujección

Finalmente, como medida preventiva se han cambiado todos los rodamientos.

En la siguiente imagen podemos ver el antiguo rodamiento (izquierda) y el nuevo modelo, que incluye menos grasa, lo que reduce el rozamiento y aumenta la eficiencia.



Ilustración 33-Rodamientos antiguo y nuevo

5. PROTOTIPADO RÁPIDO Y MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

El término "prototipado rápido" hace referencia a cualquier tecnología que pueda transformar un diseño en CAD en un modelo físico y tangible. Una impresora 3D es una herramienta que habilita al diseñador para crear prototipos de sus diseños de manera eficaz y ágil. Estas tecnologías no solo son útiles para generar prototipos, sino que también tienen la capacidad de fabricar herramientas y piezas que poseen una calidad comparable a las producidas en una línea de producción convencional.

El proceso de prototipado rápido resulta particularmente idóneo para la fabricación de pequeños lotes de producción y objetos con geometrías intrincadas. Sin embargo, es importante destacar que la velocidad en este contexto es relativa, ya que el tiempo requerido para fabricar los modelos varía significativamente dependiendo del tamaño y complejidad del objeto, oscilando desde 24 hasta 72 horas[7].

Dentro de la tecnología de modelado por deposición fundida, se utiliza un filamento compuesto de un termoplástico. Este filamento es expulsado a través de una boquilla que normalmente se desplaza en el plano X-Y. El filamento se deposita

cuidadosamente sobre una superficie plana y uniforme, donde el extrusor procede a aplicar capa tras capa del material.

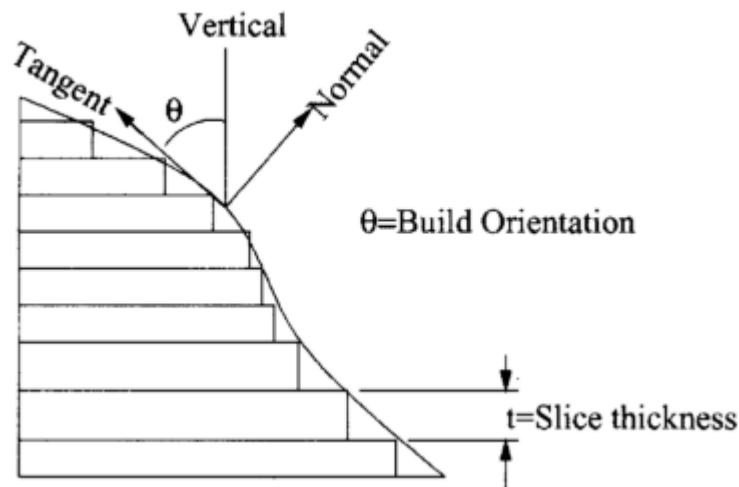


Ilustración 34-Funcionamiento de FDM

A pesar de las diferentes tecnologías de impresión disponibles, todas siguen un proceso similar que involucra varias etapas distintas:

- **Creación del diseño CAD (Diseño Asistido por Ordenador):** El proceso comienza con la creación del diseño en un software de CAD. Aquí, los diseñadores crean el modelo tridimensional de la pieza que desean imprimir, generando un sólido digital.

- **Conversión a formato STL (Standard Tessellation Language):** Cada software CAD utiliza algoritmos diferentes para representar objetos sólidos. Para simplificar y unificar el proceso, se convierte el diseño CAD a un formato común conocido como STL. Este formato de archivo excluye detalles como color, texturas y propiedades físicas que no son necesarios para la impresión 3D. El resultado es un archivo STL que representa la misma pieza, pero esta vez se representa mediante triángulos como una aproximación al objeto CAD.

- **Laminado del archivo STL:** En esta etapa, el archivo STL se prepara para la impresión física. Se ajusta el tamaño, la disposición y la orientación del objeto en la superficie de impresión. Un software específico ejecuta un proceso denominado laminado sobre el objeto STL, creando capas del objeto con un grosor determinado

según sea necesario. Este programa también puede generar estructuras de soporte para mantener el objeto durante la impresión y garantizar su integridad.

Es importante mencionar que el formato STL es el más comúnmente utilizado, pero existen otros formatos igualmente válidos, como OBJ, AMF y 3MF, que también pueden ser empleados en el proceso de impresión 3D.

5.1. TIPOLOGÍA DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La norma UNE-EN ISO 10360-1 hace una clasificación de la tipología más habitual de máquinas medidoras por coordenadas

5.1.1. *Cartesianas*

Estas impresoras 3D se conocen como impresoras cartesianas debido a su sistema de coordenadas XYZ. En este tipo de impresora, el movimiento del extrusor se lleva a cabo en dos ejes, específicamente los ejes X y Z, mientras que la base de impresión se desplaza a lo largo del eje Y. Además, este sistema de coordenadas implica que la base de impresión tenga una forma cuadrada o rectangular.

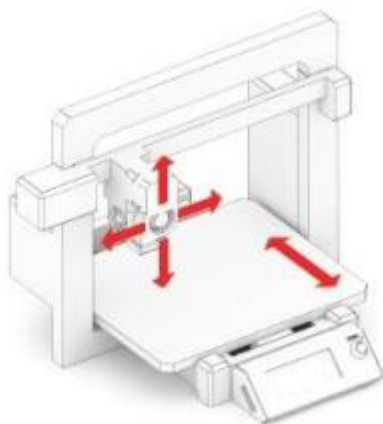


Ilustración 35-Impresora cartesiana

5.1.2. *Delta*

Estas impresoras se conocen como impresoras delta. En este tipo de impresora, el movimiento del extrusor está controlado por tres brazos móviles que convergen en el extrusor en el centro. Tienen dos ventajas principales: alta velocidad de impresión y la capacidad de imprimir objetos de gran volumen. Sin embargo, las impresoras delta también presentan desafíos, ya que requieren un montaje y

calibración extremadamente precisos. La geometría de la impresora delta exige cálculos complejos para coordinar el movimiento de los motores en cada uno de los brazos.

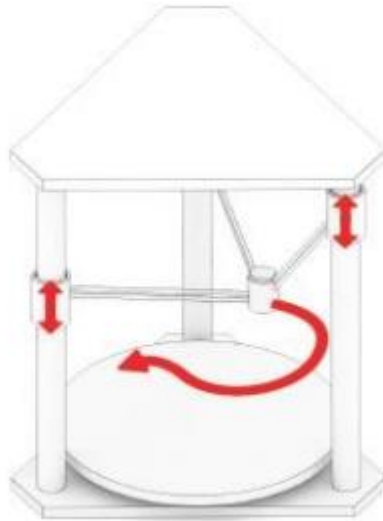


Ilustración 36-Impresora delta

5.2. COMPONENTES DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

5.2.1 Extrusor

El extrusor es la parte de la impresora que tiene la responsabilidad de suministrar el filamento al cabezal de impresión (o fusor) donde se funde y deposita capa tras capa para crear el objeto impreso en 3D.

-Tipos de extrusores:

Dentro de la categoría de extrusores, se encuentran dos tipos principales en función del método de accionamiento, como se ha mencionado anteriormente: los extrusores directos y los extrusores Bowden. Estos dos tipos de extrusores se diferencian en la forma en que alimentan el filamento a la boquilla de impresión:

1. Extrusor Directo: En un extrusor directo, el motor que empuja el filamento se encuentra ubicado directamente encima o cerca de la boquilla de impresión. Esto

significa que el filamento se alimenta directamente desde el extrusor hacia la boquilla en un recorrido corto y controlado. Esto facilita un mayor control sobre la extrusión y es especialmente útil para imprimir con filamentos flexibles y sensibles a la presión.

2. Extrusor Bowden: En un extrusor Bowden, el motor que alimenta el filamento se encuentra separado de la boquilla de impresión. El filamento se mueve a través de un tubo largo y flexible, llamado Bowden, desde el extrusor hasta la boquilla. Este diseño reduce el peso en el extremo del carro de impresión, lo que puede permitir una impresión más rápida y precisa en ciertos casos. Sin embargo, puede ser más difícil imprimir con filamentos flexibles debido a la distancia entre el extrusor y la boquilla.

La elección entre un extrusor directo y un extrusor Bowden depende de las necesidades específicas de impresión y las características de los materiales que se utilizarán en el proceso de impresión 3D.

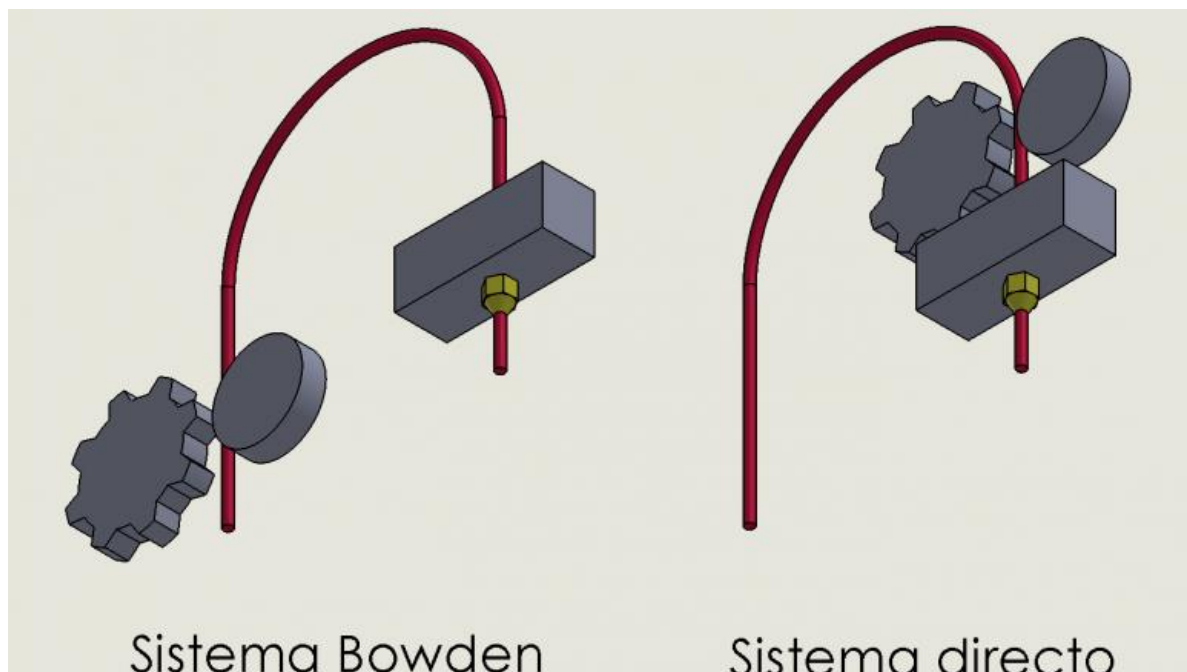


Ilustración 37-Extrusor Bowden y extrusor directo

5.2.2. Fusor

El componente de la impresora donde se funde el material y se expulsa para depositarlo se conoce como el fusor. Según lo indicado por BCN3D en su publicación "The Anatomy of an Extrusion System", las partes más comunes de la anatomía de un fusor son las siguientes:

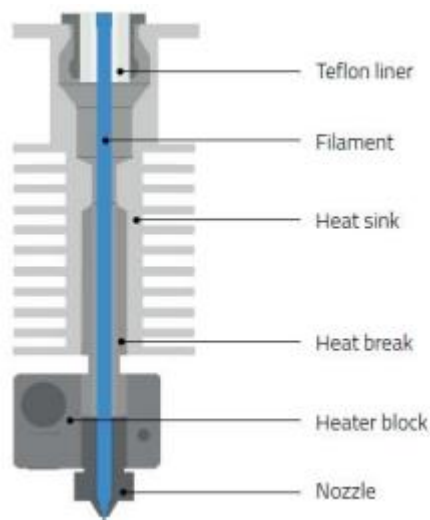


Ilustración 38-Fusor

1. Bloque Calentador (Heater Block): El bloque calentador es la parte del fusor que contiene la resistencia calentadora. Su función es calentar el filamento hasta que se derrita y pueda ser extruido a través de la boquilla. La temperatura del bloque calentador se controla con precisión para fundir el material de manera adecuada.

2. Termistor (Thermistor): El termistor es un sensor de temperatura que se coloca cerca del bloque calentador para medir la temperatura del mismo. Esta información se utiliza para controlar y regular la temperatura durante la impresión.

3. Boquilla (Nozzle): La boquilla es la parte del fusor a través de la cual el material fundido es extruido hacia la superficie de impresión. La elección de la boquilla afecta a aspectos como el diámetro del filamento extruido y la precisión de la impresión.

4. Enfriador de Ventilador (Cooling Fan): Un ventilador de enfriamiento suele estar ubicado cerca de la boquilla para enfriar rápidamente la capa de material depositado, lo que ayuda a evitar deformaciones y mejorar la calidad de la impresión, especialmente en estructuras sobresalientes.

5. Bloque de Soporte (Support Block): Algunos fusores pueden incluir un bloque de soporte adicional que sostiene la boquilla y proporciona estabilidad al conjunto.

6. Motor de Extrusión (Extrusion Motor): El motor de extrusión es el encargado de avanzar el filamento hacia el fusor. Este motor gira un engranaje o una rueda dentada que empuja el filamento hacia el bloque calentador.

Estos componentes trabajan juntos para fundir y extruir el material de manera controlada, permitiendo así que la impresora 3D deposite capas sucesivas de material para crear el objeto deseado.

5.2.3. Superficie de impresión

La superficie donde se deposita el filamento fundido que sale del fusor se conoce como la "cama de impresión". Para mantener una temperatura constante y mejorar la adherencia de la pieza impresa, esta superficie suele estar equipada con una función de calefacción, por lo que se le denomina comúnmente "cama caliente". La cama caliente puede tener diferentes acabados para favorecer la adherencia inicial del material y facilitar la extracción de la pieza una vez completada la impresión. Estos acabados pueden incluir superficies texturizadas, recubrimientos especiales u otros tratamientos que ayuden a que la pieza se mantenga firmemente sujeta durante el proceso de impresión y retira que sea más fácil de vez que se enfría.



Ilustración 39-Cama caliente

5.2.4 Cuadro

El cuadro es la estructura que sostiene y soporta la impresora 3D. Un cuadro que sea rígido y fabricado con alta precisión tiene un impacto significativamente positivo en la calidad de impresión. Un cuadro robusto y firme tiene la capacidad de reducir al mínimo las vibraciones no deseadas, lo que a su vez permite que la impresora trabaje a velocidades más altas sin comprometer la calidad de las piezas impresas.

En resumen, la calidad y la estabilidad del cuadro son elementos fundamentales para lograr resultados satisfactorios en la impresión 3D.

5.2.5 Motores paso a paso

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que realiza la conversión de una señal eléctrica en energía mecánica y posición angular. Está compuesto por un estator con bobinas llamadas fases y un rotor con un gran número de polos. Su funcionamiento es sincrónico, lo que significa que la alimentación cíclica de sus fases provoca un cambio en la configuración que resulta en un giro controlado del rotor, conocido como "paso".

En el contexto de las impresoras 3D, se utiliza el motor paso a paso en la mayoría de los casos debido a varias características que lo hacen especialmente adecuado:

1. **Precisión:** Estos motores son altamente precisos y pueden utilizarse en aplicaciones sin necesidad de retroalimentación o sensores de posición adicionales. Su posición se controla de forma efectiva mediante la secuencia de impulsos eléctricos.

2. **Par de torsión:** Los motores paso a paso producen un par de torsión significativamente alto a bajas velocidades angulares. Esto es beneficioso para movimientos precisos y controlados, comunes en la impresión 3D.

3. **Mantenimiento de la posición:** Pueden mantener una posición de manera estable y constante simplemente aplicando corriente a las bobinas, lo que es

esencial en la impresión 3D para evitar el desplazamiento accidental durante la impresión.

4. Control de velocidad y aceleración: Son fáciles de controlar en términos de velocidad y aceleración, lo que permite gestionar la inercia y las frenadas para lograr movimientos suaves y fluidos.

El principio básico de funcionamiento de un motor paso a paso radica en la conversión de impulsos eléctricos en movimientos angulares discretos. La cantidad de grados que gira el motor en cada paso o medio paso depende de las señales de control que recibe. Esto permite un control preciso de la posición y es fundamental en la fabricación aditiva, como la impresión 3D, donde se requieren movimientos y posicionamientos precisos capa por capa.



Ilustración 40-Motores paso a paso

5.2.5. Husillo

Es bastante común que las impresoras 3D utilicen husillos de rosca trapezoidal para el movimiento del eje Z. Los husillos de rosca trapezoidal son una opción popular debido a su capacidad para proporcionar un movimiento lineal preciso y estable en el eje vertical, que es esencial en la impresión 3D para construir objetos capa por capa de manera precisa.

Estos husillos están diseñados con una rosca trapezoidal en lugar de una rosca de paso uniforme. Esto significa que las ranuras de la rosca tienen un perfil trapezoidal, lo que les permite generar fuerzas de sujeción significativas y minimizar el juego o la holgura en el movimiento vertical. Además, los husillos de rosca trapezoidal son altamente eficientes y pueden soportar cargas verticales considerables, lo que es esencial cuando la plataforma de impresión se mueve hacia arriba y hacia abajo durante el proceso de impresión.

Las características principales del husillo son las siguientes:

- Número de entradas (z) o filetes de rosca: Se refiere al número de hélices o surcos que se enroscan en paralelo sobre el núcleo del husillo. Este número de entradas determina cuántas vueltas completas debe dar el husillo para que la tuerca se desplace una distancia específica.
- Paso de rosca (p): Es la distancia entre dos filetes consecutivos de una misma hélice en el husillo de rosca. El paso de rosca se mide en milímetros (mm) y determina cuánto se desplaza la tuerca en el eje Z en una sola vuelta completa del husillo.
- Avance (A): El avance es la distancia que avanza la tuerca en el eje Z cuando el husillo gira una vuelta completa. La relación entre el avance, el número de entradas y el paso de rosca se calcula mediante la

fórmula: $A = z * p$. Esto indica cuánto se moverá la plataforma de impresión en una sola revolución del husillo.

- Longitud desplazada (L): La longitud desplazada se refiere a la distancia total que se desplaza la tuerca cuando el husillo gira n vueltas completas. La relación se calcula mediante la fórmula: $L = A * n = z * p * n$. Esto permite determinar cuánto se desplazará la plataforma de impresión cuando el husillo gire un número específico de vueltas.

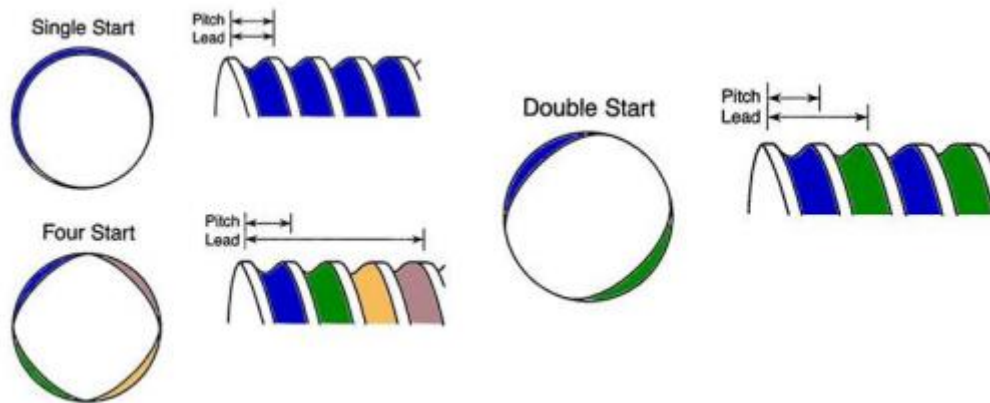


Ilustración 41-Husillo

5.2.6. Poleas

La gran mayoría de las impresoras 3D y sistemas de movimiento emplean correas y poleas dentadas para transmitir el movimiento en los ejes X e Y. En una polea dentada se pueden identificar varios elementos clave:

- Paso (Pitch): El paso se refiere a la distancia entre los centros de dos dientes contiguos en la polea. Es una medida importante, ya que determina la precisión del movimiento y la resolución de la impresora 3D en esos ejes. Un paso más pequeño permite un movimiento más preciso, pero puede requerir más giros de la polea para recorrer una distancia dada.

- **Diámetro Exterior (OD - Outer Diameter):** El diámetro exterior es la medida del diámetro máximo de la polea, desde un extremo al otro. Este valor es importante para calcular la circunferencia de la polea, que se utiliza en las fórmulas para determinar la velocidad y el desplazamiento lineal.
- **Diámetro Interior (ID - Inner Diameter):** El diámetro interior es la medida del agujero central de la polea, a través del cual se monta en un eje o un motor. El diámetro interior debe coincidir con el diámetro del eje o motor al que se va a acoplar la polea.



Ilustración 42-Poleas de una impresora 3D

La elección del tamaño adecuado de la polea dentada, junto con la correcta tensión de la correa, es esencial para garantizar un movimiento preciso y confiable en los ejes X e Y de la impresora 3D. La combinación del paso de la correa y el tamaño de la polea determina la resolución y la precisión del sistema de movimiento.

5.2.7. Sistemas de guiado-Varilla lisa

Uno de los sistemas de guiado lineal más utilizados en impresoras 3D y máquinas CNC es la varilla lisa. Estas varillas lisas, por lo general, se emparejan con

rodamientos lineales, que a menudo son de tipo de recirculación de bolas, aunque también se pueden encontrar otras opciones como rodamientos de bronce o poliméricos. Aquí hay una breve explicación de cómo funcionan estos componentes en conjunto:

- Varillas lisas (o guías lineales): Son barras de metal, generalmente hechas de acero inoxidable o cromado, que proporcionan una superficie lisa y precisa para el movimiento lineal. Los carros o cabezales de la máquina se desplazan a lo largo de estas varillas, lo que permite un movimiento lineal suave y preciso en el eje deseado.

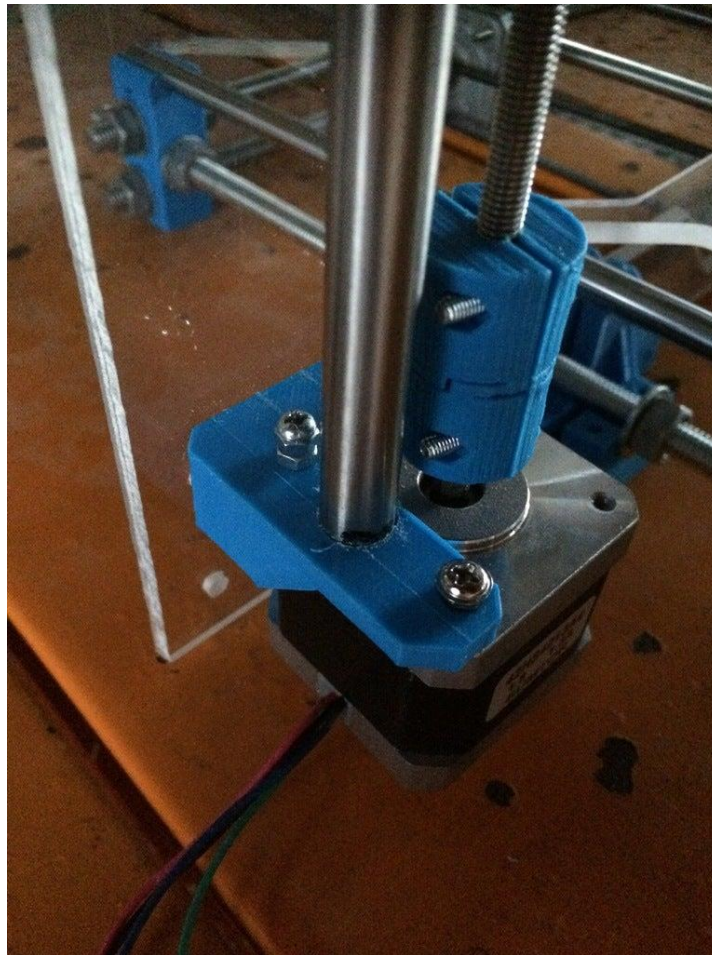


Ilustración 43-Varilla lisa en una impresora 3D

- Rodamientos lineales de recirculación de bolas: Estos rodamientos constan de una carcasa que contiene bolas o rodillos. La carcasa se mueve a lo largo de la varilla lisa, y las bolas o rodillos facilitan un

deslizamiento suave y de baja fricción. Los rodamientos de recirculación de bolas son especialmente eficientes y duraderos, lo que los convierte en una elección común para aplicaciones de impresión 3D y CNC.

- Otros tipos de rodamientos lineales: Además de los rodamientos de recirculación de bolas, también se pueden emplear otros tipos de rodamientos lineales según las necesidades y requisitos de la aplicación. Por ejemplo, los rodamientos de bronce o poliméricos son opciones que pueden ser adecuadas en ciertas situaciones, ya que ofrecen características específicas como la resistencia a la corrosión o una operación sin lubricación.

En resumen, el sistema de varillas lisas y rodamientos lineales es esencial para proporcionar un movimiento lineal preciso y suave en las impresoras 3D y otros sistemas de control numérico. La elección del tipo de rodamiento depende de factores como la carga, la velocidad, la precisión y el entorno de trabajo.

5.2.8. Sensores de nivelación

La nivelación automática en impresoras 3D se logra mediante sensores que pueden ser de tipo mecánico o electrónico. En muchos de los casos analizados, se utilizan sensores inductivos del tipo NPN para este propósito.

El funcionamiento de estos sensores sobre las superficies de impresión es relativamente simple. Los sensores inductivos son capaces de detectar metales a distancias cortas sin necesidad de contacto físico. Estos sensores incorporan un oscilador transistorizado cuyo consumo de corriente se ve influenciado por la proximidad de metales a la bobina del oscilador mencionado. La bobina se encuentra alojada en la cabeza del sensor, mientras que el circuito oscilador se encuentra en el cuerpo del mismo. Esto da lugar a que estos sensores tengan una forma cilíndrica característica. La variación en la intensidad de la corriente en la bobina es detectada por el circuito electrónico del sensor, y a través de un

amplificador se convierte en una señal usable para realizar la nivelación automática o la detección de la superficie de impresión.

En resumen, los sensores inductivos NPN son componentes clave para lograr la nivelación automática en las impresoras 3D, ya que pueden detectar metales sin contacto físico y proporcionar información esencial para garantizar una superficie de impresión nivelada y de alta calidad.



Ilustración 44-Sensor de nivelación

5.2.9 Sensores térmicos

Es comúnmente utilizado el uso de termorresistencias en máquinas de modelado por deposición fundida, como las impresoras 3D. Estos sensores se encuentran en diversas partes de la máquina y desempeñan un papel esencial en la medición y el control de la temperatura. En los antecedentes, se menciona la presencia de termorresistencias en lugares como los fusores, las camas calientes y, en casos específicos, en sensores de nivelación y motores de extrusores.

Las termorresistencias funcionan midiendo la temperatura a través de una resistencia eléctrica que está compuesta por un detector de temperatura por resistencia (RTD) de platino. Estos sensores siguen una curva característica definida por normas específicas que relacionan la resistencia eléctrica con la temperatura. En

otras palabras, la resistencia eléctrica en el sensor cambia de manera predecible con los cambios en la temperatura.

Cuando la temperatura aumenta, la resistencia eléctrica en la termorresistencia de platino también aumenta de acuerdo con una relación definida. Del mismo modo, cuando la temperatura disminuye, la resistencia eléctrica disminuye de manera consistente. Este comportamiento predecible y lineal hace que las termorresistencias sean ideales para medir y controlar la temperatura con precisión en aplicaciones de impresión 3D, garantizando que los componentes críticos, como el extrusor o la cama caliente, funcionen a la temperatura adecuada para lograr una impresión exitosa.



Ilustración 45-Sensor de temperatura

5.2.10. Firmware

El firmware de una impresora 3D es un componente crucial que actúa como un puente entre el hardware físico de la impresora y el software de control. Se ejecuta en la placa de control de la impresora y se encarga de gestionar todas las órdenes en tiempo real que recibe de diversos programas de software.

Cuando un software de control envía un comando G-code a la impresora, el firmware de la impresora tiene la responsabilidad de interpretar y traducir esos comandos G-code en señales eléctricas que se envían a los diferentes componentes de la impresora, como motores, ventiladores, cartuchos calentadores, pantallas LCD, entre otros.

Por ejemplo, si se envía la orden "G1 X50 Y50" a la impresora, el firmware determina cuánto debe desplazarse el extrusor para llegar a las coordenadas X=50 mm e Y=50 mm, y luego envía las señales eléctricas apropiadas a los motores para que se muevan en consecuencia. El firmware administra una cola de comandos de movimiento y los ejecuta en el orden en que se reciben.

Marlin es un ejemplo de firmware de código abierto que se utiliza ampliamente en impresoras 3D. Surgió a partir de dos firmwares previos llamados Sprinter y Grbl, y se convirtió en el único proyecto de código abierto en agosto de 2011. Desde sus inicios, Marlin ha sido desarrollado para satisfacer las necesidades de la comunidad de entusiastas del proyecto RepRap, pero también se ha adoptado ampliamente por fabricantes comerciales de impresoras 3D, como Ultimaker, Printrbot, Lulzbot y Prusa Research, que lo utilizan o desarrollan variantes basadas en Marlin para sus máquinas. Esto demuestra la versatilidad y la confiabilidad de Marlin como firmware para impresoras 3D.

6. SIMULACIÓN CFD

El primer paso para solucionar el principal problema de diseño del generador, la flexión del eje principal, es calcular las fuerzas que le afectan, para ello, haremos uso de una simulación CFD ('Computer Fluid Dynamics') .

El software usado para realizar la simulación es Simflow, el cual es una interfaz gráfica del paquete OpenFOAM, es un software código abierto con una gran base de usuarios tanto en las áreas profesionales como educativas en la ingeniería[12].

Cuenta con una gran amplitud de herramientas y algoritmos para poder simular cualquier problema fluido mecánico.

Antes de entrar en el proceso de simulación, hay que realizar un modelo simplificado, ya que a parte de simplificar en gran medida el proceso de mallado y cálculo, de hecho, es prácticamente imposible, incluso con equipos altamente cualificados y especializados en este tipo de simulaciones, realizar una simulación satisfactoria de un modelo tan pesado y con tantos componentes como nuestro ensamblaje.

El modelo simplificado, diseñado en Fusion 360 consiste en los 3 perfiles alares situadas a 120° una de otra, en un ángulo de 90 grados respecto al eje.

También se han añadido 2 piezas de unión lo más parecidas posibles a los perfiles reales unidos a los soportes del eje. Estas 2 piezas son prescindibles pero añadirlos nos permitirá comprender mejor la turbulencia que crean tanto los perfiles NACA como el conjunto total del generador.

En cuanto a la simulación, se trata de una simulación convencional a excepción de que se usará la técnica MRF, para conseguir una malla en rotación con velocidades tanto del aire como del generador equivalentes a las pruebas experimentales realizadas anteriormente y que nos permita obtener resultados lo más fiables y parecidos a la realidad posibles.

6.1. Ecuaciones de conservación

Dado que las técnicas CFD consisten en acoplar la solución de cada una de las celdas del dominio computacional creado para que, en conjunto, podamos obtener una solución cercana al comportamiento del fluido, será necesario deducir las expresiones en forma conservativa o diferencial. Para ello usaremos el teorema de transporte de Reynolds y el Teorema de Gauss.

6.1.1. *Teorema de transporte de Reynolds***Teorema de Gauss**

Sea S una superficie cerrada que contiene un volumen V y $\vec{v}$ un campo vectorial definido en él. El Teorema de Gauss (o de la divergencia) nos dice que el flujo de $\vec{v}$ a través de S es igual a la integral en V de la divergencia de $\vec{v}$:

$$\int_S d\vec{s} \cdot \vec{v} = \int_V dV \nabla \cdot \vec{v},$$

donde $d\vec{s} = ds\vec{n}$, siendo $\vec{n}$ el vector unitario normal a la superficie (hacia fuera) y ds es el elemento diferencial de superficie. Este teorema nos proporciona una segunda definición de la divergencia de un vector:

$$\nabla \cdot \vec{v} \equiv \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_{S(V)} d\vec{s} \cdot \vec{v},$$

donde el volumen V está definido en el entorno del punto en que se calcula $\nabla \cdot \vec{v}$. Esta definición será muy útil cuando interpretemos físicamente la divergencia de ciertos campos vectoriales.

6.1.2. **ECUACION DE CONTINUIDAD**

Al estar estudiando un flujo monofásico y en ausencia de reacciones químicas, establecemos que la masa ni se crea ni se destruye, solo se transporta.

Esta ecuación expresa matemáticamente el incremento por unidad de tiempo de la magnitud fluida 'masa' encerrada en un volumen de control es nulo. En dicha ecuación, la densidad está vinculada a una partícula fluida concreta, y, por ello, ρ es únicamente función de t (tiempo); $\rho = \rho(t)$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho dV = 0,$$

Esta ecuación puede ser referida a cualquier volumen de control $V_c(t)$ mediante la aplicación del TTR con $\varphi = \rho$:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho dV + \int_{S_c(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n} ds = 0.$$

Como V_f es un volumen arbitrario, el integrando tiene que ser nulo, dando la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0,$$

Que suele ser denominada ecuación de continuidad.

El primer término representa la variación temporal de la masa por unidad de volumen y el segundo es el flujo convectivo de masa por unidad de volumen

6.1.3. ECUACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación principal que describe la dinámica de los fluidos deriva del principio físico enunciado por Newton (Segunda Ley de Newton) que establece que la variación de la cantidad de movimiento de un objeto se debe a las fuerzas que actúan sobre él. Aplicado a un volumen fluido V_f , teniendo en cuenta que $\rho(\vec{x}, t) \sim \vec{v}(\vec{x}, t)$ es la cantidad de movimiento por unidad de volumen de una partícula fluida situada en $\vec{x}$ en el instante t , se escribe:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho \vec{v} dV = \int_{S_c(t)} \vec{n} \tau dS + \int_{V_c(t)} \vec{f}_m \rho dV$$

Aplicando el teorema de Gauss:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho \vec{v} dV &= \int_{V_c(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \int_{S_c} \rho \vec{v} \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_{V_c(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) dV \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}_m \end{aligned} \quad (16)$$

Como estamos trabajando con aire suponemos su compresibilidad despreciable y trataremos el fluido como incompresible, entonces: $\rho, \mu = \text{ctes}$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\vec{v} \vec{v} \vec{n}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \rho \vec{f}_m$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla(\vec{v} \vec{v}) \right) + \vec{v} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) \right] = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \rho \vec{f}_m$$

Dividendo entre ρ :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \nabla \frac{\vec{\tau}}{\rho} + \vec{f}_m$$

En una simulación se discretiza el dominio mediante el empleo de una malla, donde, como se ha comentado anteriormente se resuelven las ecuaciones en los nodos que la forma. Este proceso es llamado discretización espacial.

Para llevar a cabo la discretización espacial la gran mayoría de software de CFD usa el método de volúmenes finitos.

Este método discretiza el volumen en número finito de volúmenes de control o celdas.

Cada uno de los nodos creados en el mallado se ubica en el centro de cada volumen de control, como se muestra en la siguiente imagen:

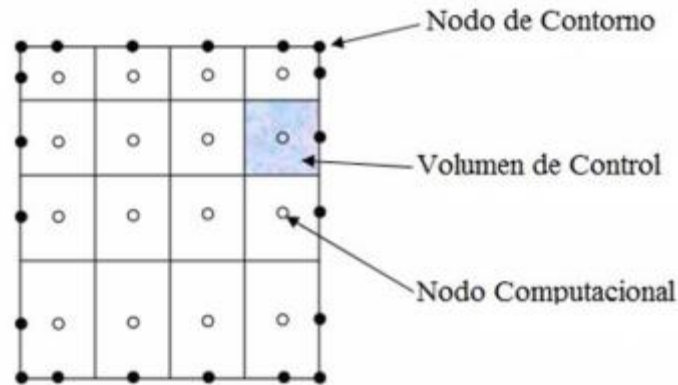


Ilustración 46-Método de volúmenes finitos

El flujo neto de cierta variable fluida a través de los contornos de cierto volumen de control es la suma de las integrales de superficie de las cuatro caras del volumen de control (o seis en 3D). El valor de la variable en cada una de las caras no será posible obtenerlo de forma directa siendo necesaria la interpolación para este propósito. A continuación se detalla la metodología básica de este método:

- En primer lugar se divide el dominio que es objeto de estudio en pequeñas celdas o volúmenes de control.

Se integran las ecuaciones que caracterizan al flujo en forma diferencial sobre el volumen de control y se aplica el teorema de la divergencia.

- Los valores discretos de cierta variable ϕ quedarán descritos por un conjunto de ecuaciones algebraicas que relacionan el valor de la variable en un punto con el valor en los puntos vecinos, tal y como se muestra en la figura. La forma en que se transmite la información entre esos nodos requiere de algún tipo de aproximación, que en el caso de los volúmenes finitos es mediante esquemas conservativos que evalúan los flujos a través de las superficies de control.

- El resultado de todo lo anterior es un conjunto de ecuaciones algebraicas y lineales definidas en cada volumen de control, que habrá que resolver de forma iterativa. Por tanto a mayor número de volúmenes de control, es decir en una malla más fina, tendremos más ecuaciones que resolver por lo que aumentará el coste computacional. No obstante la solución será de mayor calidad al estar definida sobre un mayor número de puntos.

Un concepto clave a tener en cuenta en las simulaciones de CFD es la convergencia.

Una vez iniciado el proceso iterativo, este es repetido hasta que el cambio entre la variable de una iteración a la siguiente se haga tan pequeña hasta cierto límite impuesto por el usuario. En este límite, se supone que la solución que se tiene ya es lo suficientemente precisa para el propósito que se le quiera dar, por tanto una vez, llegados a este punto se para el proceso iterativo y se dice que la solución ha convergido:

El residual es una medida del desequilibrio o error en las ecuaciones de conservación y se define como la diferencia entre el valor de cierta variable con respecto a esa misma variable obtenida en la iteración anterior. Normalmente, si no se requiere mucha precisión se puede afirmar que la solución ha convergido si el residual es del orden de 10^{-3} – 10^{-4} (En el caso de nuestra simulación se han fijado objetivos de 10^{-12}). Durante el proceso iterativo es muy común el monitorizar los residuales en forma de gráficas para ver de antemano la evolución de la simulación. Como se podrá comprobar más adelante el grueso del presente trabajo se fundamenta en esta práctica, así pues la monitorización de los residuales va a ser nuestra principal herramienta para la comparación de los dos métodos acoplado y segregado.

La técnica conocida como "Multiple Rotation Frame" (MRF) representa una alternativa viable para llevar a cabo simulaciones en mallas dinámicas. Esta técnica se emplea en mallas que constan de una zona estacionaria y otra que se encuentra en movimiento a una velocidad angular " Ω ". Su aplicación es relativamente sencilla, ya que implica la interacción entre ecuaciones referentes a sistemas de coordenadas distintos. Para la zona estacionaria de la malla, se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes en un sistema de coordenadas cartesianas fijo. En contraste, para la zona en movimiento, se utilizan las mismas ecuaciones, pero referidas a un sistema en rotación con la misma velocidad angular. Estas dos áreas se combinan para obtener una solución integral.

Esta técnica se revela como especialmente útil en la simulación de bombas hidráulicas o turbinas de diversas tipologías, donde el estator se corresponde con la parte inmóvil de la malla y el rotor es la parte en movimiento.

No obstante, es importante tener en cuenta que desde una perspectiva puramente física, la técnica MRF presenta ciertas limitaciones, dado que solo registra los datos de la malla en la posición en la que se ha generado inicialmente la geometría. Si, por ejemplo, se simula una turbina Darrieus con el rotor posicionado en $\varphi = 0$, los resultados proporcionados por OpenFOAM serán promedios de diversas instantáneas tomadas en esa misma posición a lo largo de múltiples revoluciones del rotor. Esto es particularmente relevante en situaciones donde el número de Reynolds es alto, ya que la simulación es inherentemente transitoria, lo que significa que las propiedades del fluido cambian con el tiempo. Sin embargo, la técnica MRF produce una simulación estacionaria. Si bien esta técnica es adecuada para analizar un momento específico en la interacción del viento con la turbina, no representa necesariamente los datos que caracterizan todo el rango de operación del fluido.

En cualquier caso, los promedios resultantes de esta técnica suelen ser lo suficientemente precisos como para obtener resultados confiables en el contexto de la turbina. No obstante, desde una perspectiva puramente física, lo correcto sería realizar un análisis transitorio que demandaría una mayor capacidad computacional.

6.2. CONFIGURACION DEL CASO

En este caso hemos usado el solver PIMPLE que implementa OPENFOAM, el cual es un solver para casos en los que tenemos régimen transitorio, el cual es concebido para un régimen incompresible sobre una malla móvil (MRF)

6.2.1. *Modelo simplificado*

Para comenzar, hay que insertar el modelo simplificado en Simflow, a su vez, hay que crear un cilindro del mismo diámetro y altura posicionado justo en las

mismas coordenadas que nuestro modelo, esto nos servirá más adelante para configurar la zona de rotación.

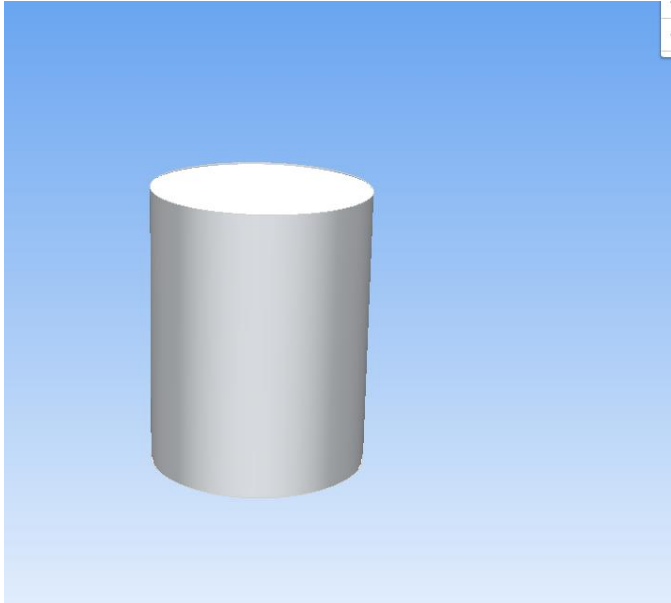


Ilustración 48-Zona MRF

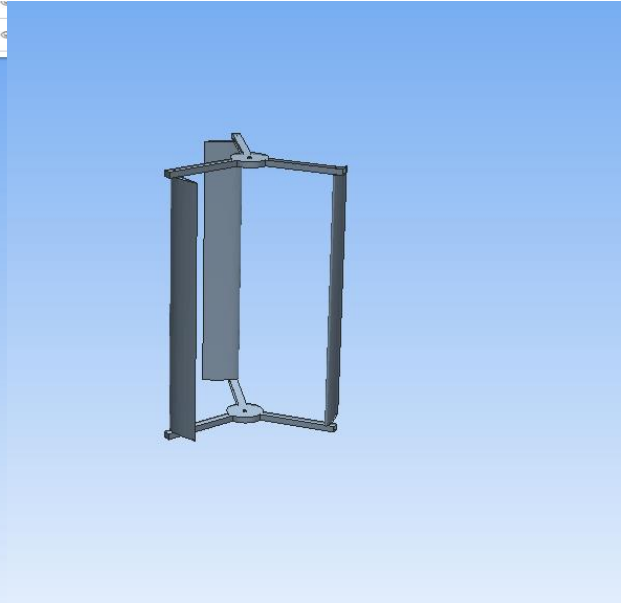


Ilustración 47-Modelo simplificado para la simulación

6.2.2. *Dominio computacional*

Una de las partes fundamentales del preprocesado de una simulación es definir el dominio computacional.

El dominio computacional es el espacio tridimensional en el cual se modela y resuelve el comportamiento de un fluido. En una simulación CFD, se divide el dominio físico, en nuestro caso, el modelo de nuestro generador, en una malla o rejilla tridimensional, compuesta por una serie de elementos más pequeños llamados celdas o elementos finitos.

El dominio computacional abarca todas las celdas en esta malla y representa el espacio en el cual se realizará la simulación CFD. Cada celda en el dominio computacional contiene información sobre las propiedades del fluido en ese punto específico del espacio, como la velocidad, la presión, la temperatura, la densidad, etc. La simulación CFD utiliza ecuaciones de conservación de masa, momento y energía para calcular cómo estas propiedades cambian en cada celda con el tiempo, lo que permite simular el flujo del fluido y su comportamiento en el dominio completo.

El dominio computacional debe ser definido cuidadosamente antes de realizar una simulación CFD, ya que su tamaño y forma afectarán la precisión y la eficiencia de la simulación. La elección del dominio también depende de los objetivos específicos de la simulación, ya que es importante incluir todas las características relevantes del flujo en el espacio de simulación, pero al mismo tiempo se debe mantener un tamaño manejable para el cálculo computacional. Por lo tanto, definir el dominio computacional de manera adecuada es una parte fundamental de la preparación y ejecución de una simulación CFD.

Hay que ser especialmente cuidadoso a la hora de definir el dominio computacional ya que, hacer una malla demasiado grande hará que los resultados de la simulación no sean precisos, en el otro extremo, si hacemos la malla demasiado pequeña, tendremos mucha exactitud en los resultados pero complicará en gran medida el proceso de cálculo, aumentando exponencialmente el coste de recursos a la hora de realizar la simulación, y llegando incluso a producir errores en el cálculo.

En Simflow, para definir este dominio, hay que delimitar la zona donde se realizará la simulación, que en este caso es una caja de dimensiones de 10.5x6x2.3 metros.

Esta caja se dividirá en segmentos más pequeños de aproximadamente 0.13 metros en cada eje.

En cuanto a la división del modelo, se usan zonas de refinamiento, que dividen las celdas del dominio entre 2 y 3 veces para dar más detalle y hacer más realista la simulación.

En las siguientes figuras se pueden observar tanto las divisiones del dominio general como el detalle del modelo.

Geometry			
Min [m]	-2.989	-2.9868	-0.1
Max [m]	7.4744	2.9868	2.2596
Autosize			
Mesh			
Division	80	45	18
Grading	1	1	1
Cell Size [m]	0.13079	0.13275	0.13109

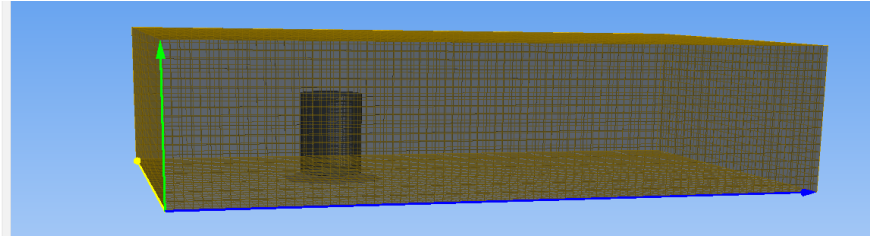


Ilustración 49-Dominio computacional usado en la simulación

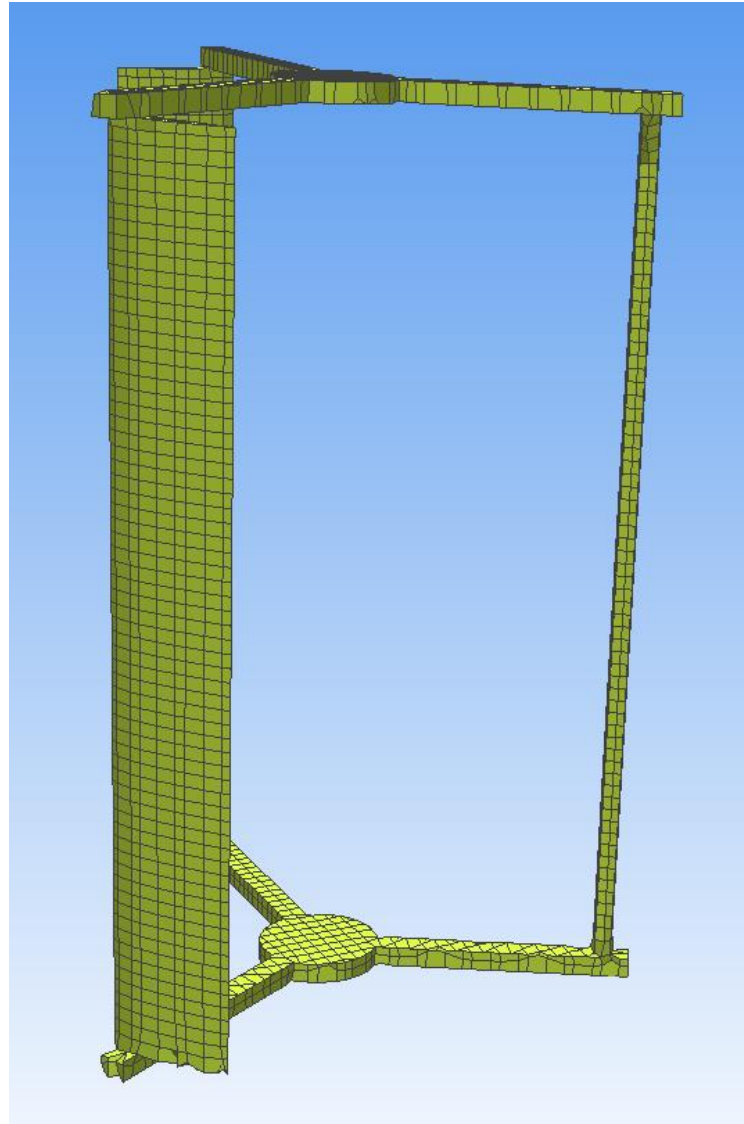


Ilustración 50-Mallado del modelo

6.2.3. *MODELO DE TURBULENCIA: RANS*

El modelo de turbulencia RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes) es posiblemente la herramienta de predicción de flujo mas importante y utilizada en el punto de vista de simulaciones CFD en el ámbito industrial gracias a que supone menor esfuerzo computacional que otros modelos, lo cual implica un ahorro considerable tanto en tiempo como en recursos a la hora de realizar la simulación.

Este modelo fue propuesto por el propio Reynolds en el año 1895, basándose en el concepto de descomponer todas las variables fluidas de interés, usando las ecuaciones de Navier-Stokes, en una parte promediada.

Esta descomposición consiste en sustituir las variables fluidas por la suma de su valor medio y un valor fluctuante en el tiempo y en el espacio.

$$f = \bar{f} + f''$$

Como desventaja, al simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes perdemos algo de información al llegar a la solución final por lo que podemos admitir que este modelo no aportara resultados 100% reales.

Según el número de ecuaciones que usemos para cerrar el sistema podemos considerar los siguientes submodelos:

- Modelos de 0 ecuaciones: Modelo de longitud mezclada de Prandlt

- Modelos de 1 ecuación: modelo de Spalart-Allmaras, en este modelo solo hay que calcular la ecuación de viscosidad cinemática turbulenta

- Modelos de 2 ecuaciones:

Estos modelos son más ampliamente utilizados para computar los modelos RANS. En esta categoría podemos encontrar diferentes modelos como:

- Modelo Estandar k-e: Este modelo, que es el más usado gracias a su robustez y bajo costo computacional, consiste en la resolución de una ecuación para el transporte de energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (e).

Este modelo se usa mayoritariamente para flujos con alto numero de Reynolds y puede ser usado tanto en régimen compresible o incompresible y turbulento o laminar, lo que le otorga una gran versatilidad.

- Modelo realizable k-e: Es el modelo que vamos a usar para nuestra simulación, es muy similar al anterior y añade el término realizable. Este término

significa que el modelo satisface algunas limitaciones en el término de esfuerzos normales.

El modelo k-e cambia respecto al modelo estándar k-e ya que introduce lo siguiente:

-Una nueva ecuación para la disipación de energía cinética turbulenta, involucrando la variable C_u

-Otra ecuación para la disipación de energía cinética turbulenta, basada en la ecuación de la raíz media de la fluctuación de la vorticidad.

Las ecuaciones para resolver nuestro caso son las siguientes:

- k- energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho \epsilon - Y_M$$

- e-disipación de la energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u} \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \rho C_1 - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{K + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b$$

·Modelo k-omega: Este modelo también comparte similitudes con el modelo k-epsilon, pero en este caso se resuelve para la tasa específica de disipación de energía cinética. Es un modelo de bajo número de Reynolds y se puede usar combinado con funciones de pared.

Es un modelo para flujos con alto número de Reynolds, pero también es conocido como un modelo de bajo número de Reynolds pues puede resolver todo el flujo hasta las paredes, sin usar funciones de pared. Este modelo es mas no-lineal y por tanto su convergencia es más desafiante que en el modelo k- ϵ . Además, es más sensible al valor inicial supuesto para la solución. Por tanto, es menos robusto.

6.2.4. *METODOS DE DISCRETIZACION*

- Steady State: En este caso no se discretizan los términos con derivadas temporales, se usa para simulaciones estacionarias.

- Euler Implícito: esquema básico de Euler de primer orden, solamente usa los valores del paso de tiempo anterior y actual.

- Crank-Nicolson: Usa el esquema de segundo orden de CN, requiere un coeficiente de descentramiento (1 para CN puro y 0 para Euler implícito puro)

- Euler local: Esquema de Euler de paso de tiempo local (primer orden), el campo de paso de tiempo local se busca en la base de datos. Este esquema sólo debe utilizarse para cálculos en estado estacionario utilizando códigos transitorios en los que el paso de tiempo local es preferible a la relajación insuficiente por razones de coherencia del transporte.

En la siguiente etapa del preprocesado tenemos que asignar las condiciones de contorno a las paredes del sólido, de la malla base y a la zona rotatoria.

Tabla 1

Contorno	Tipo	U	p
Darrieus	Wall	No slip	Zero-Gradient
Bottom	Symmetry		
giro-giro_slave	Cyclic AMI		
inlet			
outlet			
left	Symmetry		
right	Symmetry		
top	Symmetry		

6.3. RESULTADOS

Gráficas de Fuerzas:

-Fuerzas en el eje X:

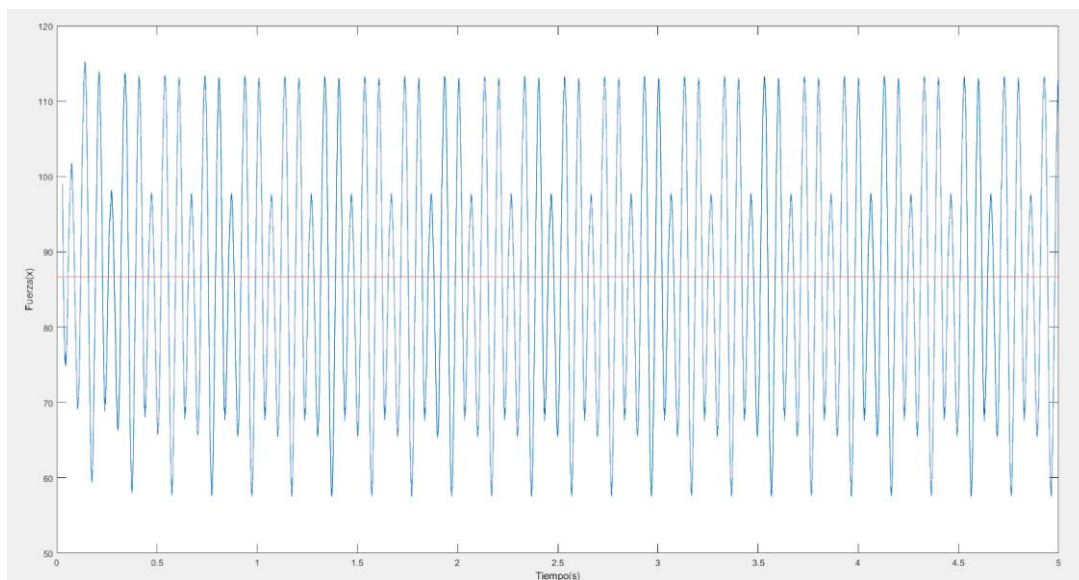


Ilustración 51-Fuerzas en el eje X

Valor máximo: 115 N

Valor Medio: 87 N

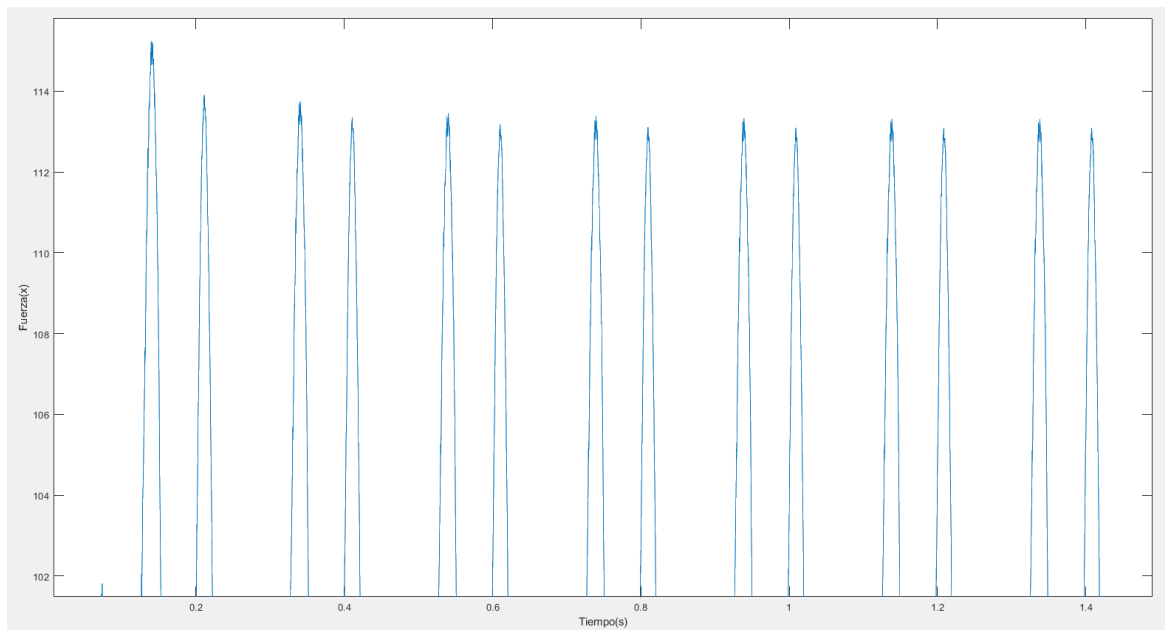


Ilustración 52-Detalle de la oscilación de fuerzas en el eje X

Fuerzas en el eje Y:

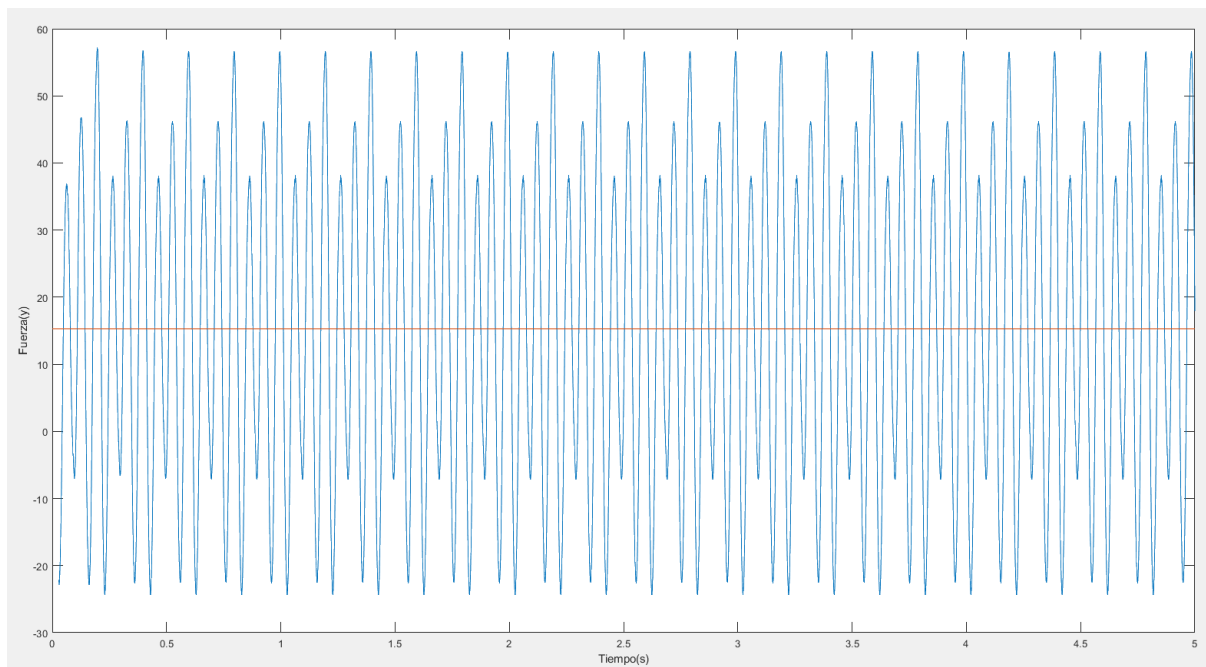


Ilustración 53-fuerzas en el eje Y

Valor Medio: 15.2908 N

Valor máximo: 57.1664 N

Gráfica de Potencia:

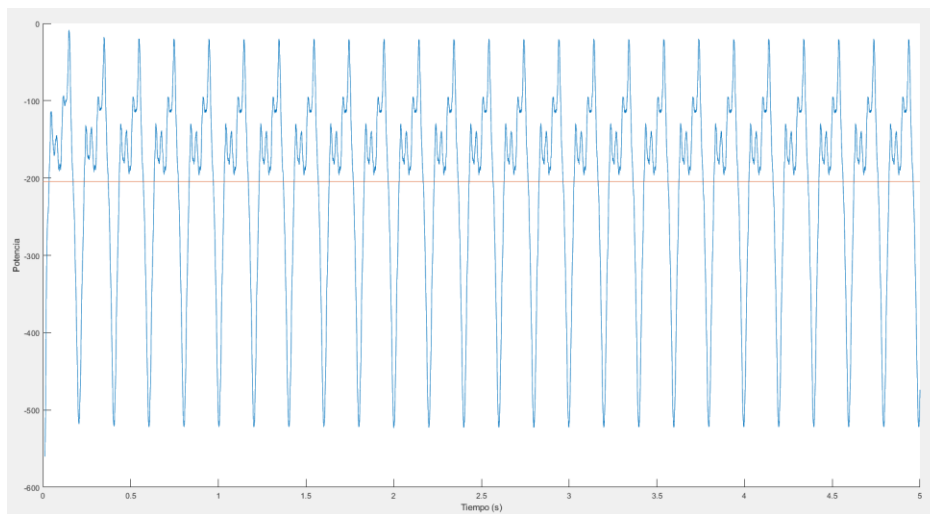


Ilustración 54-Gráfica de Potencia

Potencia máxima: 560.0512 W

Contornos de velocidad al inicio de la simulación:

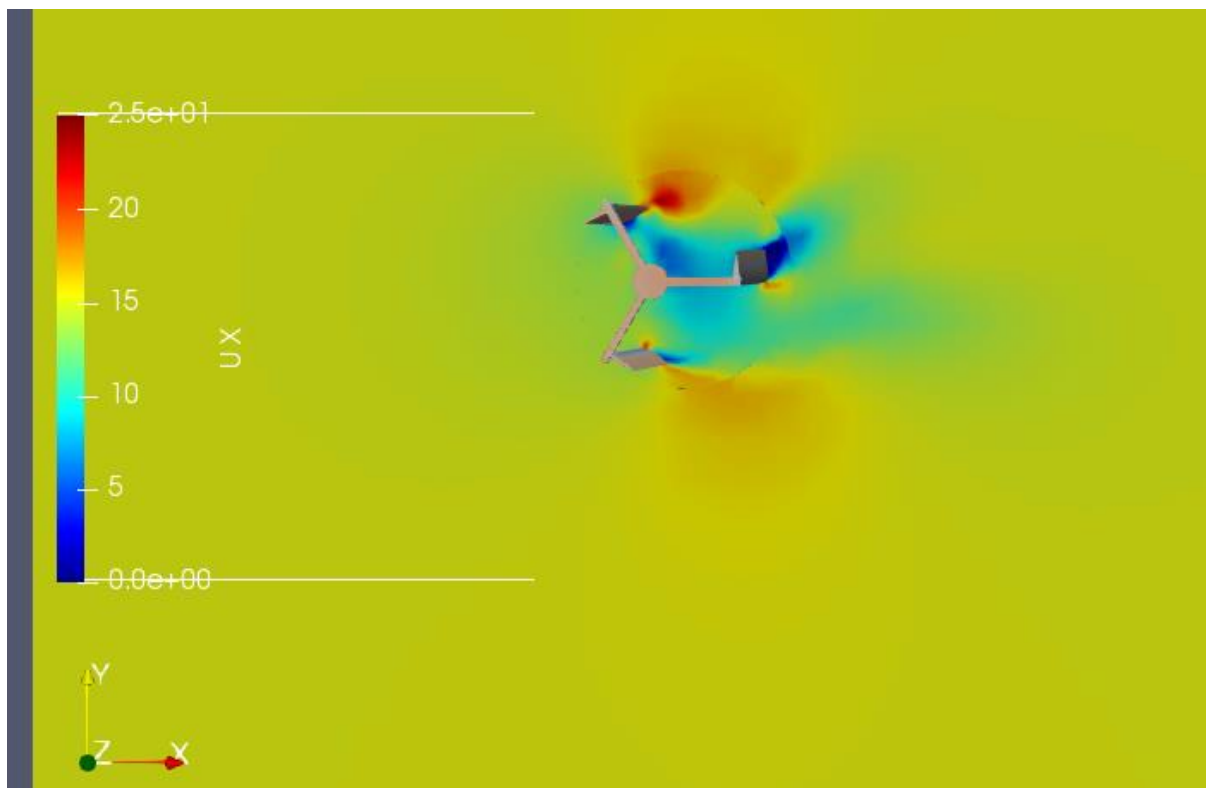


Ilustración 55-Contornos de velocidad en t=0

Contornos de velocidad al final de la simulación (5 segundos):



Ilustración 56-Contornos de velocidad en t=5 s

Diferencias de Presión en un álabe

En la siguiente imagen podemos el funcionamiento de una perfil aerodinámico debido a diferencias de presión explicado en apartados anteriores

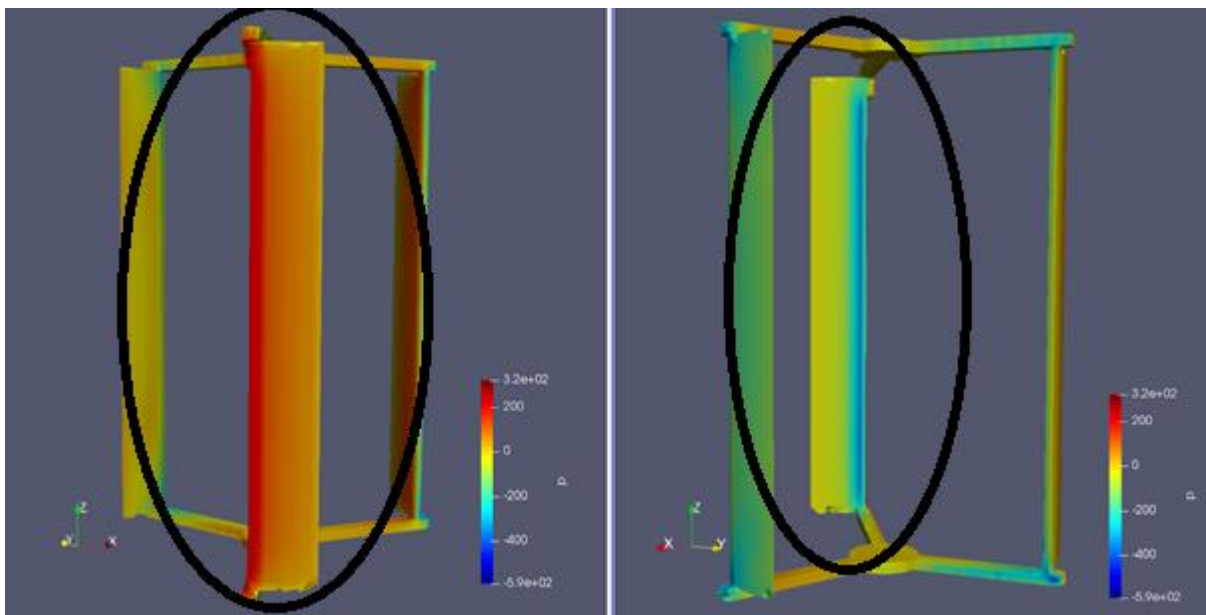


Ilustración 57-Diferencias de Presión en las 2 caras opuestas del álabe

Vorticidad a lo largo del dominio computacional:

Esta figura, a pesar de a priori no indicar mucha información, nos permite ver que al final del dominio computacional se reduce la vorticidad, lo que significa que en el caso de querer instalar varios generadores en el mismo emplazamiento, esta será la distancia mínima que habrá que dejar entre uno y otro para no reducir el rendimiento

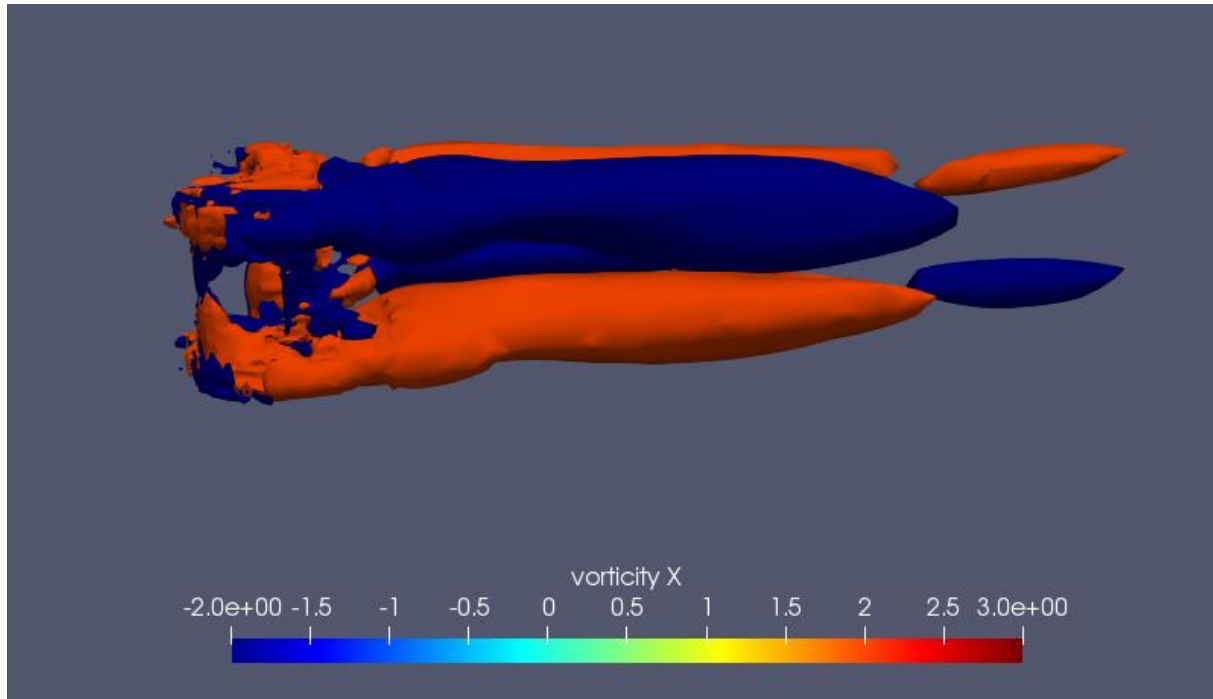


Ilustración 58-Contornos de vorticidad

Líneas de corriente:

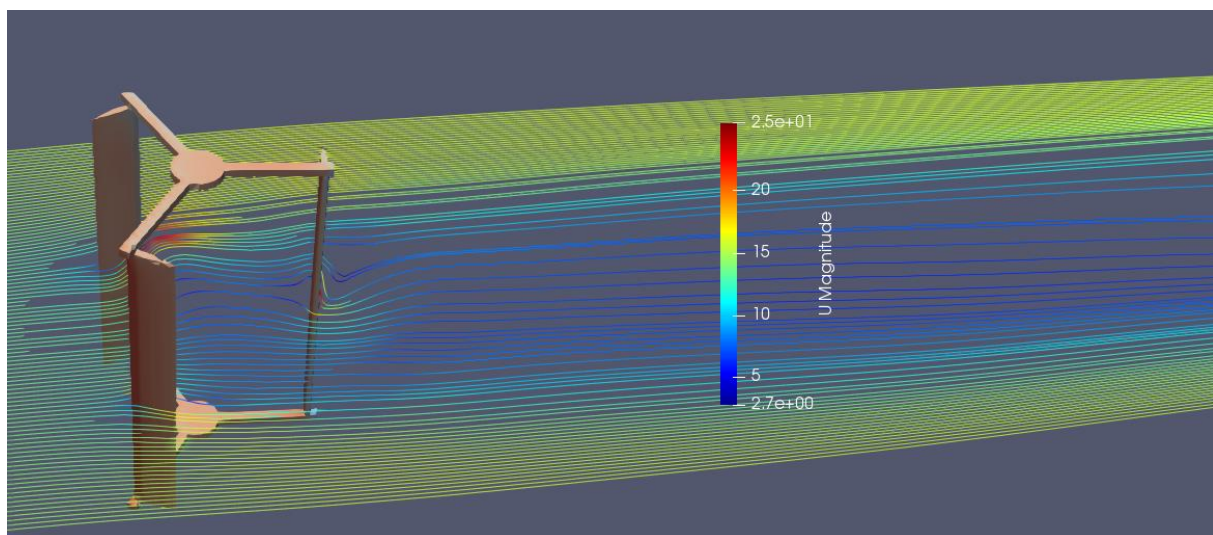


Ilustración 59-Líneas de corriente

7. DISEÑO Y FABRICACION DE ÁLABES USANDO IMPRESIÓN FDM

Uno de los principales problemas que observábamos en el diseño original, era el elevado peso de los 3 álabes. Este elevado peso, a pesar de dotar a los álabes con una alta resistencia, restaba una parte bastante notable de la potencia generada.

Para crear estos nuevos álabes se usará un material poco conocido en el mundo de la impresión FDM, el LW-PLA, y se implementará un nuevo diseño interior de los álabes que sea resistente y óptimo para la impresión de este material.

7.1. LW-PLA

Este material es un filamento para impresoras FDM basado en el PLA, un polímero biodegradable que se obtiene a partir de recursos naturales, como puede ser el almidón extraído del maíz, la remolacha y el trigo.

La diferencia con el PLA es que nuestro material, gracias a la tecnología de espumación activa, tiene la propiedad de expandirse hasta 3 veces en el momento que pasa por el extrusor, lo que puede significar una reducción teórica de su peso de un 65%.



Ilustración 60-Diferencia de peso entre un segmento de álabes impreso con PLA y LW-PLA

Esta reducción de peso es fácilmente controlable ajustando tanto la temperatura del extrusor como el flujo en el laminador.

En cuanto a propiedades, aunque disminuyamos la densidad del material, su resistencia apenas se ve afectada, pudiendo considerar que es igual de resistente que un PLA comercial, además, obtenemos un mejor acabado superficial, añadiendo la ventaja de que este material es más fácil de limar para ocultar las líneas de capa debido a su acabado mate.

Las principales aplicaciones de este material es precisamente la creación de alas para aviones de aeromodelismo, ya que este material es idóneo para aplicaciones donde se busca obtener el menor peso posible maximizando la resistencia.



Ilustración 61-Avión RC impreso en LW-PLA

Antes de comenzar con el apartado de pruebas y obtención de parámetros óptimos del laminador, hay que comentar que vamos a estar usando el filamento de la marca colorFabb, el cual nos proporciona una guía de pruebas y parámetros que facilitará bastante el trabajo.

Es importante indicar que debido a las condiciones en las que operará el generador, es conveniente usar el material en color blanco, ya que al ser impreso en FDM, es muy importante la temperatura que puede soportar el material antes de empezar a mostrar deformaciones que pueden conllevar un malfuncionamiento o rotura de los álabes.

Como se puede ver en la siguiente figura, según test realizados por el usuario de YouTube Tom Stanton, la temperatura con la incidencia directa de la luz del sol

durante aproximadamente 30 minutos puede variar hasta 21° según el color del filamento, llevando el material de mayor temperatura a sufrir deformaciones que empeoren en gran medida su rendimiento.

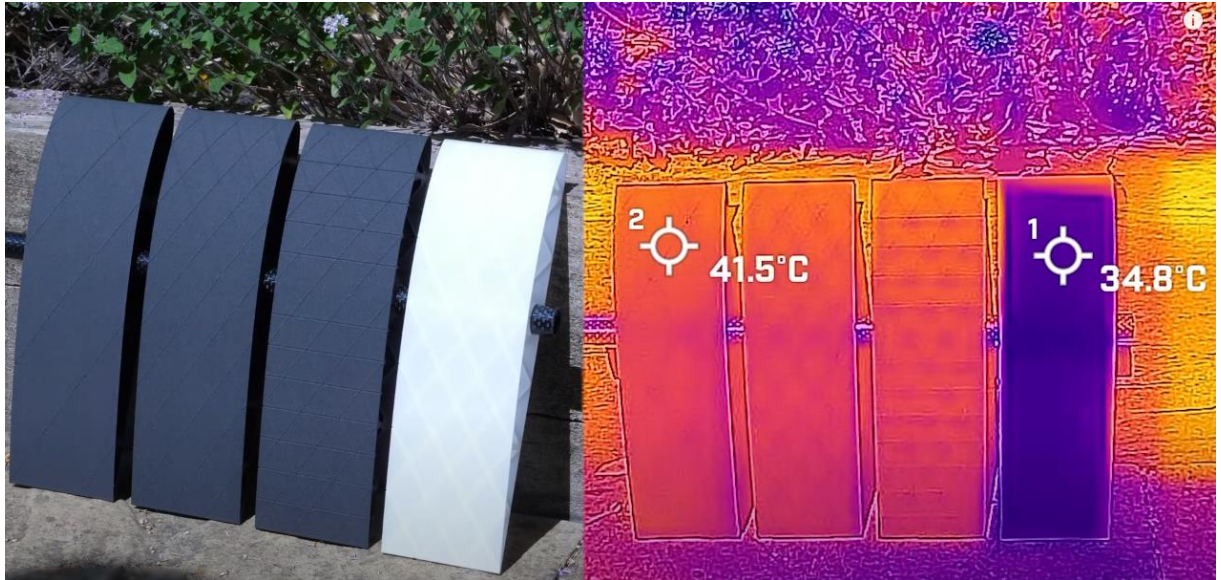


Ilustración 62-Sensibilidad del filamento LW-PLA a la temperatura del sol

De entre toda la información facilitada por el fabricante hay que destacar la siguiente:

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES			
Physical properties		Unit	Method
Density		g/cm ³	-
Glass Transition Temperature		°C	DSC
		Value	
		0.40 - 1.24	
		55 - 60	
FILAMENT SPECIFICATION			
Nominal diameter:	Diameter tolerance	Ovality	
1,75 mm	± 0,05	≥ 95%	
2,85 mm	± 0,10	≥ 95%	
GUIDELINE FOR PRINT SETTINGS			
Nozzle temperature	195 - 250°C		
Bed temperature	50 - 60°C		
Bed surface / modification	Tape or glue		
Active cooling fan	0-100%		
Print speed	40-80 mm/s		

Ilustración 63-Información proporcionada por el fabricante del LW-PLA

En los primeros 2 apartados, solamente cabe destacar que la densidad, a diferencia de otros materiales, no tiene un valor constante, ya que como se ha mencionado en el apartado anterior, podemos cambiarla ajustando algunos parámetros.

En cuanto a la tercera tabla, que es la más interesante y la que más información aporta, vemos que la temperatura recomendada es de entre 195°C y 250°C, aunque, como se verá posteriormente en las pruebas, la temperatura más óptima varía entre los 240 y 250°C, siendo este uno de los parámetros que nos permitirán cambiar la densidad de nuestra impresión.

Pruebas para la obtención de parámetros de impresión

Antes de empezar a hacer las pruebas, es importante entender cómo funciona la expansión del material:

Para que el filamento se expanda es necesario introducir en él una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía que puede absorber el filamento durante la impresión depende de la longitud del hotend y del tiempo que tarda el filamento en atravesarlo. Cuanto más tiempo pase el filamento por el hotend, más energía podrá absorber, lo que aumentará la expansión.

De aquí sacamos la conclusión de que las variables que influirán en la expansión son:

- Temperatura
- Tamaño de la boquilla
- Velocidad de impresión
- Altura de capa
- Flujo

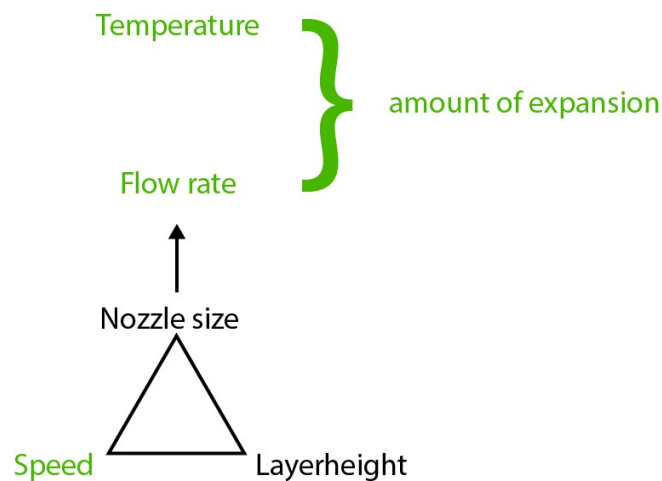


Ilustración 64-Variables de una impresión 3D con filamento expansible

De estas variables, ya tenemos el tamaño de la boquilla, que será de 0.4 mm y la altura de capa, que la fijaremos en 0.2 mm.

La primera prueba consiste en imprimir los perímetros de un cubo con temperaturas que van desde 200 a 280°C, anotando el ancho de pared obtenido en cada uno, aquí veremos que temperatura nos da mayor expansión.

Diseño

Antes de empezar la descripción del proceso de diseño de los nuevos álabes, hay que recalcar que para la impresión de LW-PLA es muy recomendable, por no decir casi obligatorio, usar el 'vase mode' de Cura.

El "Vase Mode", también conocido como "Spiralize Outer Contour" o "Espiralizar el contorno exterior", es una práctica función que permite imprimir objetos 3D estéticamente perfectos mientras se ahorra material y tiempo.

Con el "Vase Mode", se puede imprimir casi cualquier forma con el grosor de una sola pared, lo que significa que necesitas menos tiempo y filamento para un objeto. En este modo, la impresión se desplaza hacia arriba en forma de espiral, no

hay capas como en las impresiones 3D más habituales. El modelo se crea mediante movimientos suaves del eje Z.

La razón por la que usaremos este modo es que al imprimir sin este modo, cuando la impresora pase del contorno exterior la estructura interior, la impresora tiene que parar, levantar el extrusor y moverse hacia la estructura, lo cual representa un problema a la hora de retraer el material que ya ha sido espumado. Esto dejará material en la punta del extrusor, que será arrastrado y creará problemas al seguir imprimiendo. Véase la siguiente figura:

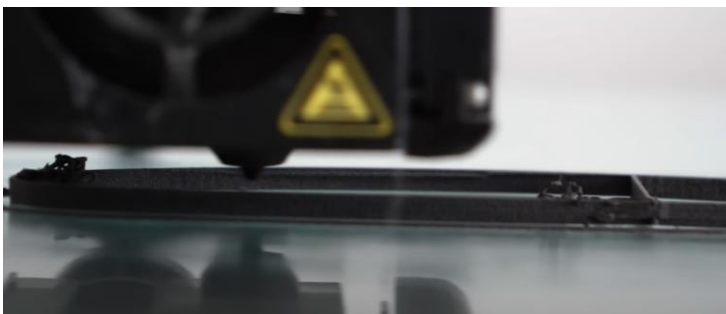


Ilustración 65-Impresora imprimiendo LW-PLA

Una vez entendido esto, pasamos al proceso de diseño.

Si solo imprimiésemos la parte del contorno, no habría ningún tipo de problema a la hora de usar el 'vase mode', ya que toda la silueta exterior de un perfil NACA es continuo.

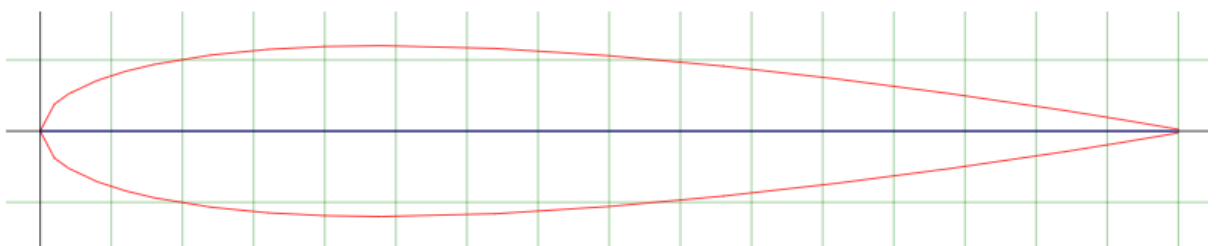


Ilustración 66-Perfil NACA usado para diseñar el álabe en Fusion 360

En el caso que quisiésemos añadir una estructura interior para mejorar su resistencia, hay que encontrar la manera para seguir con esa continuidad.

Para comenzar, partimos de un perfil NACA 0015 de 500 mm de altura, ya que esto es lo máximo que puede imprimir el equipo que vamos a usar, lo cual nos llevará al problema de la unión entre alas, que se desarrollará después.

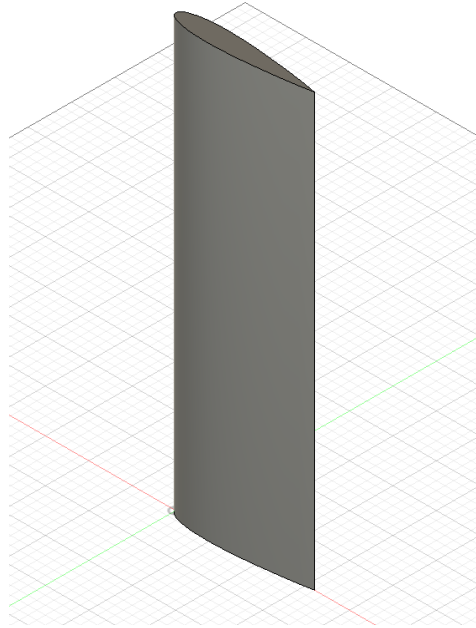


Ilustración 67-Perfil del álabes inicial en Fusion 360

A este cuerpo de partida le haremos una copia, después, ocultaremos el original para trabajar sobre la copia.

Una vez se este trabajando sobre la copia, el primer paso es dibujar una rejilla formada por líneas a 45°, ya que esta es la máxima angulación en la que se puede imprimir sin que los resultados se vean afectados. Estos 45° los definen 2 líneas de 0,1 mm entre sí, quedando de la siguiente manera:

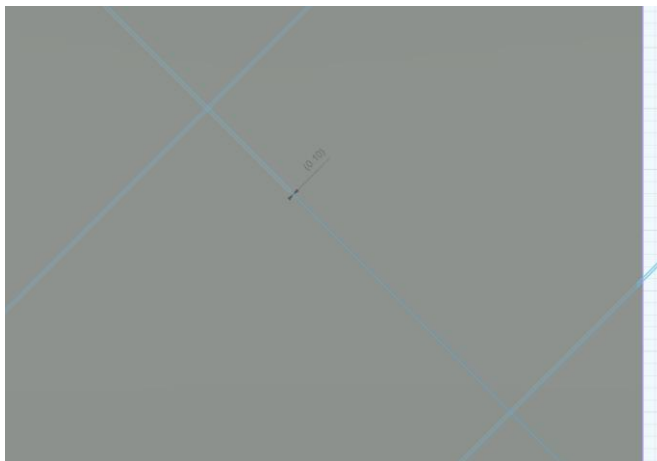
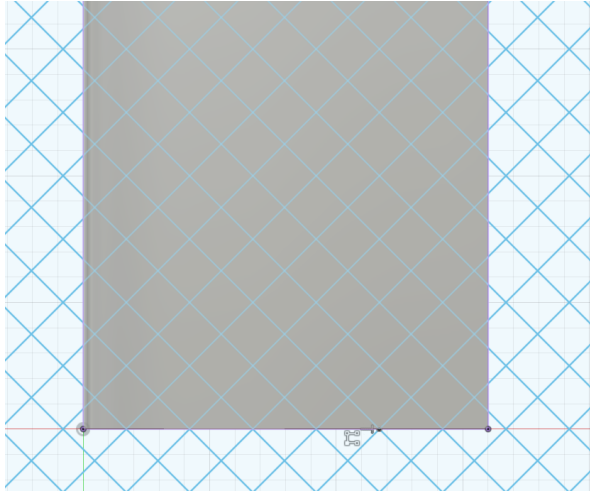


Ilustración 68-Líneas de 0.1 mm



En siguiente paso es, usando esa rejilla, hacer un corte, dejando solo la línea de 0,1 mm. Al estar todo dibujado y cortado sobre la copia del perfil original, obtendremos unas estructuras que encajan perfectamente con nuestro perfil alar.

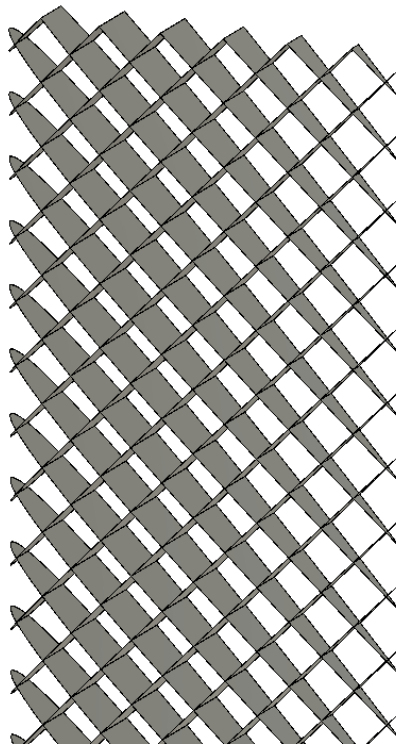


Ilustración 69-Estructura interior del álabe

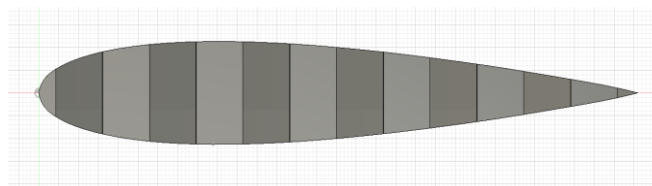


Ilustración 70-Vista superior de la estructura interior del álabe

Si quisiéramos imprimir nuestra ala de esta manera, no sería una línea continua, a parte, al tener una estructura tan extensa, el álabe seguiría siendo demasiado pesado. Para solucionar estos 2 problemas, primero, haremos unos agujeros centrados en la línea de la cuerda del perfil para reducir el peso, estos agujeros pueden ser más o menos grandes dependiendo de lo que queramos reducir el peso aunque hay que tener en cuenta que al disminuir la estructura, nuestro perfil será más débil. También se cortará una línea horizontal de 0.6 mm que divida la estructura en 2 partes, así conseguiremos el efecto de continuidad a la hora de imprimir

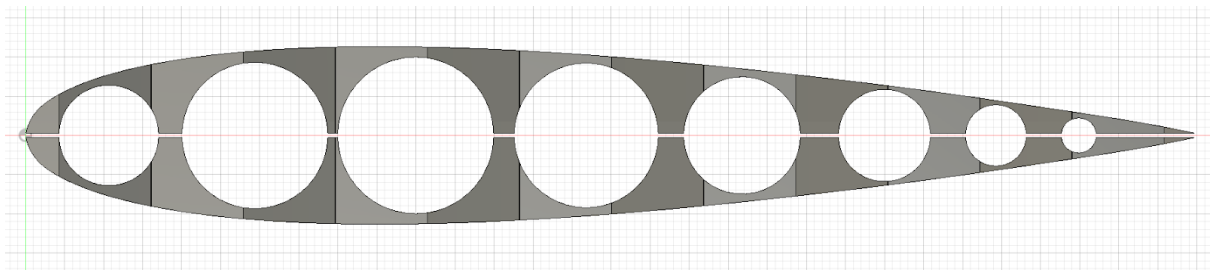


Ilustración 71-Estructura interior aligerada

Una vez creadas las estructuras, se combina el cuerpo sobre el que hemos trabajado junto al cuerpo original. Para así obtener nuestro primer diseño.

Como se puede ver en la siguiente figura, a la hora de introducir el diseño en el laminador, seleccionar el vase mode y ver la vista previa de la trayectoria del extrusor, todo se hace en una línea continua.

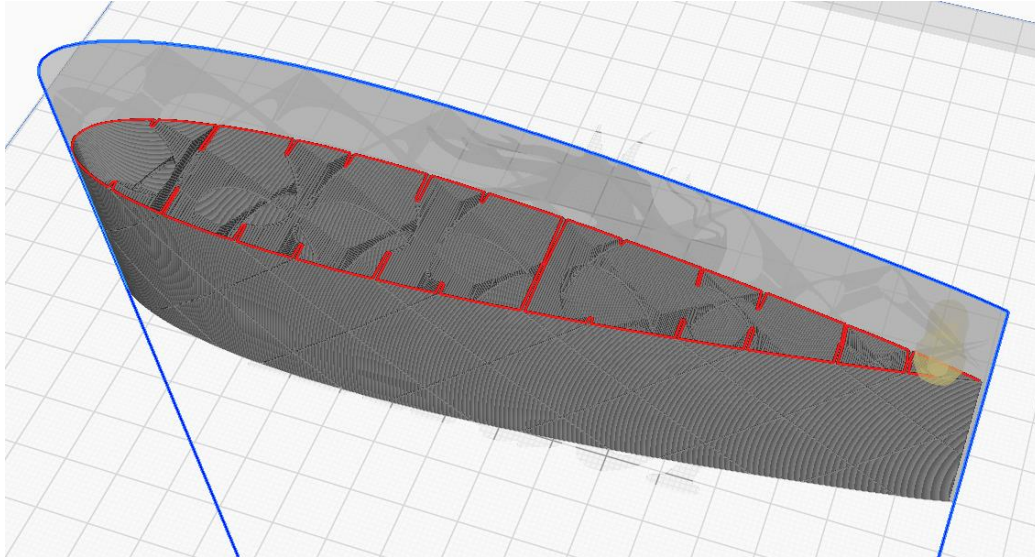


Ilustración 72-Simulación de impresión del primer prototipo

Aunque este diseño aún está lejos de ser el definitivo, ya que no tiene ninguna ranura para alinear ni unir con los brazos que lo unen con el eje, se imprimió un pequeño prototipo de 10 cm de altura con el objetivo de testear su resistencia y la diferencia de peso.

El prototipo de 10 cm, usando PLA, resultó pesar 22 gramos, lo cual significa que el ala completa pesara alrededor de 475 gr, que se vería reducido hasta en un 65% cuando usemos LW-PLA.



Ilustración 73-Peso de un segmento de 20 cm del diseño en PLA

EN cuanto a sus resistencia, fue sometido a fuerzas de compresión tanto por las partes superior-inferior como en los laterales de aproximadamente 105 kg.

Se observó que el modelo no sufrió ningún tipo de deformación ni desgaste, ni en la parte exterior ni en la estructural. Por tanto, se da por válido el diseño en términos de resistencia.

Una vez fabricado el primer prototipo y validada su resistencia, se imprimió un álabe completo en material PLA.

Al tener el álabe una altura de 1000 mm, resulta imposible imprimirlo completamente en una sola impresión por lo que se dividió en 5 partes de 200 mm cada una.

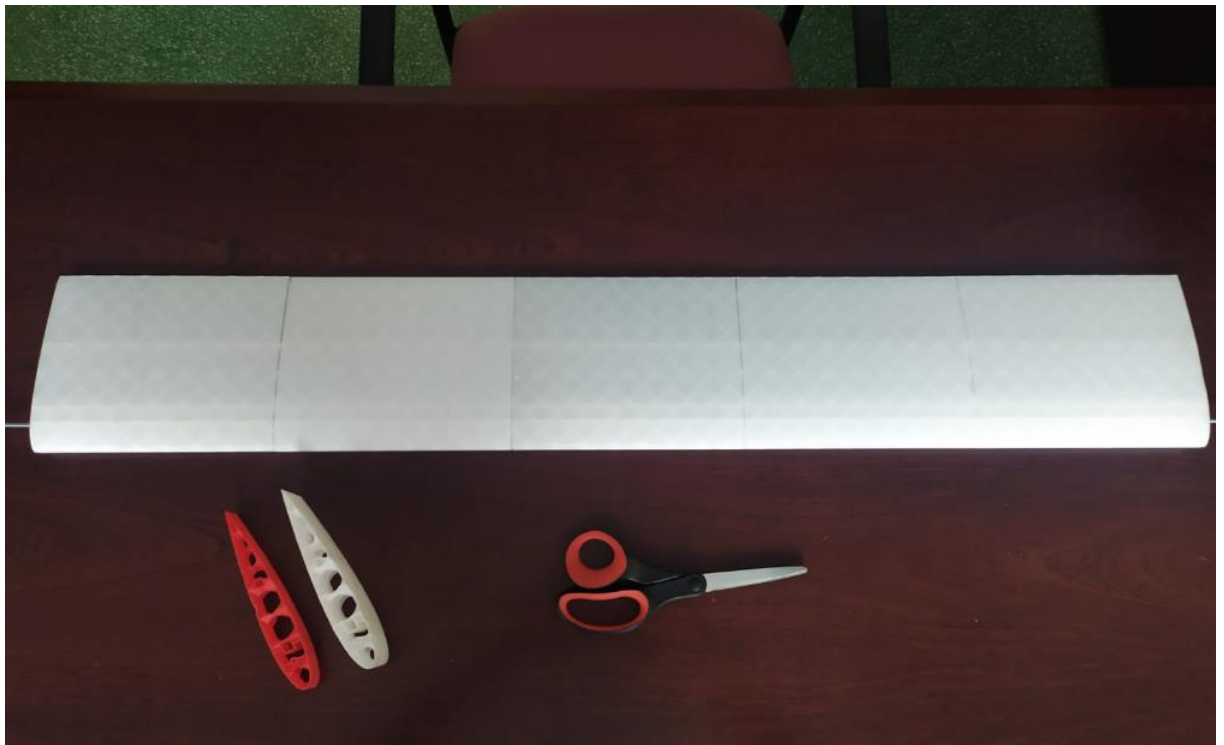


Ilustración 74-Álabe completo impreso en PLA

El peso de este álabe, sin tener en cuenta las varillas interiores es de aproximadamente 250 gramos.

Una vez el primer prototipo se considera válido, es necesario añadir 3 ranuras para pasar las varillas internas del alabe. Estas varillas son una varilla circular que servirá de eje para el sistema de regulación del pitch y 2 varillas

rectangulares de distinta media que usaremos para alinear y dar un mayor soporte a los 5 segmentos del álabe.

Para añadir estas ranuras, hay que dibujar el perfil del mismo y para conseguir la continuidad se trazará un rectángulo vertical de 0.01 mm de ancho, una de ellas llegará hasta la pared del álabe pero la otra deberá quedar a menos de 1 mm de la pared opuesta pero sin llegar a tocarla. Este pequeño rectángulo queda dentro de otro rectángulo más grande de 2 mm de ancho y que supera la pared del álabe en ambas paredes.

En las siguientes figuras se puede ver el boceto de ambas ranuras, de 7 y 9 mm respectivamente, en cuanto a la ranura circular, se sigue el mismo proceso pero usando una circunferencia de 5 mm de diámetro.

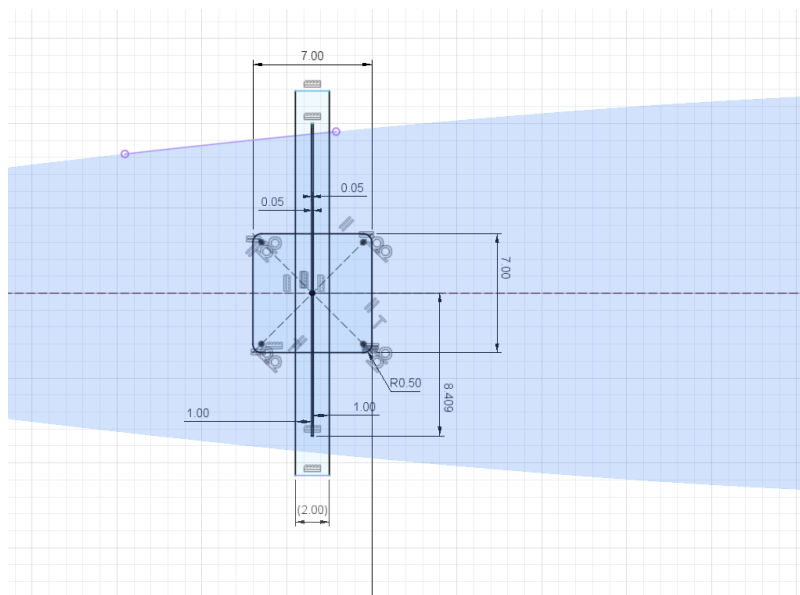


Ilustración 75-Diseño de la primera ranura de sección rectangular

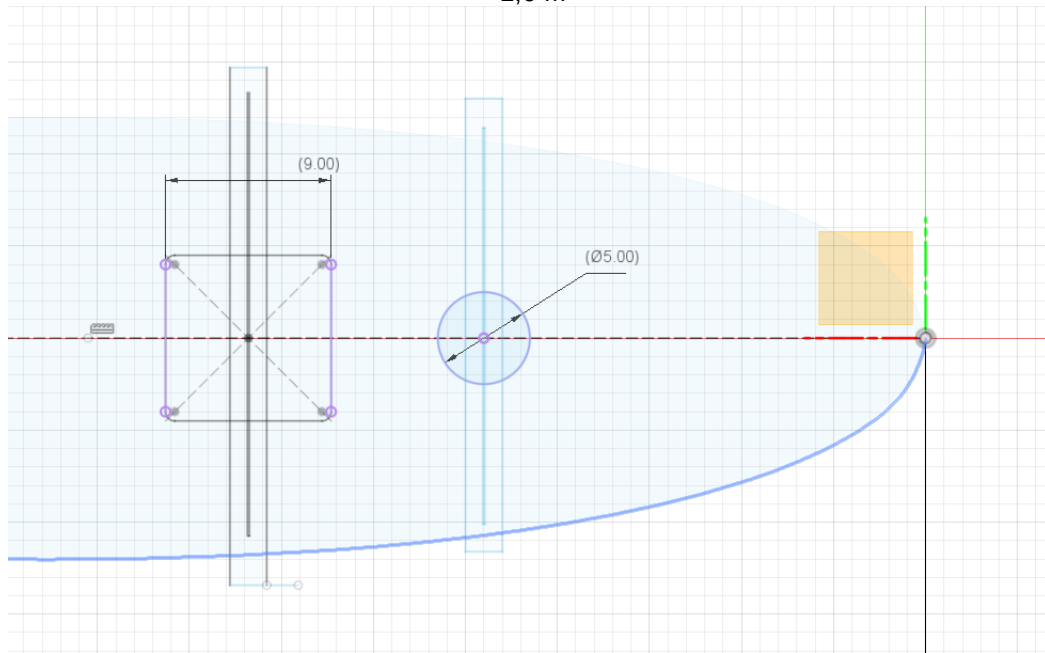


Ilustración 76- Diseño de la primera ranura de sección rectangular

Antes de imprimir otro prototipo de este diseño final, es conveniente hacer una simulación usando un laminador para procesos de FDM, en mi caso voy a usar Ultimaker Cura, por la versatilidad para intercambiar perfiles entre varias impresoras, ya que algunas prototipos serán impresos en una Ender 3 personal y otros en una Ultimaker S5 del laboratorio de metrología en la universidad.

En la siguiente figura se aprecia como en la simulación se imprime tanto la pared exterior, como ranuras y estructura en una sola línea sin necesidad de hacer ninguna retracción, lo cual para un material como PLA no tendría por qué suponer un problema pero para el LW-PLA si, ya que al hacer esas retracciones hay mucho riesgo de atasco y de fallo en la impresión.

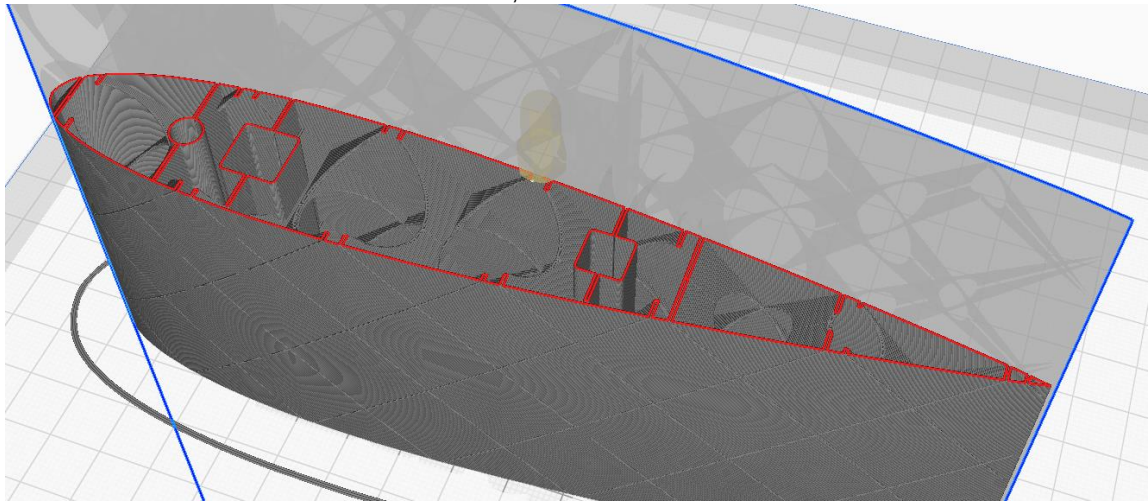


Ilustración 77-Simulación de impresión con PLA-Comprobación del 'vase mode'

También cabe comentar que ya que esta simulación es aproximada para comprobar la validez del diseño, la costura queda justo en medio de la pared del álabe, esto no es excesivamente problemático pero sería más conveniente ajustarlas a una zona como el extremo más fino del álabe para mejorar la estética y evitar tener que pos procesar la pieza.

Habiendo validado el diseño, antes de imprimir con el LW-PLA, es conveniente sacar un prototipo del diseño final para hacer una aproximación de peso y tiempo en PLA para comprobar que todo se imprimirá correctamente y también aproximar el tiempo y material usado para un álabe en PLA.

Al igual que el primer diseño, se imprimieron varios prototipos cambiando algunos parámetros para optimizar tanto cantidad de material y tiempo.



Ilustración 78-Impresora Ender 3 imprimiendo el prototipo final del álabes en PLA

Como se puede ver en la siguiente figura, el segmento en PLA se imprimió con mucha calidad y al igual que con el primer diseño, se aplicaron fuerzas de aproximadamente 100 kg tanto vertical como horizontalmente y este diseño, a pesar de ser más corto(unos 5 cm) también soportó sin ninguna deformación ni fractura, por tanto, también se puede considerar este diseño como válido y podemos continuar a la impresión con el LW-PLA.

Para futuras comparaciones, es conveniente indicar que el peso de este pequeño segmento es de 18 gramos. Un segmento de 20 cm pesa aproximadamente 36 gramos.

Una vez hemos confirmado que el diseño es correcto para imprimir usando la espiralización de contorno y que además comprobado con material PLA que es factible su impresión sin errores, montaremos el diseño en Cura y modificaremos los siguientes parámetros según las pruebas realizadas anteriormente para nuestro material en concreto.

7.2. Proceso de impresión

Para la fabricación de los álabes en impresión 3D, se ha utilizado una impresora Ultimaker modelo S5, perteneciente al laboratorio de fabricación aditiva de la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

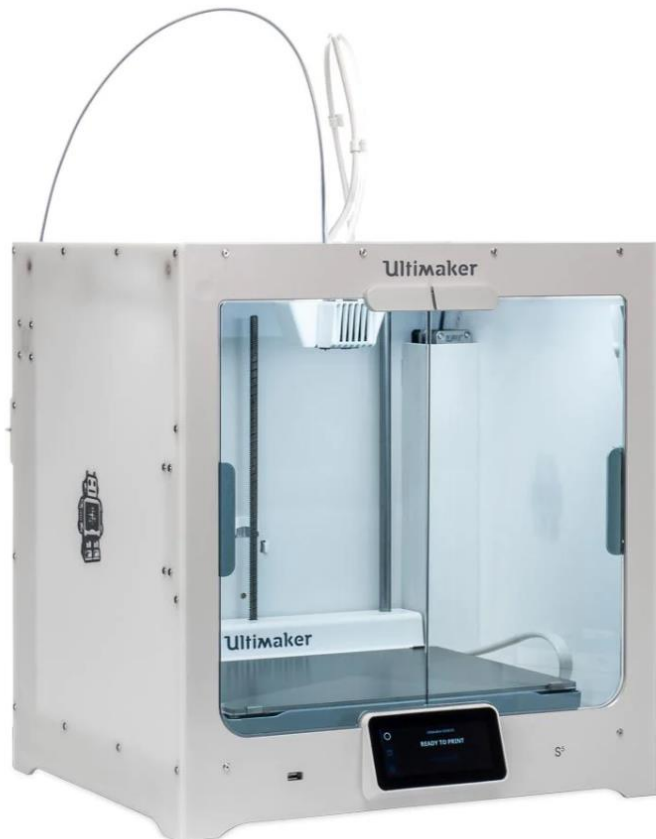
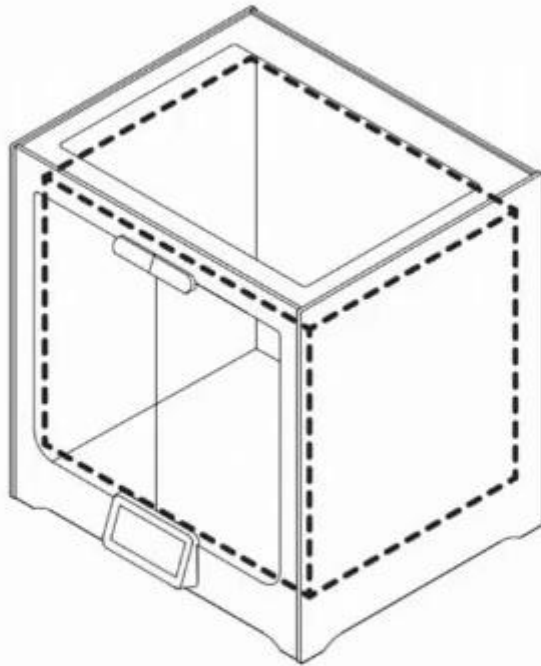


Ilustración 79-Ultimaker S5

La Ultimaker S5 tiene un volumen de impresión de 330 x 240 x 300 mm. La geometría de la impresora es similar a las de la serie Ender 5 pero con una estructura cerrada. La estructura cerrada proporciona un control de temperatura y flujo de aire constante evitando cambios bruscos de temperatura que pueden afectar al resultado de la pieza. El desplazamiento en el eje X e Y los realiza a través de dos

varillas lisas. Cabezal Ultimaker S5. El movimiento en el eje Z a través de 2 varillas lisas accionadas por un husillo.

Build Area



Left or right nozzle, or dual extrusion:

330 x 240 x 300 mm

(13 x 9.4 x 11.8 inches)

Ilustración 80-Volumen de impresión de la Ultimaker S5

Dispone de un cabezal de impresión formado dos extrusores tipo Bowden. Estos dos extrusores ofrecen flexibilidad a la hora de imprimir piezas complejas. Existe la posibilidad de imprimir piezas con soportes en un material soluble de manera que al terminar la impresión y sumergir la pieza en agua los soportes desaparecen al disolverse, lo cual evita problemas a la hora de despegar los soportes, como pueden ser posibles roturas en las piezas o defectos en su

superficie. La superficie de impresión se puede separar y es intercambiable entre cristal y aluminio para adaptarse a diferentes materiales. Dispone de nivelación automática de la superficie de impresión y un sensor de filamento.

Es importante destacar que esta impresora utiliza filamento de 2.85 mm de diámetro, esto es un parámetro a tener en cuenta a la hora de elegir el filamento.

Según los parámetros obtenidos y otros cambios interesantes a realizar indicados tanto por el fabricante como por otros usuarios más experimentados en el uso de este material es necesario cambiar los siguientes ajustes en cura:

Tabla 2

Ajuste	Parámetro
Altura de la capa	0,25
Ancho de línea	0,4
Recuento de líneas de pared	1
Densidad de relleno	0
Temperatura de impresión	235
Temperatura de la placa de construcción	60
Flujo	55%
Habilitar retracción: marcado	marcado
Distancia de retracción	2
Velocidad de retracción	30
Importe principal adicional de retracción	0,5
Velocidad de impresión	100
Velocidad de la pared exterior	40
Velocidad de la pared interna	40
Velocidad de viaje	80
Modo de peinado	apagado
Habilitar enfriamiento de impresión	marcado
Velocidad del ventilador	20
Unión de volúmenes superpuestos	NO marcada
Tolerancia de corte	medio

Después agregar los nuevos ajustes, la simulación de impresión indica que el tiempo de impresión es aproximadamente 4 horas y media.



Ilustración 81-Segmento de 20 cm impreso en LW-Pla en la Ultimaker S5

En cuanto al peso del segmento de 20 cm, que es el parámetro más importante ya que indica la eficiencia en la reducción de material conseguida es de 36 gramos.

En cuanto al mismo modelo con material PLA obtenemos un tiempo de impresión de mas de 6 horas y un uso de material de 50 gramos, esto significa un ahorro de peso del 70%, lo cual indica unos resultados excelentes en cuanto a eficiencia.



Ilustración 82-Peso de un segmento de 20 cm en LW-PLA

8. DISEÑO, SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS Y FABRICACIÓN DE UN COMPONENTE PARA REDUCIR LA FLEXIÓN EN EL EJE DEL AEROGENERADOR.

Como ya se expuso en apartados anteriores, el eje principal de sección cuadrada de aluminio sufría de excesiva flexión debido a las fuerzas de arrastre y lift que generan los alabes. Esta flexión produce vibraciones y ondulaciones que hacían que el equipo no funcionase correctamente y que, además, se desmontase con facilidad, pudiendo conllevar a la destrucción de piezas vitales para el correcto funcionamiento del generador.

En primer lugar es necesario entender que son los esfuerzos de flexión y que deformaciones producen.

La flexión pura es un concepto utilizado en la mecánica de materiales y la ingeniería estructural para describir un tipo específico de deformación que ocurre en un material cuando se somete a una carga. Se caracteriza por la aplicación de un momento o una fuerza que causa una curvatura en un elemento estructural, como una viga o un eje, sin que haya ningún desplazamiento lateral o cambio en la longitud del elemento. En otras palabras, en la flexión pura, no hay fuerzas cortantes ni cambios en la longitud del material.

Para visualizar mejor la flexión pura, podemos imaginar una viga horizontalmente apoyada en sus extremos y sometida a un momento que tiende a hacer que la viga se doble. A medida que se aplica este momento, la viga comienza a curvarse sin que sus extremos se desplacen lateralmente ni se alargue ni se acorte. Esto es un ejemplo de flexión pura.

La teoría de la flexión pura es fundamental en el diseño y análisis de estructuras como puentes, edificios, vigas, y otros componentes donde la flexión es un factor importante. Se utiliza para determinar cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en un material cuando se somete a cargas de flexión, lo que es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia de las estructuras. Además, la flexión pura es un concepto simplificado que se utiliza en la teoría de la elasticidad para estudiar el comportamiento de los materiales bajo cargas de flexión, lo que permite calcular tensiones, deflexiones y otros parámetros importantes en el diseño y análisis estructural.



Ilustración 83-Esquema de flexión pura

Para describir la flexión pura en un elemento, consideremos una viga idealizada de longitud L , que está sujeta a un momento M en su eje longitudinal. La

ecuación básica que rige la relación entre el momento flector $M(x)$ la curvatura $\frac{d^2\vartheta}{dx^2}$ y la carga aplicada M es conocida como la ecuación de flexión:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI}$$

Donde:

- $\frac{d^2\vartheta}{dx^2}$ representa la curvatura del elemento en función de la posición x a lo largo de la viga.
- $M(x)$ es el momento aplicado en función de la posición X a lo largo de la viga.

EI es la rigidez flexional de la viga, donde E es el módulo de elasticidad del material y I es el segundo momento de área de la sección transversal de la viga.

Esta ecuación de flexión es una formulación simplificada de la ecuación general de equilibrio de momentos en una viga y describe cómo varía la curvatura en la viga debido al momento aplicado. La solución de esta ecuación proporciona la distribución de curvatura a lo largo de la viga, lo que a su vez permite calcular las deflexiones y las tensiones en el material.

Es importante destacar que en la flexión pura, no hay fuerzas cortantes significativas que actúen en el elemento estructural. La fuerza cortante se deriva de la pendiente de la curvatura, pero en el contexto de la flexión pura, esta componente es despreciable en comparación con el momento flector.

Como mencioné anteriormente, en la flexión pura, el elemento estructural experimenta una curvatura debido a la aplicación de un momento. La curvatura está relacionada con la deformación de la viga a lo largo de su longitud, y esta deformación se mide en términos de la flecha o deflexión vertical $w(x)$ de la viga en función de la posición x a lo largo de la misma.

Para calcular la flecha en un elemento bajo flexión pura, se utiliza la ecuación de la flecha, que es una expresión que relaciona la deflexión con la curvatura y otras propiedades del material y la viga. La ecuación de la flecha en flexión pura se deriva de la ecuación de flexión que mencioné anteriormente. La relación entre la curvatura $\frac{d^2w}{dx^2}$ y la deflexión $w(x)$ en una viga se establece mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{1}{R}$$

Donde:

- $\frac{d^2w}{dx^2}$ es la segunda derivada de la deflexión $w(x)$ con respecto a la posición x , que representa la curvatura de la viga.
- R es el radio de curvatura de la viga en el punto considerado. El radio de curvatura R se relaciona con la curvatura de la viga y el momento flector $M(x)$ de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{1}{R} = -\frac{M(x)}{EI}$$

Aquí, E es el módulo de elasticidad del material de la viga, I es el segundo momento de área de la sección transversal, $\frac{d^2\vartheta}{dx^2}$ es la curvatura y $M(x)$ es el momento aplicado en función de la posición x a lo largo de la viga.

La solución de la ecuación de la flecha proporciona la deflexión vertical $w(x)$ de la viga en diferentes puntos a lo largo de su longitud bajo la influencia del momento aplicado. Esta deflexión es crítica en el diseño de estructuras, ya que determina la capacidad de la viga para soportar cargas y evita que la viga exceda sus límites de deformación permisibles.

Una vez expuesta la teoría, llegamos a la conclusión de que para nuestro caso en concreto, para reducir la flexión, que es máxima en el extremo superior del eje, es necesario añadir soportes lo más arriba posible que reduzcan los momentos generados por la fuerza que aplicaran los álabes, reduciendo consecuentemente flexión.

El problema es que no podemos llegar muy arriba, ya que a 25.5 cm se encuentran las uniones de los álabes, que están rotando, entonces, es casi imposible acoplar un nuevo componente a una altura superior a estas uniones.

Para maximizar los resultados e intentar ahorrar el máximo material, y por tanto, costes posibles se va a utilizar la herramienta de optimización topológica de Fusion 360.

En un proceso de optimización topológica, se parte de un dominio inicial, que suele ser en su mayoría rectangular. Este dominio se discretiza con el propósito de encontrar la configuración óptima de la estructura, considerando ciertas condiciones de carga y restricciones (como los puntos de apoyo). La optimización topológica se emplea como un punto de partida para el desarrollo de nuevos diseños, ya que proporciona una visión general de cómo debería ser la estructura para lograr un rendimiento óptimo frente a ciertas cargas. Sin embargo, posteriormente se deben considerar posibles modificaciones o ajustes.

En este caso particular, nos enfocamos en la optimización topológica de estructuras continuas[7]. Para lograr esto, el dominio se divide en elementos finitos que representan fragmentos más pequeños del material. Cada uno de estos elementos finitos se analiza de manera iterativa hasta que se encuentra la distribución más eficiente del material en la estructura.

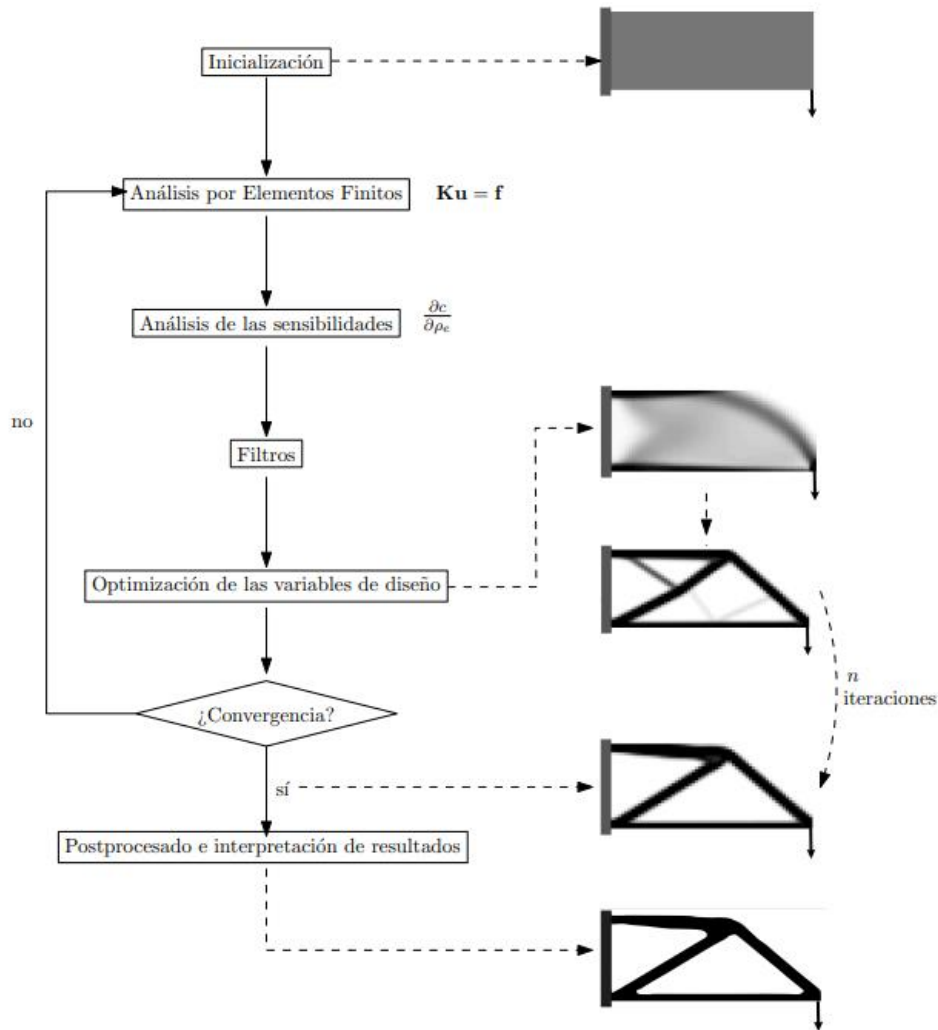


Ilustración 84-Proceso de optimización de topología

Para utilizar esta herramienta, primero hay que hacer un diseño preliminar de nuestra pieza.

Hay que tener en cuenta que el nuevo componente va a ser fabricado mediante impresión FDM, entonces, hay que hacer una evaluación de los equipos disponibles y sus respectivos volúmenes de impresión y dimensionar respecto a ellos.

Tabla 3

Equipo	Volumen de impresión
Ultimaker S5	330 x 240 x 300 mm
BQ Witbox	297 x 310 x 200 mm
Creality Ender 3	220 x 220 x 250 mm.

Dado que nuestra pieza de soporte tiene que tener las máximas dimensiones posibles, sobre todo en altura, el equipo elegido y sobre el que se va a dimensionar la pieza inicial es la **Ultimaker s5**.

El diseño es una pieza de 240 mm de altura, con una base circular de 260 mm de diámetro -

Se han hecho 4 ranuras planas para colocar los agujeros de los tornillos que lo acoplaran a la base.

La primera simulación por FEA que se va a realizar es la del eje sin ningún tipo de pieza de soporte, es decir, el estado inicial del equipo para comprobar la flexión producida por las fuerzas.

Para ello, definiremos las fuerzas que nos ha otorgado la simulación de CFD, para asegurar un correcto funcionamiento en cualquier tipo de viento aplicaremos un factor de seguridad de 2, es decir, el doble de fuerza de la que nos aporta la simulación (5 m/s y 30 rad/s), este resultado sería equivalente a una velocidad del viento de aproximadamente 80 km/h, valor que difícilmente se alcanzara en condiciones normales.

Es importante destacar, que para hacer una simulación lo más próxima a la realidad, se dividirán las fuerzas aplicadas en 2 puntos, uno para el apoyo superior y otro para el inferior.

También se fijara la parte inferior, con distancia 154 cm del extremo superior del eje, simulando el apoyo con la base.

Resultados:

Como resultados obtenemos una flexión máxima de 57 cm en el extremo superior del eje, un resultado lejos de ser aceptable para un correcto funcionamiento.

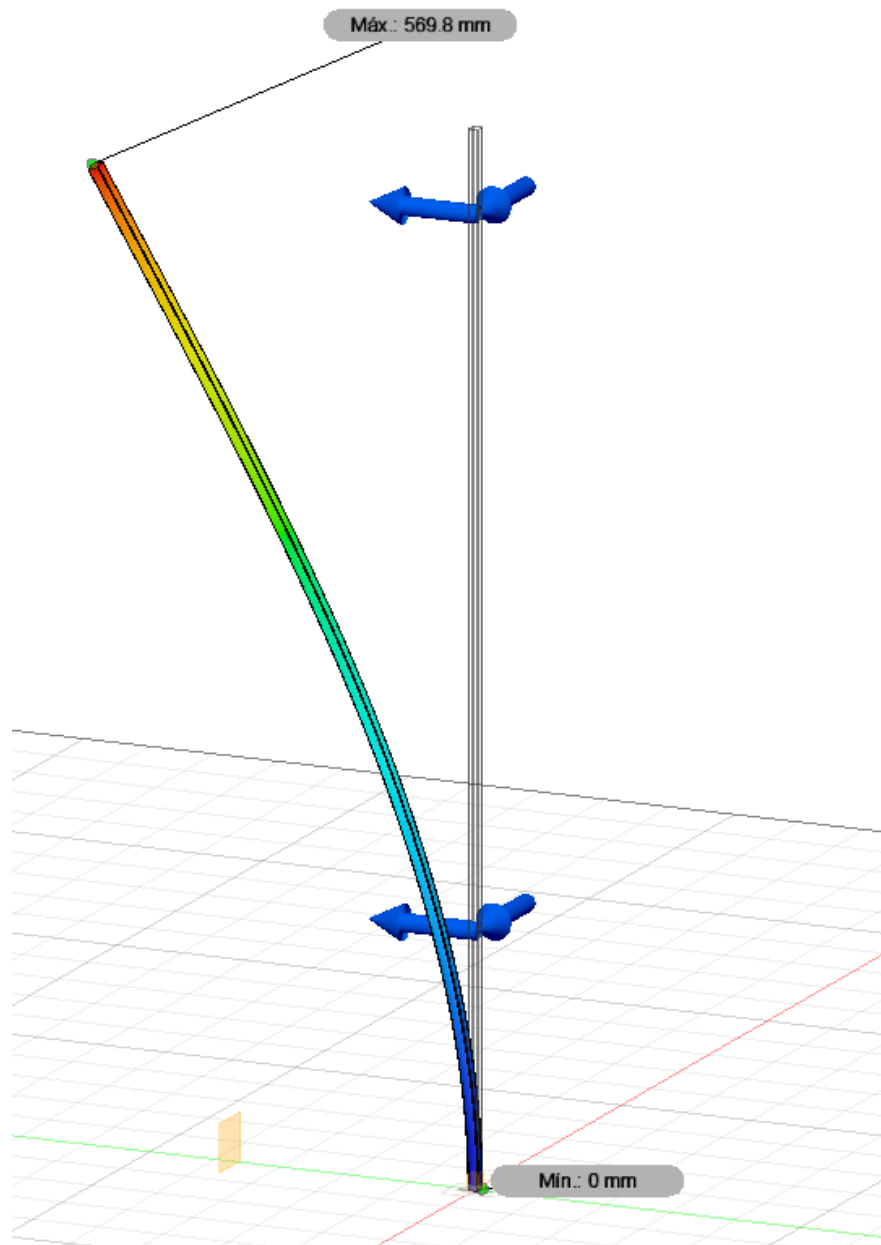


Ilustración 85-Simulación por FEA de la flexión del eje sin pieza de soporte

Antes de hacer la optimización topológica, hay que comprobar si nuestro diseño inicial es resistente a los esfuerzos de arrastre producidos por los álabes.

Para ello, se va a lanzar una simulación por FEA en Fusion 360.

Para definir las condiciones de contorno del caso solo vamos a quedarnos con los siguientes componentes:

-Pieza de transición

- Sector del eje que queda por encima de las bases de metacrilato.

- Rodamientos que unirán el eje con nuestra pieza de transición.

Una vez el montaje este hecho en Fusion 360. Usaremos la opción de contactos automáticos, para que el programa establezca como se van a distribuir las fuerzas entre los cuerpos.

Para definir las CC:

- En cuanto a las fuerzas, vamos a usar los resultados de la simulación de CFD, donde obtuvimos las fuerzas que producían los alabes a 15 m/s y 5 vueltas/s, esto es un valor estándar-alto. Es complicado alcanzar valores más altos aunque podría darse el caso en algún momento.

- Como coeficiente de seguridad, vamos a coger la fuerza máxima, que es la del eje X y la vamos a usar tanto para drag como para lift, además, como medida extra de seguridad en caso que se produzcan vientos puntuales más fuertes, vamos a multiplicar la fuerzas x2, estos son los valores que otorgan unos vientos de aproximadamente 90 km/h, lo cual es muy improbable pero no imposible.

- Las fuerzas se dividirán en 2 fuerzas puntuales, situadas en los puntos donde acoplan los brazos de los alabes, que es donde realmente se produce la transferencia de fuerzas.

- Como puntos fijos, se tomaran toda la superficie de la base de nuestra pieza, ya que ira anclada con tuercas y la base del eje, ya que ahí está el soporte del rodamiento que lo une a las bases de metacrilato.

- Finalmente, en cuanto al material, se definirá para tanto esta como para todas las simulaciones posteriores material ABS, tanto por su relativa facilidad de imprimir en impresoras semi-profesionales como por su gran resistencia tanto a los esfuerzos como a la temperatura.

Resultados:

Como se puede ver en la siguiente figura, el diseño preliminar resiste sin ningún problema los esfuerzos aplicados por las reacciones, superando un factor de seguridad según el material utilizado de más de 8.

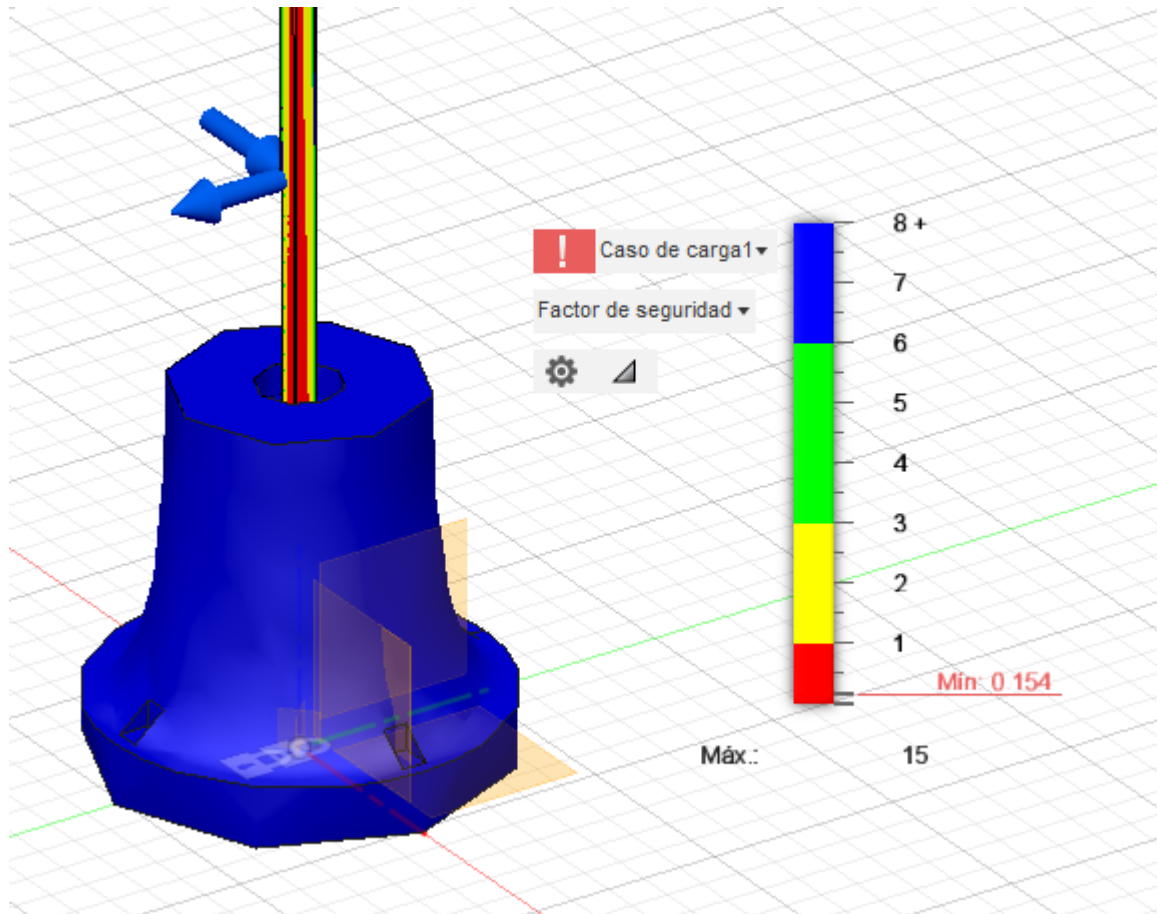
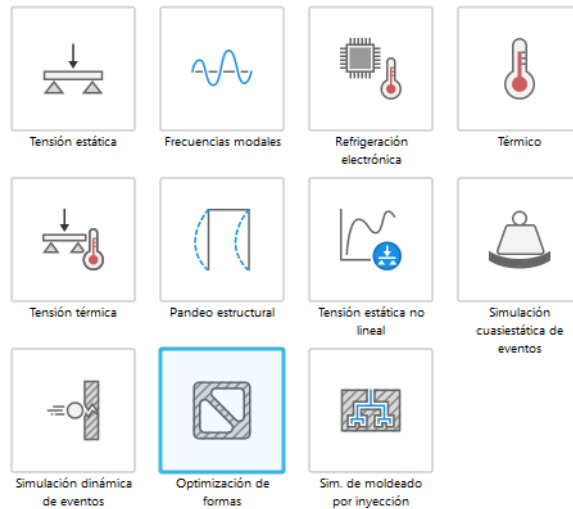


Ilustración 86-Carga sobre el diseño preliminar

Una vez hemos confirmado que con el diseño original no hay ningún problema es momento de realizar la optimización topológica, para ello crearemos una nueva simulación seleccionando esta opción.

Nuevo estudio



Ayúdame a elegir un tipo de estudio.

**Optimización de formas**

Optimice las piezas para que tengan un aspecto más ligero y eficiente en la estructura, en función de las condiciones de contorno y las cargas aplicadas a la geometría.

Crear estudio

Cancelar

Ilustración 87-Menú de simulaciones de Fusion 360

En cuanto a las condiciones de contorno y casos de carga seleccionaremos los mismos que en el caso anterior.

En la configuración de optimización de topología, seleccionaremos la opción de reducción de material conservando la resistencia.

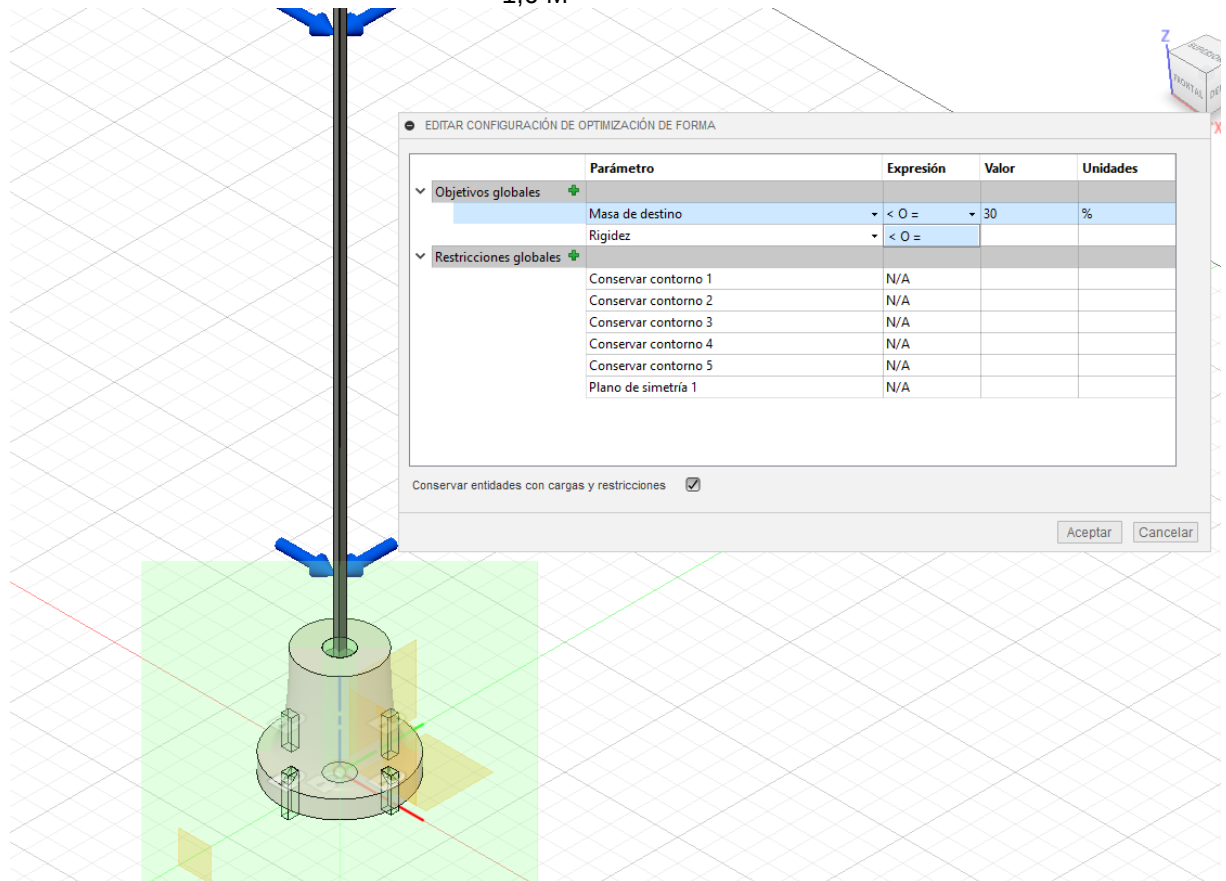


Ilustración 88-Parámetros de optimización topológica en Fusion 360

En la imagen anterior, las flechas representan las fuerzas asignadas, los volúmenes con un candado asignado representan las zonas que no pueden ser modificadas, como son los asentamientos de los tornillos, la base y el agujero central para insertar los rodamientos

Los planos verdes representan planos de simetría. Esto es importante ya que el software no permite la opción de hacer la simulación dinámica, es decir, con fuerzas que van variando de dirección con el tiempo, así que crear 2 planos de simetría formando 45° respecto a las fuerzas aplicadas hará que nos de un resultado más aceptable para fuerzas que oscilarán durante los 360° de la pieza.

Una vez indicados todos los parámetros, simplemente se lanza la simulación y en unos 5 minutos aproximadamente tenemos nuestra pieza optimizada topológicamente para las condiciones de contornos indicadas y materiales ABS.

Una vez terminado el cálculo, Fusion 360 nos presenta el siguiente resultado:

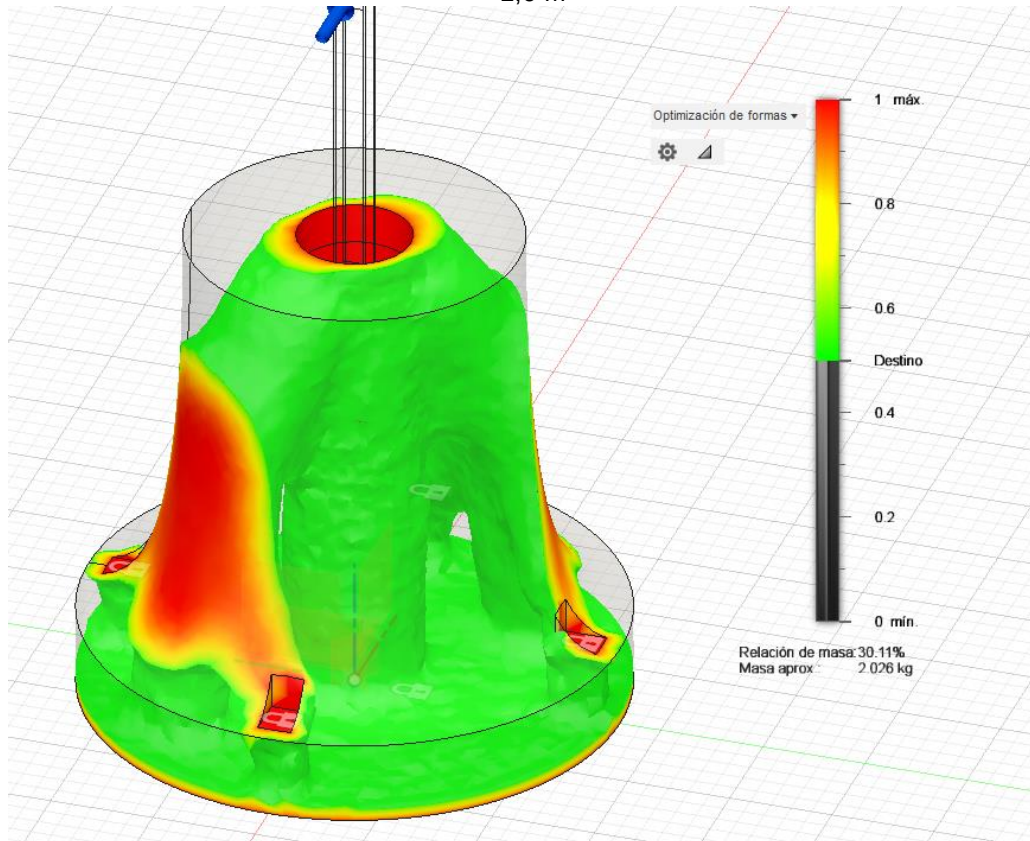


Ilustración 89-Resultado de la optimización en Fusion 360

Podemos ver la malla de la pieza resultante y en la leyenda un deslizable que nos permite elegir si queremos añadir o quitar más material. El resultado por defecto es el más óptimo en relación rigidez-masa.

En cuanto al mapa de colores, los colores más fríos son las zonas que soportan menos carga y por tanto, se irán eliminando al seleccionar más reducción de masa. En cuanto a los colores más cálidos representan justamente lo contrario, las zonas que más esfuerzos soportan, es recomendable nunca reducir la masa al punto de que todo el modelo quede en naranja-rojo, eso significaría que todo el modelo está soportando cargas cercanas a las máximas admisibles del material, aumentando en gran medida el riesgo de fallo mecánico.

En las siguientes figuras se pueden ver ejemplos del modelo con mas y menos reducción de masa y sus reducciones de peso porcentuales, respectivamente.

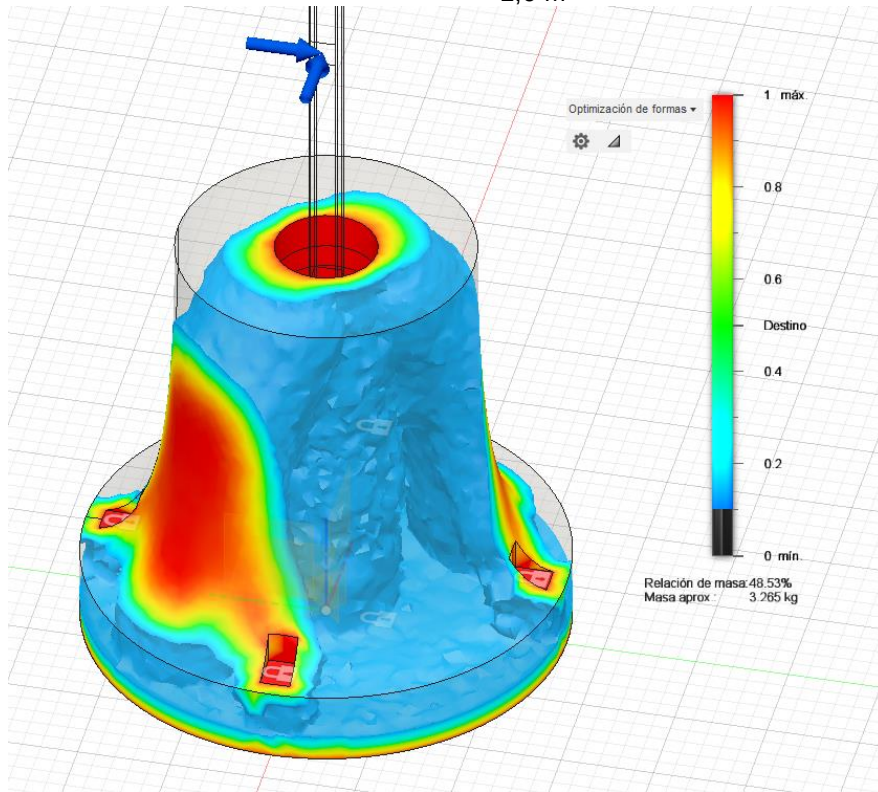


Ilustración 90-Ajuste mas restrictivo

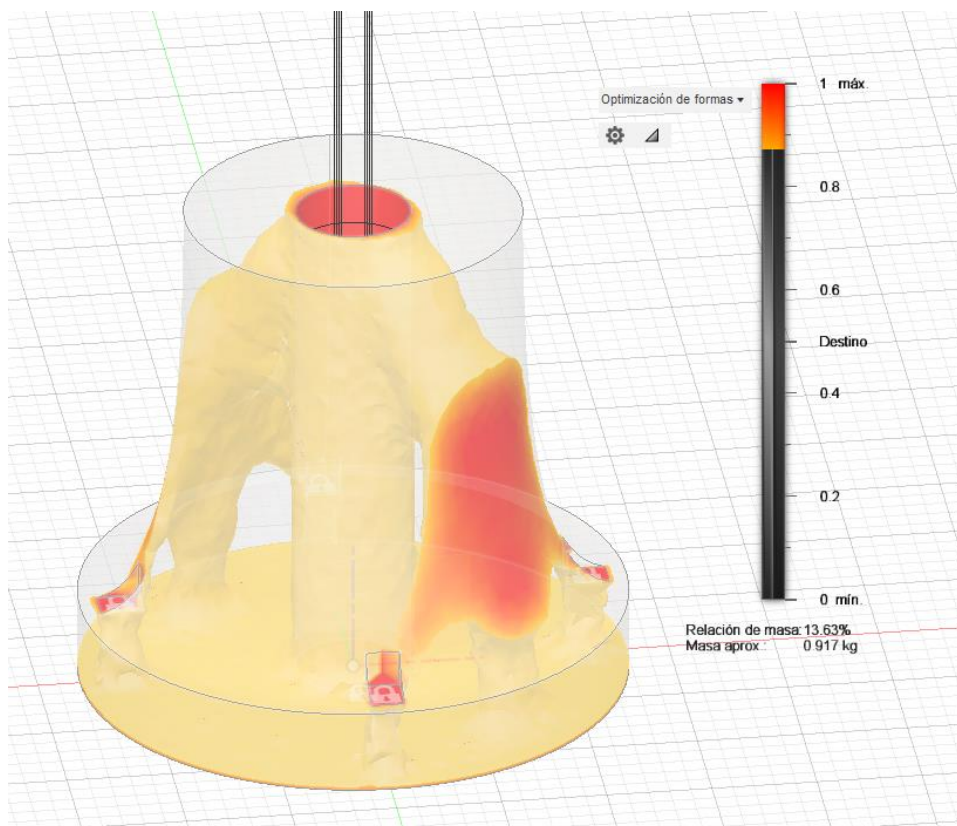


Ilustración 91-Ajuste menos restrictivo

Para nuestro caso nos vamos a quedar con el primer resultado, que otorga una masa del 30% respecto al modelo inicial, y a priori, indica buenos valores de resistencia.

Como se ha comentado anteriormente, a pesar de tratar de igualar los resultados a una simulación dinámica, el resultado solo indica resistencia a lo largo de una dirección, para mejorar la resistencia total del modelo, se va a editar la malla con el programa Meshmixer.

Meshmixer de Autodesk es un software puntero para trabajar con mallas de triángulos, o como lo describen sus desarrolladores, la "navaja suiza" de la edición de archivos STL y mallas 3D.

Con Meshmixer, no solo es posible optimizar una malla de triángulos, sino también volver a esculpir secciones enteras, estilizar el modelo o añadirle características útiles.

Entre las modificaciones realizadas en Meshmixer, las más importantes son:

- Elevación de la base: se selecciona la parte inferior del modelo, que estará en contacto con las bases de metacrilato y se extruye hacia arriba para maximizar la rigidez de esta parte, que soportará las reacciones de las uniones.
- Se crean 4 agujeros a 90° de distancia unos de otros para permitir una correcta unión a las bases de metacrilato. En el inicio del proyecto, estos tornillos estaba planificado colocarlos en los asentamientos diseñados para ello, pero al modificar la malla se vio que era más conveniente colocarlos en la parte plana de la base. Los tornillos a usar, y por tanto el diámetro del agujero es M8.
- Se hace una simetría de la malla original proporcionada por Fusion 360 a 90° para asegurar que la pieza tiene rigidez en todas las direcciones en las que se podrían aplicar fuerzas.
- Se suavizan las aristas para facilitar la impresión, a la vez que se eliminan posibles zonas concentradoras de tensiones.

- Se añade material en las zonas con más voladizos, con el objetivo de reducir los ángulos entre zonas del modelo y por consecuente, la necesidad de utilizar soportes a la hora de imprimir el modelo.
- Se refina la malla alrededor de las zonas con agujeros, como los agujeros de los tornillos o el agujero central, donde asienta el rodamiento, con el objetivo de conseguir la máxima precisión posible en las tolerancias al pasar el modelo por el laminador.

Todas estas modificaciones, aparte de mejorar y facilitar el proceso de impresión, añaden mucha rigidez al modelo, ya que hemos duplicado la malla original y añadido más material en la base. Estas modificaciones garantizan que no va a haber ningún tipo de problema al soportar las tensiones transmitidas por el eje.

Como desventaja, al añadir tanto material quizás se ha contradicho un poco uno de los principales objetivos de este proceso, que era disminuir la masa de la pieza. Aun así, a simple vista se puede ver que la reducción ha sido considerable, dando una forma orgánica interesante.

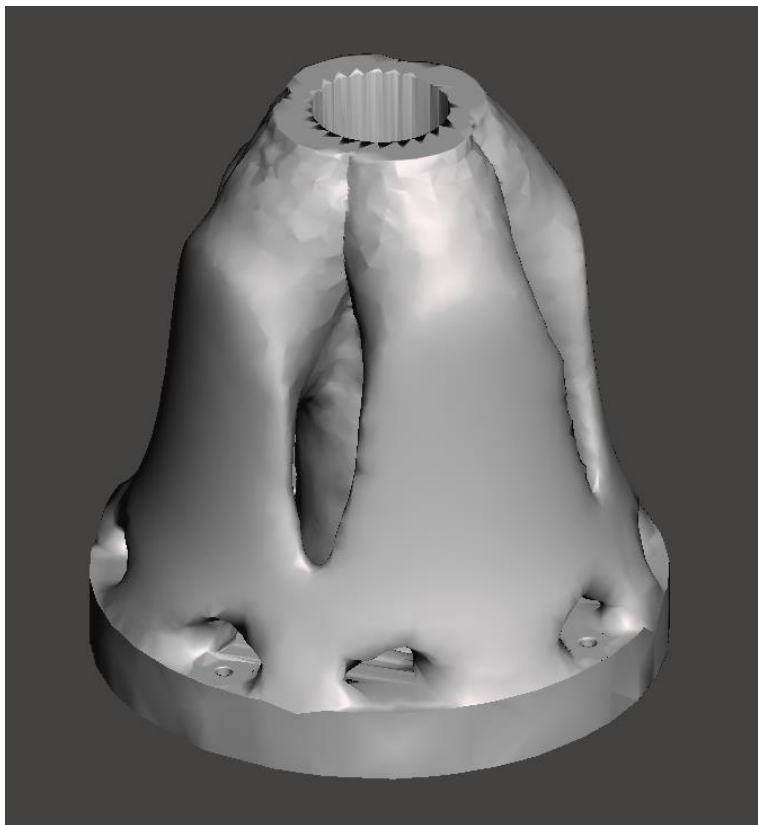


Ilustración 92-Diseño final después de realizar modificaciones en Meshmixer

Finalmente, es conveniente lanzar una simulación con la nueva pieza para evaluar la reducción de la flecha en el eje usando este nuevo diseño.

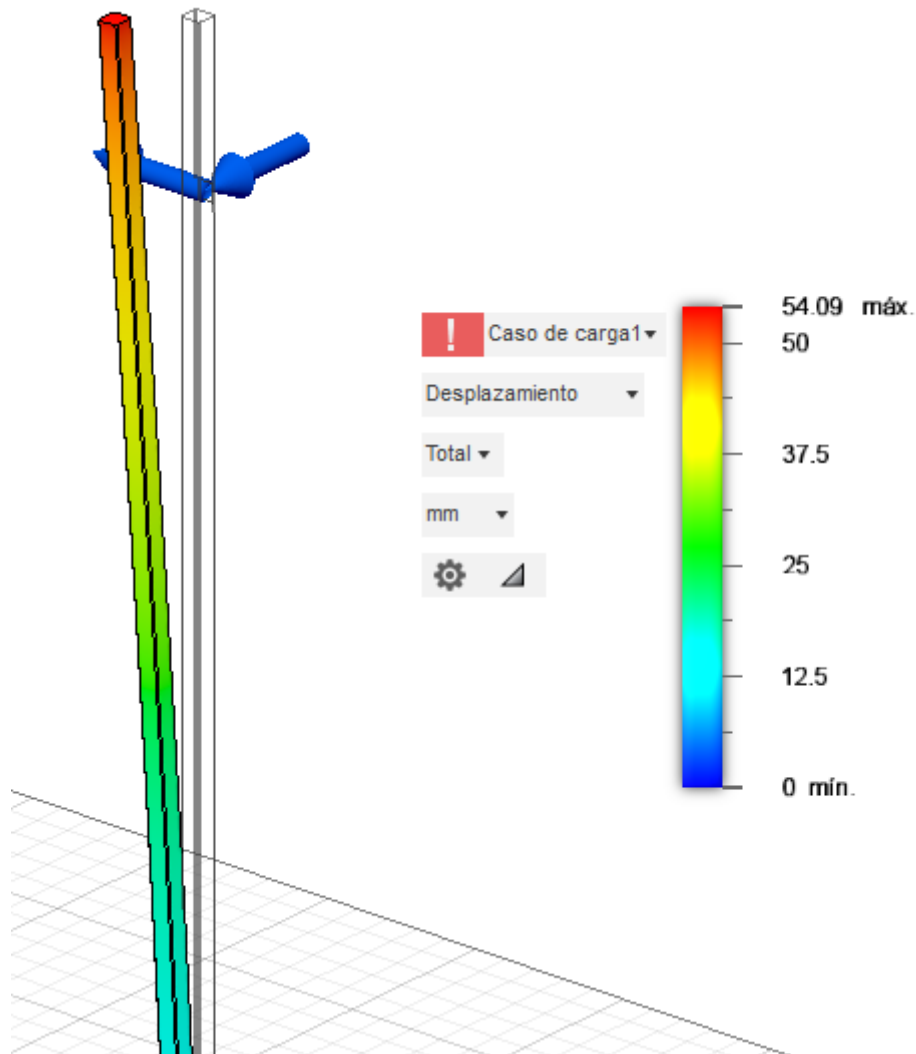


Ilustración 93-Simulación de flexión del eje usando la pieza de soporte

La flecha usando esta nueva pieza de soporte es de aproximadamente 5.5 cm.

Como conclusión, los resultados aún están lejos de ser perfectos, pero comparado con los resultados iniciales hemos tener 10 veces menos flecha, lo cual son unos resultados bastante aceptables, teniendo en cuenta la limitación de altura de la pieza.

Bibliografía

- [1]Galdos Urrutia, R y Madrid Ruiz, Francisco J. La energía eólica en España y su contribución al desarrollo rural.
- [2] Marco D'Ambrosio Marco Medaglia (2010). "Vertical Axis Wind Turbines: History, Technology and Applications"
- [3] Franquesa Voneschen, M. (2010). "Breve introducción a las turbinas eólicas Darrieus"
- [4]Delphine De Tavernier, Carlos Ferreira, and Anders Goude(2022). " Vertical-Axis Wind Turbine Aerodynamics"
- [5]Faris Alqurashi and M. H. Mohamed(2019). "Aerodynamic Forces Affecting the H-Rotor Darrieus Wind Turbine"
- [6] Diego José Fraire(2020) . " DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL PARA USO URBANO DE 3 KW"
- [7] De La Cruz León, Jorge(2021). "Diseño y fabricación de un dron mediante diseño generativo e impresión 3D"
- [8] Pérez Cobo, Marta (2021). "Aplicación de un programa de optimización topológica al diseño de un chasis para Formula Student".
- [9] Luis Bueno Sáinz (2020). "Diseño y construcción de una impresora 3D"
- [10] SATHYAJIT M. 2006. Wind Energy: Fundamentals. Resource Analysis and Economics. Berlin: Springer-Verlag.
- [11] VILLARRUBIA LÓPEZ, M. 2012. Ingeniería de la energía eólica. Barcelona: Marcombo.
- [12] HANSEN, MARTIN O.L. 2010. Aerodynamics of Wind Turbines. 2ª Edición. London: earthscan.
- [13] Espejo Marín, C. La energía eólica en España. Universidad de Murcia.
- [14] López-Vico, V. Análisis DAFO del sector de la energía eólica en España.
- [17] Fernández Salgado, José M. (2009). Tecnología de las energías renovables. A. Madrid Vicente & Ediciones Mundi-Prensa. [18] Neucona Neumann, A. (2002). La energía eólica: Principios básicos y tecnología
- [18]Fernández Salgado, José M. (2011). Guía completa de la energía eólica. Madrid: A. Madrid Vicente.
- [19] Villarrubia López, M. (2012). Ingeniería de la energía eólica. Marcombo.
- [20] Manwell, McGowan, Rogers.Wind energy explained.(Manwell, McGowan, Rogers)
- [21] Claessens, M. (2006). The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines.

[22] Guerrero Villar, Francisca M^a. (2018). Potenciales energéticos de tipo renovable
pendientes de desarrollo

Recursos Web

Recurso Web [1]

https://www.wikiwand.com/es/Francis_Herbert_Wenham

Recurso Web [2]

<https://vuela.com.mx/am/articulos/articulos-de-actualidad/12643-perfil-aerodinamico-partes-y-nomenclatura-naca-4-digitos.html>

Recurso Web [3]

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il>

Recurso Web [4]

<https://filament2print.com/es/pla-especial/1550-lw-pla.html>

Recurso Web [5]:

<https://sim-flow.com/download/cfd-simulation-software/>

Recurso Web [6]:

<https://www.autodesk.es/products/fusion-360/overview>

Recurso Web [7]:

<https://www.youtube.com/watch?v=G3VIDR9KdGw&t=1s>

Recurso Web [8]:

<https://aeeolica.org/anuario-eolico-2023-la-voz-del-sector/>

Recurso Web [9]:

<https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

Recurso Web [10]:

<https://es.statista.com/estadisticas/634517/potencia-eolica-instalada-acumulada-por-paises/>