



Modelo de aerogenerador con fines educacionales

Nicolás Andrés López Tarallo

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
2024

Modelo de aerogenerador con fines educacionales

Nicolás Andrés López Tarallo

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al
título de:

Ingeniero/a Mecánico/a

Director/a:

Dr. Ing. Guillermo Rodriguez

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
2024

A mi familia, especialmente a mi madre y mi hermana que me dieron contención y apoyo. Gracias por acompañarme a lo largo de mi vida, ayudarme a ser quien soy y lograr mis objetivos.

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica. Gracias a los profesores Dr. Ing. Guillermo Rodríguez e Ing. Pedro Sismondi por supervisar y guiar el desarrollo de este informe.

Agradezco al Ministerio de Educación Argentino y al Servicio Alemán de Intercambio Académico por darme la oportunidad de acceder a la beca ALEARG 2023-24, marco en el que llevé a cabo este proyecto.

Agradezco al Instituto de Propulsión de Aeronaves y Turbomaquinaria de la Universidad Técnica de Braunschweig por abrirme sus puertas y prestarme sus instalaciones para llevar adelante este trabajo. Especialmente agradezco al Dr. Ing. Heiko Schwarz por ser mi tutor durante mi estadía en el instituto y guiarme en el desarrollo de este proyecto. Finalmente, agradezco al Ing. Christoph Becker por su aporte y colaboración para con este proyecto.

Resumen

El proyecto se llevó a cabo en el instituto IFAS (Braunschweig, Alemania) en el marco de la beca ALEARG. Uno de los cursos dictados por el instituto ("Tecnología de aspas de aerogeneradores"), enfrentaba la problemática de no poder plasmar los contenidos teóricos en ejemplos prácticos que complementen el dictado de la clase. Ante esta situación, se propone el objetivo de construir un modelo de un aerogenerador pequeño, sobre el cual se pueda controlar las variables de diseño. La turbina debe poder generar una cantidad mínima de potencia por hora (Watts) y el usuario debe tener la posibilidad de modificar las variables de diseño. Al poder variar las variables de diseño se puede observar su influencia en la potencia generada. Para llevar a cabo el proyecto, se realizan tareas de diseño, cálculos estáticos, programación, calibración y testeos en el canal de viento del instituto. Para llevar a cabo el proyecto, partimos de una primera versión de este realizado anteriormente por otro estudiante; la cual no funcionaba.

Palabras clave: Aerogenerador, Instituto, Diseño, Cálculos, Programación, Calibración, Testeo.

Abstract

The project was carried out at the IFAS institute (Braunschweig, Germany) within the framework of the ALEARG scholarship. One of the courses given by the institute ("Technology of Wind Turbine Blades"), faced the problem of not being able to translate the theoretical contents into practical examples to complement the lectures. Faced with this situation, the objective is to build a model of a small wind turbine, on which the design variables can be controlled. The turbine must be able to generate a minimum amount of power per hour (Watts) and the user must be able to modify the design variables. By being able to vary the design variables, the influence on the power generated can be observed. To carry out the project, design, static calculations, programming, calibration and testing are carried out in the wind channel of the institute. In order to carry out the project, we started from a first version of the project previously carried out by another student; which did not work.

Keywords: Wind Turbine, Institute, Design, Calculations, Programming, Calibration, Testing.

Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen.....	V
Abstract	VI
Contenido	VII
1 Introducción	1
1.1 Problemática	1
1.2 Importancia	1
1.3 Antecedentes teóricos y prácticos	1
1.4 Objetivos	2
1.5 Alcance	2
1.6 Organización del desarrollo del proyecto	2
1.7 Limitaciones	3
1.8 Significado del estudio	3
2 Capítulo 1 – Etapa conceptual	4
2.1 Estado del arte	4
2.1.1 Aerogeneradores de eje vertical	4
2.1.2 Aerogeneradores de eje horizontal	5
2.2 Elección de concepto	6
2.2.1 Rendimiento	6
2.2.2 Aprovechamiento de recursos preexistentes	7
2.2.3 Sencillez del diseño	7
3 Capítulo 2 – Diseño y selección de componentes	8
3.1 Base y torre.....	8
3.2 Hub	11
3.2.1 Base	12
3.2.2 Rotor	12
3.2.3 Eje y sensor hall	14
3.2.4 Freno Magnético.....	15
3.2.5 Elemento medidor de momento	15
3.2.6 Freno mecánico de disco.....	17
3.3 Dimensionamiento y diseño de las aspas.....	17
3.3.1 Dimensionamiento del aerogenerador	17
3.3.2 Diseño de las aspas	21
3.3.3 Modelización en CAD	27
3.3.4 Fabricación del Aspa	27
3.3.5 Simulaciones en “Qblade”	29
4 Programación en Arduino y Python.....	34
4.1 Arduino	34
4.1.1 Coordinación	34
4.1.2 Control del ángulo de ataque	34
4.1.3 Control del freno mecánico	35

4.1.4	Cálculo de potencia	35
4.1.5	Freno de emergencia.....	37
4.2	Python.....	37
4.2.1	Cálculo de potencia	38
4.2.2	Control del ángulo de ataque	39
4.2.3	Control del freno hidráulico	39
4.2.4	Guardar datos.....	40
4.2.5	Finalización del programa.....	41
4.2.6	Parada de emergencia	41
5	Testeo.....	42
6	Conclusiones y recomendaciones.....	44
6.1	Conclusiones	44
6.2	Recomendaciones	46
7	Bibliografía	47
A.	Estructura de “Handshake”	48
B.	Documentos Finales	50
C.	Planos	51

1 Introducción

1.1 Problemática

El curso actual “Tecnología de aspas de aerogeneradores” que se dicta en el instituto IFAS de la Universidad Técnica de Braunschweig ofrece una formación exclusivamente teórica, sin embargo, el instituto desea complementar esta formación teórica con aplicaciones prácticas y hasta el momento no se pudo encontrar soluciones. Realizar visitas a aerogeneradores reales no es una opción, ya que se busca un modelo sencillo, al cual poder variar las variables a su voluntad y analizar como influyen en la generación de energía.

1.2 Importancia

Como presenta la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la cual se remite a los datos del *Global Wind Energy Council*, la industria eólica está entrando en una nueva era de crecimiento impulsado por una mayor ambición política, manifestada en la histórica adopción en la COP28 del objetivo de triplicar las energías renovables para 2023. Precedido por un aumento anual del 50% en el 2023 con respecto a 2022 y bajo el pronóstico de crecimiento para el periodo 2024-2030 se fundamenta la intención de llevar adelante este proyecto [(Energía, 2024)].

Se aprovecha la inversión, el desarrollo y la investigación acumulada hasta el momento en el campo de la energía eólica por parte del gobierno alemán y, específicamente, de la Universidad Técnica de Braunschweig. Asimismo, se reconoce que, a pesar de ser el cuarto país en la región en cuanto a producción de energías renovables, Argentina aún no ha alcanzado un aprovechamiento pleno de su potencial eólico. [(Gismondi, 2024)] En este contexto, se subraya la importancia de invertir en el desarrollo de material de estudio para formar a las futuras generaciones de ingenieros con interés en abocar su carrera a las energías renovables.

1.3 Antecedentes teóricos y prácticos

Previo a este proyecto, otro estudiante había realizado una primera versión de este. Esta primera versión no funcionaba ya que no lograba generar energía, ni conocer una posible

energía teórica generada. Sin embargo, se toma este proyecto como punto de partida teórico y se recicla algunos elementos de este como se desarrollará a lo largo del informe. Además, se utilizan los conocimientos teóricos adquiridos durante el curso “tecnología de las aspas de aerogeneradores” (realizada en paralelo durante el desarrollo del proyecto).

1.4 Objetivos

El objetivo es construir un aerogenerador pequeño y obtener la potencia por hora generada por el aerogenerador. Para ello, se realiza una medición indirecta de la potencia a partir del torque existente y la velocidad de rotación del aerogenerador. Además, el aerogenerador debe permitir al usuario modificar distintas variables que afectan a la potencia como la velocidad de giro, el torque, el ángulo de ataque de las aspas y el modelo de las aspas del aerogenerador

1.5 Alcance

El alcance de este proyecto alcanza a cualquier institución educativa. Las áreas de estudio que alcanza el proyecto son diseño, fabricación, selección de componentes, programación en Python y Arduino, impresión 3D, calibración, simulaciones en software Qblade y tests. Sin embargo, el estudio no presenta un alcance económico, todo lo realizado fue con elementos preexistentes en el instituto (exceptuando el freno utilizado) o elementos fabricados dentro de los talleres propios de la universidad, por lo que, nunca se solicitó un análisis de costos.

La realización del proyecto fue principalmente de manera independiente supervisada por el tutor Dr. Ing. Schwarz. El conexionado de los elementos electrónicos, como la construcción del tablero del aerogenerador fue realizado por Christoph Becker, trabajador del instituto.

1.6 Organización del desarrollo del proyecto

El proyecto se organiza de la siguiente manera:

- Etapa conceptual
- Diseño y selección de componentes
- Programación en Arduino y Python

- Testeo
- Conclusiones y recomendaciones

1.7 Limitaciones

Las principales limitaciones a las cuales se enfrenta el proyecto fueron limitaciones temporales, falta de conocimientos en programación y en el diseño de las aspas del aerogenerador. Las limitaciones temporales se refieren a una limitación de 5 meses de trabajo para llevar a cabo el proyecto; incluyendo un receso intermedio en el periodo de 25 de diciembre al 5 de enero. Por otro lado, el sistema de control del aerogenerador requiere programación en Arduino (para el manejo de los distintos servomotores y lecturas de los sensores) y programación en Python (interfaz para que el usuario pueda controlar el aerogenerador y visualizar los resultados). No se cuenta con conocimiento en estos programas previo a la realización del proyecto, por lo que fue necesario aprenderlo a la par del trabajo. Tampoco se contaba con conocimientos en diseño de aspas, por lo que, para poder realizarlo fue necesario asistir a un curso en paralelo al desarrollo del proyecto (también fue útil para tener conocimientos generales sobre aerogeneradores).

1.8 Significado del estudio

El significado que tiene el estudio es lograr la construcción de un pequeño aerogenerador funcional que pueda ser utilizado por el curso. Una vez que el modelo sea funcional, se utilizará como punto de partida para una optimización de este en el futuro.

2 Capítulo 1 – Etapa conceptual

2.1 Estado del arte

Para cumplir con los deseos de la catedra de “Tecnología de aspas de aerogeneradores”, se decide sencillamente por optar por un aerogenerador pequeño.

El deseo de los consumidores individuales de ser independientes de la red eléctrica central y su discreta apariencia en el paisaje en comparación con los grandes parques eólicos han propiciado el crecimiento de este mercado en los últimos años.

A diferencia de las grandes turbinas, en las que se ha impuesto el diseño de eje horizontal con tres palas del rotor, las pequeñas turbinas eólicas suelen ser más diversas en cuanto a aspecto y diseño. Aquí se distingue entre turbinas con eje de rotación horizontal y vertical, véase la **Figura 2-1**.

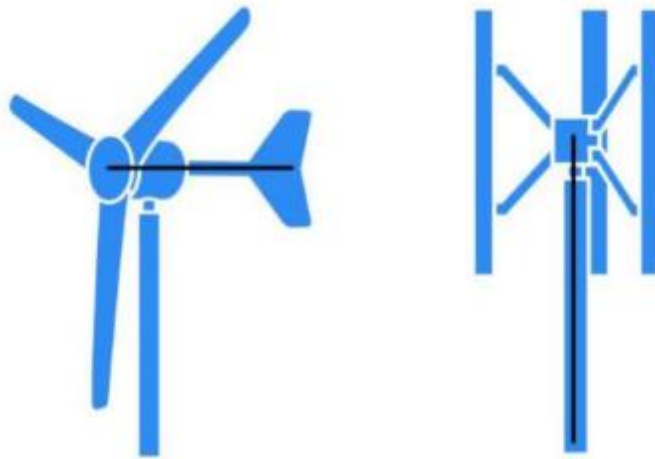


Figura 2-1 – Aerogenerador de eje horizontal (der.) y de eje vertical (izq)

[(Buchner, 2020)]

2.1.1 Aerogeneradores de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos que no tienen ningún mecanismo de orientación con respecto al viento además de no tener la capacidad de autoarranque. Como principal característica se tiene que el sistema de transformación de energía mecánica a eléctrica está ubicado en el suelo y su altura a la cual operan es muy baja, permitiendo un acceso fácil a los diferentes sistemas para su mantenimiento. A su vez

este tipo de aerogeneradores se pueden clasificar en dos grandes tipos: Darrieus y Savonius. Los tipos Darrieus consta de varios alabes rectos o curvos montados en una estructura vertical. Estos aerogeneradores trabajan a partir de la fuerza de sustentación producidas durante la rotación. Por otra parte, los aerogeneradores Savonius son sistemas basados en el arrastre y consisten en dos o tres alabes. Estos aerogeneradores tienen una sección transversal en forma de “S” cuando se le observa desde la parte superior. A medida que los alabes se mueven a lo largo del viento, experimentan menos arrastre y esta diferencia en el arrastre les permite girar. Los alabes curvos del aerogenerador Darrieus son remplazados por alabes rectos que tienen una sección transversal del perfil aerodinámico vistos desde la parte superior del aerogenerador para dar una configuración de aerogeneradores de eje vertical conocida como Darrieus de alabes rectos. Pueden tener cualquier número de alabes, sin embargo, generalmente tienen de dos o tres alabes. Un aerogenerador de este tipo que tiene dos alabes es frecuentemente denominado rotor-H. En la **Figura 2-2** se muestran los tres diseños de aerogeneradores de eje vertical. [(Salas, 2017)]

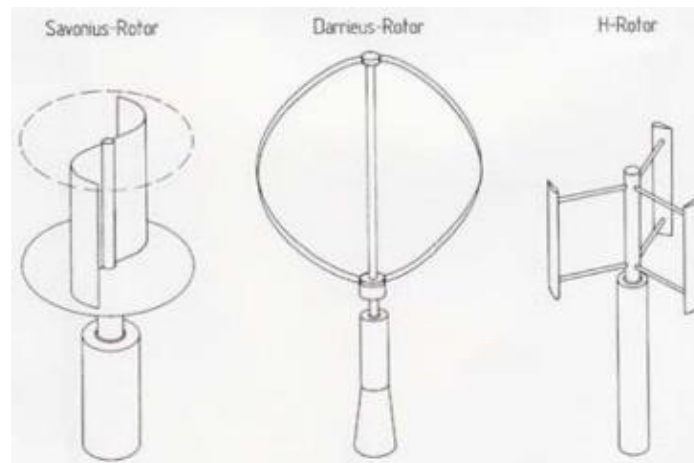


Figura 2-2 – Conceptos de aerogeneradores de eje vertical [(Salas, 2017)]

2.1.2 Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal son aquellos cuyo eje del rotor está en la posición horizontal. A diferencia de los aerogeneradores de eje vertical, éste tiene la capacidad de autoarranque, así como un mecanismo de orientación. Estos aerogeneradores son altamente dependientes de la dirección del viento y por lo tanto son operados

generalmente a alturas más altas que los aerogeneradores de eje vertical [(Salas, 2017)]. Debido a la aerodinámica y a que ninguna parte del rotor gira en contra del viento, este tipo de turbina alcanza rendimientos de aproximadamente el 50 % del máximo posible del 59 %, véase **Figura 2-3**Figura 2-2. Además del conocido diseño con tres palas del rotor como rotor de barlovento, también se han establecido rotores de barlovento con más o menos de tres palas del rotor. Las turbinas orientadas a barlovento son aquellas en las que el viento llega primero al rotor y luego a la torre; mientras que con una turbina orientada a sotavento sería al revés [(Buchner, 2020)].



Figura 2-3 – Pequeño aerogenerador de eje horizontal

2.2 Elección de concepto

Luego del análisis de los distintos conceptos, se optó por realizar un aerogenerador pequeño de eje horizontal de 3 aspas. Las razones que fundamentan esta elección se desarrollan a continuación.

2.2.1 Rendimiento

Como se muestra en la **Figura 2-4** y se describió anteriormente, este concepto es el que presenta el rendimiento más cercano al límite teórico de Betz. Esto es importante, ya que, siendo este un primer modelo, elaborado con elementos no ideales disponibles en el

laboratorio y sin la tecnología adecuada para lograr un modelo óptimo de aerogenerador, se pueden pronosticar grandes pérdidas de rendimiento cuando se lleve a cabo. Por esta razón, es fundamental que el punto de partida teórico sea lo más alto posible para que, a pesar de las pérdidas de rendimiento, se puedan obtener resultados útiles para el estudio.

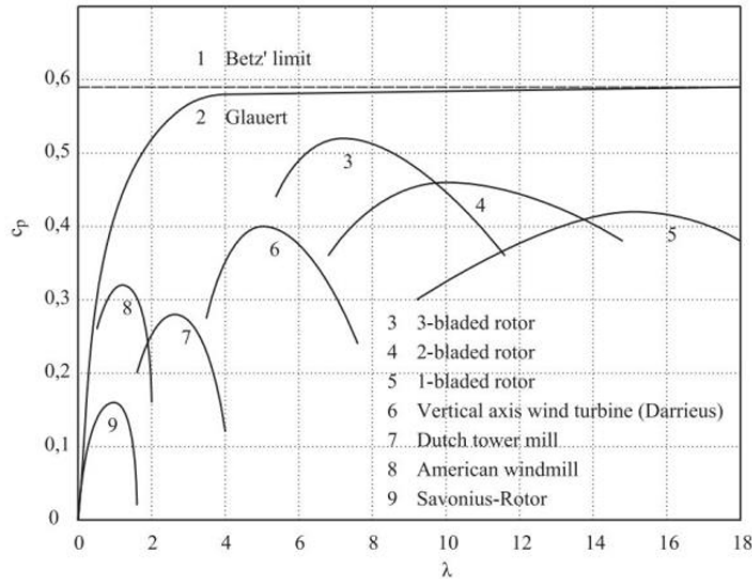


Figura 2-4 – Coeficiente de potencia en función de la velocidad de punta de varios conceptos de aerogeneradores [(Bauknecht, Semaan, & Radespiel, 2023)]

2.2.2 Aprovechamiento de recursos preexistentes

El estudiante anterior, también tomó la decisión de trabajar con este concepto de aerogenerador, por lo que, se puede reciclar algunos elementos del proyecto, y utilizar toda la información ya recolectada. Esto optimiza los tiempos de trabajo, los cuales son escasos; permite evitar errores ya cometidos y trabajar sobre propuestas de mejora.

2.2.3 Sencillez del diseño

El diseño de este concepto presenta geometrías relativamente sencillas de construir. Además, el proceso de diseño presenta mayor sencillez en este concepto, ya que el mismo fue dictado en la clase “Tecnología de aspas de aerogeneradores” a diferencia de los modelos de eje vertical sobre los cuales no se trataron en detalle a lo largo del curso.

3 Capítulo 2 – Diseño y selección de componentes

En este capítulo se plasman los cálculos, modelos y modificaciones realizadas en los elementos constructivos del aerogenerador. Todos los elementos fabricados en el taller interno de la Universidad son de aluminio. Los elementos estándares como el soporte de los rodamientos, los rodamientos, los servomotores, sensores y engranajes estaban disponibles en el instituto.

3.1 Base y torre

La torre se ensambla a partir de perfil rectangular ITEM tipo 6 con las dimensiones 60x60 mm. Para que el flujo alrededor de la torre sea menos turbulento y por lo tanto las condiciones de flujo en el rotor sean menos perturbadas, el perfil de la torre fue encapsulado en un tubo de PVC, mostrado en naranja en la **Figura 3-1**. [(Buchner, 2020)]

La cimentación consiste en dos perfiles ITEM cruzados del mismo tipo, que se atornillan a la torre mediante ocho ángulos, como se muestra en la **Figura 3-1**. Los perfiles sirven tanto para estabilizar el sistema bajo la carga del viento como para asegurar el tablero eléctrico. Todo el sistema se apoya sobre cuatro rodillos de elevación ITEM del tipo D62.



Figura 3-1 – Base y torre del aerogenerador

Los rodillos elevadores disponen de un bloque de goma de altura regulable que, al bajar, eleva el rodillo y garantiza la estabilidad. Cuando el bloque de goma está levantado, la rueda está en contacto con el suelo y el sistema puede moverse libremente.

La altura de la torre es de 1070 mm. La velocidad del viento de diseño es de $20 \frac{m}{s}$. Esta velocidad del viento se eligió para garantizar la estabilidad del sistema, en cualquier caso. A continuación, se desarrolla el cálculo de dimensionamiento. La longitud crítica del perfil de $x = 760 \text{ mm}$. El flujo de viento es solamente ortogonal al plano del rotor desde el frente; no se prevé ningún cambio en la dirección del viento. Por tanto, este lado del perfil debe contrarrestar todo el momento del vuelco.

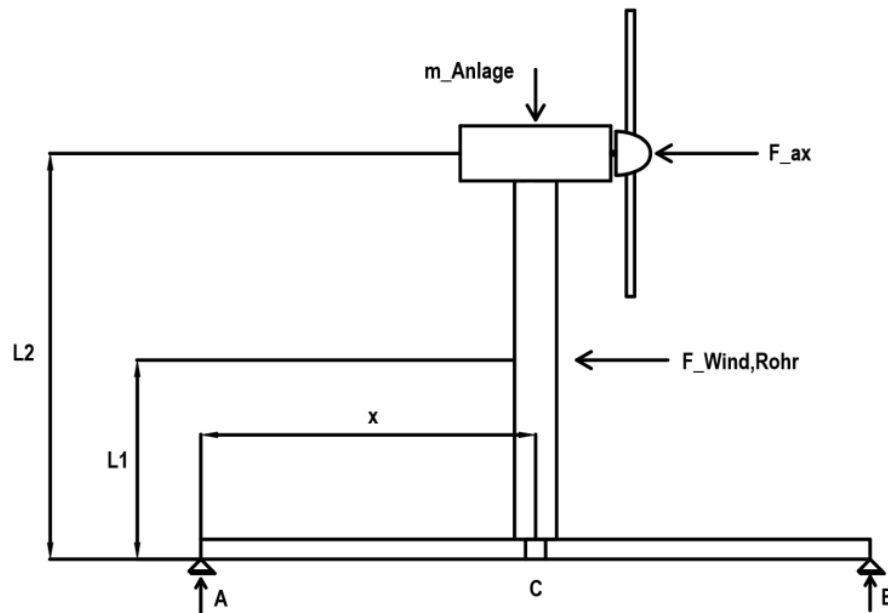


Figura 3-2 – Fuerzas actuantes y dimensiones del modelo [(Buchner, 2020)]

El momento de vuelco se compone de la carga estática del viento " $F_{Wind,Rohr}$ ", que actúa sobre la superficie frontal de la torre, y de las fuerzas aerodinámicas generadas por el rotor. Estas últimas vienen determinadas por la fuerza axial F_{ax} , véase **Figura 3-2**. Debido a la forma aerodinámica del *hub*, la superficie frontal vertical de la góndola está casi completamente cubierta y, por tanto, tiene una resistencia al aire despreciable. Para evitar que el *hub* genere un momento adicional, se montó en la torre de forma que el peso del rotor y de los componentes del *hub* se equilibren. La **Figura 3-2** muestra los puntos de aplicación de las fuerzas y las dimensiones correspondientes.

En primer lugar, se calcula el equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal (dirección X) y vertical (dirección de Y).

$$\sum F_x = 0 = 4 * F_{base,x} - F_{Wind,Rohr} - F_{ax} \quad (3.1)$$

$$\sum F_y = 0 = 4 * F_{base,y} - P = 4 * F_{base} - m * g \quad (3.2)$$

De las ecuaciones anteriores, “m” hace referencia a la masa total del aerogenerador y “ $F_{base,x}$ ” y “ $F_{base,y}$ ” es la reacción de apoyo de los cuatro pies de la turbina. La resultante de la reacción se calcula mediante el teorema de Pitágoras.

$$F_{base} = \sqrt{F_{base,x}^2 + F_{base,y}^2} \quad (3.3)$$

El conjunto de momentos alrededor del punto de giro C en el punto de conexión entre la torre y los cimientos es el siguiente.

$$\sum M_c = 0 = -F_{base,trasero} * X + F_{ax} * L_1 + F_{Wind,Rohr} * L_2 \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.4) “ $F_{base,trasero}$ ” es la reacción de apoyo del pie trasero en el punto A, x es la longitud requerida del perfil ITEM. Se supuso que el coeficiente de resistencia aerodinámica para un cilindro que es largo en relación con su diámetro es “ $C_{W,Rohr} = 1,2$ ”. Este valor se utiliza para calcular la carga de viento suponiendo una velocidad máxima de $C_1 = 20 \frac{m}{s}$:

$$F_{Wind,Rohr} = \mu * A_{Rohr} * C_1^2 * C_{W,Rohr} \quad (3.5)$$

Donde μ es la densidad del aire en combinación con un parámetro empírico para convertir la fórmula en unidades SI, ya que la fórmula procede de una fuente con unidades imperiales. “ A_{Rohr} ” es la cara externa del tubo en la torre, aunque el tubo completo no está sometido a toda la velocidad del viento durante el funcionamiento del aerogenerador en el banco de pruebas de la cámara. Como la determinación del área efectiva real de ataque no justifica el esfuerzo que supone, se utilizó el área completa por razones de seguridad. Con todos los parámetros conocidos, la longitud necesaria del perfil ITEM trasero se calcula como muestra la ecuación (3.6).

$$x = \frac{F_{ax} * L_1 + F_{wind,Rohr} * L_2}{F_{base}} \quad (3.6)$$

Durante las pruebas, el sistema funcionó a una velocidad del viento de $C_1 = 20 \frac{m}{s}$ a más de $r = 400 \frac{rev}{min}$ y la estabilidad estuvo garantizada en todo momento.

Estos cálculos fueron realizados por el estudiante anterior, y la base con la torre fueron reutilizados en este proyecto.

3.2 Hub

El *hub* o cubo del aerogenerador es el conjunto elementos funcionales. A continuación, se presenta la **Figura 3-3** y se enumera sus partes principales. Las mismas se desarrollan a continuación. El *hub* está compuesto por elementos preexistentes del proyecto anterior, elementos nuevos y elementos modificados.

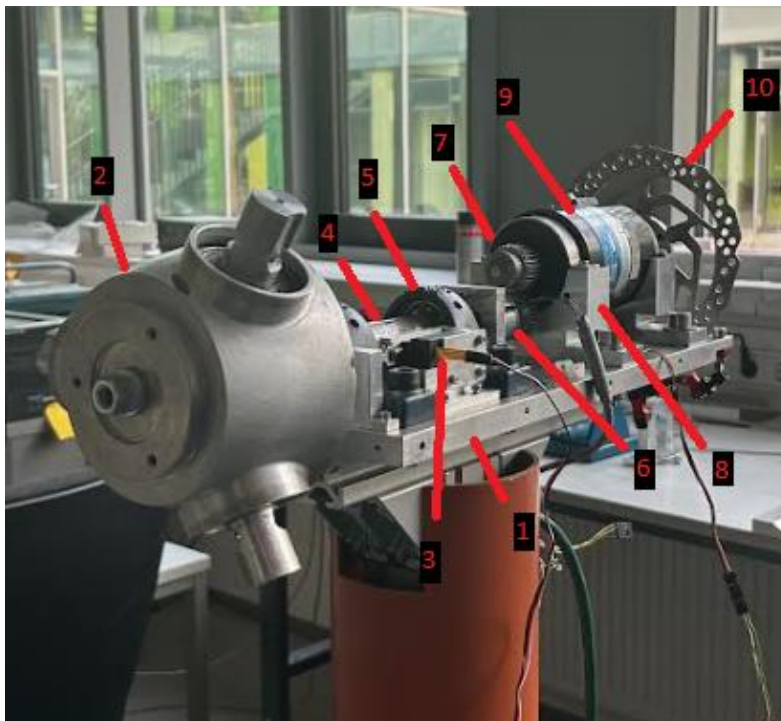


Figura 3-3 – Componentes que conforman el hub del aerogenerador

3.2.1 Base

La base es la placa (1 en la **Figura 3-3**) que soporta todos los componentes del aerogenerador. La placa fue modificada del modelo anterior. Fue necesario realizar nuevos agujeros para vincular los soportes que sostienen el transductor de momento, además se realiza un corte en la parte trasera (según se ve en la **Figura 3-8**) para que el final de esta esté al ras del disco de freno y se realiza un agujero donde se coloca el freno mecánico asistido hidráulicamente. El plano de este se ve en el anexo “**Planos**”.

3.2.2 Rotor

El rotor del aerogenerador (2 en la **Figura 3-3**) está compuesto por distintos elementos. Las aspas de este se explican más adelante en el informe, en la sección “**Dimensionamiento y diseño de las aspas**” debido a que el diseño y construcción de estos requieren una descripción más extensa. El rotor es el encargado de vincular las aspas al eje rotativo. El mismo cuenta con los elementos vinculantes de las aspas que se pueden apreciar en la **Figura 3-4** y un mecanismo interno que permite girar el eje y rotar las aspas para modificar el ángulo de ataque al mismo tiempo. El mecanismo interno se puede ver en la **Figura 3-4**.

En el interior del cubo, el eje está atornillado al extremo delantero mediante una tuerca y un anillo de retención. Este, a su vez, se fija al cubo con tres tornillos. En la parte superior, la conexión para las palas del rotor (Se explican con más detalle en la **Figura 3-5**) se fija con un rodamiento de bolas de dos hileras.

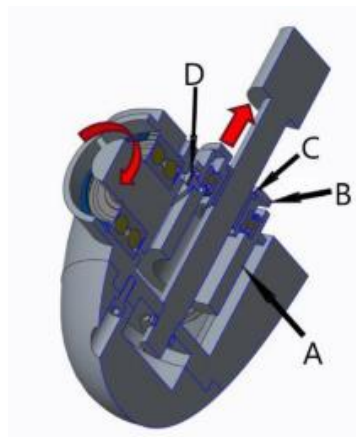


*Figura 3-4 – Mecanismo interno del rotor
[(Buchner, 2020)]*

La cinemática del mecanismo interior se puede apreciar en la **Figura 3-4**. A través de una cinemática de biela-manivela, donde el elemento rotativo cumple la función de manivela y el elemento “D” cumple la función de biela (uno por cada aspa). Este mecanismo está unido al cilindro exterior “A”, que a su vez se apoya en el cilindro interior “B” mediante un rodamiento de bolas, que a su vez se apoya en el eje con un cojinete deslizante “C”.

Mediante el uso de un servomotor (3 en la **Figura 3-3**) y mediante una vinculación física se aplica una traslación lineal en el elemento B de la **Figura 3-4**. Mediante este mecanismo, se transforma el movimiento lineal del servomotor en un movimiento rotacional en las aspas.

La conexión de las palas del rotor está diseñada como un mecanismo de cambio rápido para facilitar la sustitución de las palas durante el uso en el laboratorio. Como la mayoría de los componentes, la conexión se fresó en aluminio. Las palas se sujetan en el cubo con este componente mediante un rodamiento de bolas de contacto angular de dos hileras del tipo SKF 3205 A-2Z. Se eligió un rodamiento de bolas de doble hilera porque es el único punto de apoyo en el cubo, lo que permite la rotación libre de la conexión de las palas del rotor para ajustarlas. La **Figura 3-5** muestra la conexión de las palas del rotor como modelo CAD.

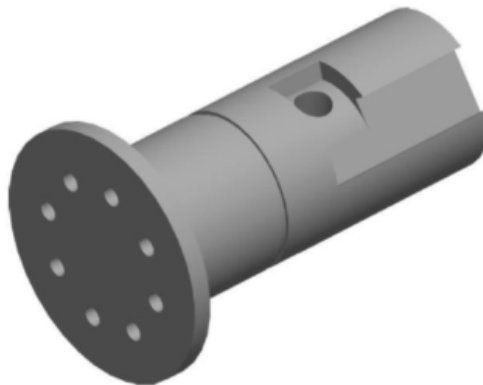


Figura 3-5 - Elemento de conexión de aspas [(Buchner, 2020)]

El rotor estaba montado al comienzo del proyecto, sin embargo, el mecanismo interno no funcionaba correctamente. Las aspas rotaban libremente, por lo que no permitía un control confiable del ángulo de ataque.

Para solucionar este problema se colocó un limitador de posición que limitaba la rotación entre 0 y 180 grados.

A pesar de solucionar este problema, el control de la rotación no es precisa. Principalmente en las posiciones extremas, la biela rota sobre sí misma y no se refleja en el movimiento rotacional. En las posiciones intermedias las aspas rotan, pero no necesariamente los ángulos deseados. Para realizar una primera versión del aerogenerador esto es útil, ya que se podrá generar potencia y variar el ángulo de ataque para evaluar su influencia. Al final del informe se presenta una sugerencia de mejora ante esta situación.

3.2.3 Eje y sensor hall

El eje (4 en la **Figura 3-3**) encargado de transmitir la rotación se apoya sobre 2 conjuntos de rodamiento y soporte de rodamiento (5 en la **Figura 3-3**) que fijan la posición en el *hub*. Vinculado al eje se encuentra un imán que acciona un sensor hall, se ve en la **Figura 3-6**. Este sensor se utiliza para contabilizar las vueltas realizadas por el eje, se desarrolla con detalle en la sección “**Programación en Arduino y Python**”. Estos elementos también estaban montados al momento de comenzar el proyecto.



Figura 3-6 – Sensor Hall

3.2.4 Freno Magnético

El freno electromagnético (6 en la **Figura 3-3**) funciona a 24 V y está situado en la parte trasera del eje, entre el engranaje y el cojinete. El freno se utiliza para detener el sistema cuando está parado y para el frenado de emergencia en caso de avería. El freno se controla a través de un relé y se activa mediante un pulsador digital. El freno está diseñado a prueba de fallos, lo que significa que debe aplicarse una tensión para liberarlo. De este modo, el sistema se detiene inmediatamente si falla la fuente de alimentación externa. El freno magnético también estaba montado al comienzo del proyecto.

3.2.5 Elemento medidor de momento

Para obtener la potencia teórica generada, realizaremos una medición indirecta. Se obtiene la velocidad de giro mediante el uso del sensor hall mencionado en la sección, y un medido de momento y con estos datos se realiza el siguiente cálculo.

$$P[W] = \omega \left[\frac{rad}{s} \right] * M[Nm] \quad (3.7)$$

Para medir el momento fue necesario montar el elemento medidor de momento al *hub*. Para poder vincularlo a la base fue necesario diseñar dos soportes (9 en la **Figura 3-3**) y dos elementos para asegurar la posición del medidor. También fue necesario mecanizar un nuevo engranaje que se adapte al eje del medidor y un elemento vinculante entre el disco de freno y el medidor.

Para diseñar el soporte, las superficies de contacto imitan la superficie exterior del medidor, para que el mismo se apoye sobre el soporte y no presente juegos en el posicionamiento. El soporte será fabricado en el taller del instituto mediante el mecanizado de un tocho de aluminio. Los elementos para asegurar la posición, se utilizan dos chapas plegadas que imiten la superficie exterior del medidor.

Para diseñar el elemento vinculante, se propone un cilindro hueco y en el extremo un disco con una matriz circular de agujeros. La matriz circular de agujeros imita la matriz circular de los agujeros del disco de freno. Se fija la posición del eje mediante el uso de chavetas, al igual que sucede con el engranaje mencionado anteriormente.

En primer lugar, se realizó un testeo con modelos impresos en 3D haciendo uso de la impresora 3D de resina con la que contaba el instituto. Los resultados de los prototipos fueron:



Figura 3-7 – Prototipo de componentes impresos en 3D

Analizando los prototipos se proponen optimizaciones en el diseño. Por un lado, el agujero interior del elemento vinculante será pasante, ya que es más sencillo de mecanizar. Por otro lado, se propuso lograr un soporte que requiera menor cantidad de material.

Por esta razón, se propuso realizar dos elementos para el soporte, uno para la superficie delantera y otro para la superficie trasera. Además, se necesarió retirar material donde se colocan los tornillos que vinculan el soporte a la base, ya que, si la cabeza de estos son demasiados grandes colisiona y no se pueden colocar correctamente. Sumado a esto, se decidió realizar agujeros oblongos para la vinculación con la base para tener mayor maniobrabilidad a la hora de posicionar el soporte y absorber errores de posicionamiento. Los elementos para asegurar la posición no pudieron imprimirse porque el espesor de estos era demasiado pequeño y la impresión falló.

Una vez obtenidos los modelos finales se realizaron los planos, que están incluidos en el anexo “**Planos**”. Los planos fueron enviados al taller para la fabricación de estas piezas, las cuales fueron todas realizadas en aluminio. Los modelos finales resultaron:



Figura 3-8 – Elementos fabricados y montados

3.2.6 Freno mecánico de disco

Este freno, a diferencia del freno magnético, no es utilizado como freno de emergencia. La función del freno es generar una oposición al giro del rotor y genera así un torque. Si el mismo actúa en vacío (sin la acción del freno) el momento actuante será nulo y por lo tanto la potencia también. Por otro lado, es necesario para poder mantener la velocidad de giro constante ante variaciones en la velocidad del viento actuante.

La selección del freno fue realizada como parte de este proyecto. Se decidió utilizar un freno mecánico asistido hidráulicamente, el cual será accionado por un servomotor de rotación parcial. El fundamento de esta decisión es que, a pesar de las bajas fuerzas que puede aplicar el servomotor es suficiente para contrarrestar las posibles fuerzas ejercidas por el aerogenerador. Esto se debe a que el freno está asistido por un sistema hidráulico propio.

3.3 Dimensionamiento y diseño de las aspas

3.3.1 Dimensionamiento del aerogenerador

Para dimensionar el rotor del aerogenerador nos basamos en el capítulo 6 del material teórico de la clase “Tecnología de las aspas del aerogenerador” [(Bauknecht, Semaan, &

Radespiel, 2023)]. Para comenzar, para poder dimensionar el rotor es necesario determinar la potencia obtenible objetivo:

$$P = 100 \text{ W} \quad (3.8)$$

Sin embargo, 100 W es nuestro objetivo real (Representa 5 luces led de 20 W cada una, que se estiman utilizar en un futuro por la catedra). Pronosticando una pérdida de rendimiento cuando la misma se lleve a cabo, se realiza un sobredimensionamiento de 170 W. A partir de la ecuación propuesta en el material teórico encontramos el radio necesario para generar la potencia deseada:

$$P = 0.5 * C_p * \rho * \pi * R^2 * V_0^3 \quad (3.9)$$

Siendo:

- P la potencia
- La densidad del aire ρ
- Velocidad del viento V_0
- $\pi * R^2$ el área del rotor
- C_p el coeficiente de potencia (0.6 ya que se idealiza el aerogenerador y suponiendo que alcanza el límite de Betz)

$$\sqrt{\frac{170 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3} * 2}{0.59 * 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3}} = R \cong 0.39 \text{ m} \quad (3.10)$$

Trabajando con el modelo de cálculo “Teoría de momento de 1D para aerogeneradores ideales”.

$$P = 2 * \rho * V_0^3 * a * (1 - a)^2 * A \quad (3.11)$$

Siendo:

- “a” el factor de inducción axial, y en este caso la incógnita de la ecuación

Reemplazando:

$$\frac{170 \frac{Kg * m^2}{s^3}}{2 * 1.225 \frac{kg}{m^3} * \left(10 \frac{m}{s}\right)^3 * \pi * (0.39m)^2} = a - 2 * a^2 + a^3 \quad (3.12)$$

$$0 = a - 2 * a^2 + a^3 - 0.145 \quad (3.13)$$

Aplicando resolvente para polinomio de grado 3 se encuentran las raíces:

$$a \begin{cases} a_1 = 1.33 \\ a_2 = 0.39 \\ a_3 = 0.28 \end{cases} \quad (3.14)$$

Fundamentándose en la teoría de “Momento 1D para aerogeneradores ideales” [(Bauknecht, Semaan, & Radespiel, 2023)] para alcanzar el límite de Betz, el valor de “a” debe ser el más cercano posible a 0.3. Por esta razón, se elige la raíz de a cuyo valor es igual a 0.28.

Para verificar los resultados se obtiene cual es la potencia alcanzable para los valores obtenidos.

$$P = 0.5 * \rho * u * A * (V_0^2 - u_1^2) \quad (3.15)$$

Siendo:

$$u = (1 - a) * V_0 = (1 - 0.28) * 10 \frac{m}{s} = 7.2 \frac{m}{s} \quad (3.16)$$

$$u_1 = (1 - 2 * a) * V_0 = (1 - 2 * 0.28) * 10 \frac{m}{s} = 4.4 \frac{m}{s} \quad (3.17)$$

Se reemplaza los resultados de las ecuaciones anteriores ((3.16) y (3.17)) en la ecuación siguiente (3.18):

$$P = 0.5 * 1.225 \frac{kg}{m^3} * 7.2 \frac{m}{s} * \pi * (0.39m)^2 * \left(\left(10 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(4.4 \frac{m}{s}\right)^2 \right) = 169.92 W \quad (3.18)$$

El resultado es el esperado, mayor a 100 W, sobredimensionando los parámetros de diseño para prevenir perdidas de potencia en el modelo real.

Una vez obtenidos estos valores, se calcula el valor de empuje T (derivado de la palabra *Thrust* en inglés).

$$T = \rho * u * A * (V_0 - u_1) \quad (3.19)$$

Reemplazando:

$$T = 1.225 \frac{kg}{m^3} * 7.2 \frac{m}{s} * \pi * (0.39 m)^2 * \left(10 \frac{m}{s} - 4.4 \frac{m}{s}\right) = 23.6 N \quad (3.20)$$

Se continúa trabajando con la teoría de momento 1D para aerogeneradores ideales y se obtienen los efectos de la rotación sobre el mismo. Para comenzar con el cálculo se parte del coeficiente de potencia C_p :

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^2 a' * (1 - a)x^3 * dx \quad (3.21)$$

Siendo λ la relación de velocidad de punta, cuyo valor corresponde al rango entre 6 y 8 para los aerogeneradores de eje horizontal de 3 aspas de hoy en día. Este rango no debe excederse sin una justificación válida. Por esta razón, se toma λ igual a 7. Resolviendo:

$$C_p = \frac{8}{\lambda} * \frac{a' * (1 - a)^4}{4} * \lambda^4 = \frac{8}{\lambda} * \frac{a' * (1 - a)}{4} * \lambda^2 \quad (3.22)$$

Se obtiene a' de la ecuación anterior:

$$a' = \frac{0.6 * 4}{8 * 7^2 * (1 - 0.278)} = 0.059 \quad (3.23)$$

Además, del material teórico es sabido que:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_0} \quad (3.24)$$

A partir de esta ecuación es posible despejar la velocidad angular ω :

$$\omega = \frac{7 * 10 \frac{m}{s}}{0.39 m} = 179.5 \frac{rad}{seg} \quad (3.25)$$

3.3.2 Diseño de las aspas

Luego de obtener todos los datos necesarios para obtener la potencia deseada, se realiza el cálculo para obtener el perfil óptimo del aspa. El perfil alar varía según la distancia del radio, por esta razón se realizan los cálculos para 7 posiciones (Pos "n") distintas a lo largo del aspa. Las posiciones se plasman en la **Tabla 3-1**:

Tabla 3-1 – Posición en el radio para diseño del aspa

Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7
0 m	0.0156 m	0.039 m	0.0975 m	0.195 m	0.2925 m	0.39 m

Para estas posiciones se calcula la relación de velocidad (X). Como se nota para la posición 7, es decir la punta del aspa, $X = \lambda$.

Tabla 3-2 – Relación de velocidad X

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0	0.28	0.7	1.75	3.5	5.25	7

Para las 7 posiciones se obtiene el valor de a' particular de cada una para su relación de velocidad X. Para realizar los cálculos se utilizan los siguientes cálculos:

$$X^2 * a' * (1 + a') = a * (1 - a) \quad (3.26)$$

$$a' + a'^2 = \frac{a * (1 - a)}{X^2} \quad (3.27)$$

Se obtienen las raíces de a' del polinomio de grado 2 utilizando la resolvente, siendo los factores A, B y C:

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = 1 \\ C = \frac{a * (1 - a)}{X^2} \end{cases} \quad (3.28)$$

Se plasma el valor de C y las raíces de a' en la siguiente tabla (**Tabla 3-**):

Tabla 3-2 – Cálculo de factor a'

Pos 1	C1	0
	a'1-1	0
	a'1-2	0
Pos 2	C2	-2.56
	a'2-1	1.2
	a'2-2	-2.176
Pos 3	C3	-0.4
	a'3-1	0.3
	a'3-2	-1.312
Pos 4	C4	-0.065
	a'4-1	0.062
	a'4-2	-1.062
Pos 5	C5	-0.01638
	a'5-1	0.016
	a'5-2	-1.016
Pos 6	C6	-0.00728
	a'6-1	0.007
	a'6-2	-1.007
Pos 7	C7	-0.004
	a'7-1	0.004
	a'7-2	-1.004

Comparando con la tabla de relaciones presente en el material teórico (**Figura 3-9**), es posible notar cuales son las raíces válidas para el estudio. Además, coincide que a' es un valor entre 0 y 1. Además, para la posición 1 y 2 los resultados son desfavorables, sin embargo, se entiende que estos son despreciables. Al ser tan cercanos a la “raíz” del aspa sus efectos aerodinámicos son despreciables:

a	a'	x
0.26	5.5	0.073
0.27	2.375	0.157
0.28	1.333	0.255
0.29	0.812	0.374
0.30	0.500	0.529
0.31	0.292	0.753
0.32	0.143	1.15
0.33	0.031	2.63
0.333	0.0301	8.58

Figura 3-9 – Tabla de valores estimativos para a' según el valor de X y a [REF]

Cálculo de ángulos de flujo ϕ para las distintas posiciones despejando la siguiente ecuación:

$$\tan\phi = \frac{a' * \omega * r}{a * V_0} \quad (3.29)$$

El ángulo de flujo está compuesto por el ángulo de ataque (α) sumado al *airfoil pitch* (θ), es decir:

$$\phi = \alpha + \theta \quad (3.30)$$

Los resultados se plasman en la siguiente tabla (**Tabla 3-3**):

Tabla 3-3 – Cálculo de ϕ

$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	$\Phi 5$	$\Phi 6$	$\Phi 7$
-	50.4°	37°	21.32°	11.4°	7.5°	5.75°

Con los datos obtenidos es posible calcular la velocidad relativa (**Figura 3-10**), la cual puede entenderse como la resultante de la velocidad del aire y la velocidad de giro del aerogenerador aplicada con un ángulo de ataque (α) sobre el perfil alar y con un ángulo de flujo (ϕ) con el plano de rotación. Aplicando la siguiente ecuación podemos obtener la Velocidad relativa para cada caso:

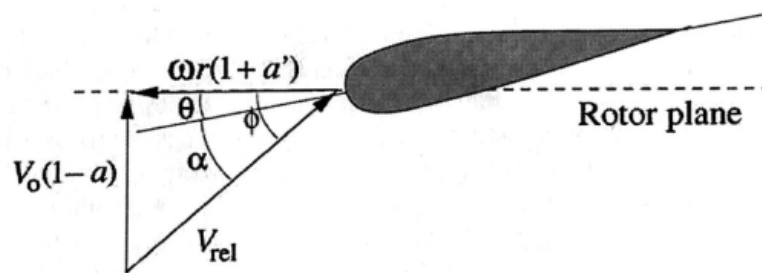


Figura 3-10 – Diagrama de velocidades [(Bauknecht, Semaan, & Radespiel, 2023)]

$$V_{rel} = \frac{\omega * r * (1 + a')}{\cos\phi} \quad (3.31)$$

Los resultados que se obtienen para las 7 posiciones son:

Tabla 3-4 – Cálculo de velocidades relativas

Vrel 1	Vrel 2	Vrel 3	Vrel 4	Vrel 5	Vrel 6	Vrel 7
-	9.66 m/s	11.4 m/s	19.95 m/s	36.3 m/s	53.33 m/s	70.64 m/s

Con los datos obtenidos hasta el momento, es posible la obtención de la longitud de cuerda ideales para las distintas posiciones del aspa. Para eso se utiliza la siguiente ecuación (3.32):

$$C_{opt} = \frac{2 * \pi * r * 8 * V_0}{B * 9 * C_L * X * V_{rel}} \quad (3.32)$$

Siendo:

- C_{opt} : longitud de cuerda optima local del aspa
- V_0 : Velocidad del viento de diseño
- V_{rel} : Velocidad relativa local
- X : Relación de velocidad local
- C_L : Coeficiente local de *lift*
- r : posición en el aspa
- B : número de aspas del rotor

Sin embargo, todavía se desconoce el coeficiente local de *lift*. Este dato se obtiene asumiendo un primer valor de longitud de cuerda local del aspa y de “Airfoil Tools” o del software “Qblade” se obtiene un perfil alar, específicamente perfil NACA de cuatro dígitos y, en consecuencia, sus coeficientes de *lift*.

Para la selección del perfil alar, se utiliza como referencia el criterio de diseño del espesor del perfil alar en función de su posición relativa a lo largo del radio del aspa, basado en el

ejercicio práctico mencionado. Además, se calcula el número de Reynolds (ver ecuación (3.33)) y, a partir de estos datos, se selecciona el perfil alar más adecuado para su implementación.

$$Re = \frac{V_0 * C_{opt}}{\nu} \quad (3.33)$$

Siendo ν la viscosidad cinemática del aire (en este análisis $1.49 * 10^{-5}$). Los perfiles seleccionados son:

- Circular para la posición 1 y 2
- NACA 5528 para la posición 3 y 4
- NACA 4423 para la posición 5 y 6
- NACA 4418 para la posición 7.

En el ejercicio práctico, se especificaba cómo variaba la longitud de la cuerda en función de la posición relativa a lo largo del radio del aspa, estableciendo proporciones entre la cuerda en diferentes fracciones del radio. Para este diseño, se utilizaron estas mismas relaciones porcentuales.

Tomando como referencia la longitud de cuerda en la base del aspa del proyecto anterior y, aplicando las mismas proporciones que en el ejercicio práctico, determiné la longitud de cuerda en cada punto clave a lo largo del radio del aspa. Este enfoque permitió mantener una distribución coherente y aerodinámicamente eficiente de las dimensiones de la cuerda a lo largo del aspa, basada en relaciones geométricas previamente validadas para la primera iteración del diseño. Las longitudes de cuerda son entonces:

Tabla 3-5 – Longitudes de cuerda óptimos (Primera iteración)

Copt 1	Copt 2	Copt 3	Copt 4	Copt 5	Copt 6	Copt 7
0.06 m	0.06 m	0.168 m	0.12 m	0.084 m	0.06 m	0.036 m

Se obtienen los coeficientes de *Lift*:

Tabla 3-6 – Coeficientes de Lift

Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7
0.6	0.6	0.55	0.6	0.7	0.75	0.52

Una vez obtenidos los valores de los coeficientes de *lift*, se reemplaza en la ecuación (3.32), y los resultados son:

Tabla 3-7 – Longitudes de cuerda óptimos (Obtenido mediante cálculo teórico)

Copt 1	Copt 2	Copt 3	Copt 4	Copt 5	Copt 6	Copt 7
0.6m	0.6m	0.165m	0.087m	0.04m	0.026m	0.028m

A partir de conocer la longitud de cuerda optima, se obtienen todas las variables para completar el diseño de los perfiles alares del aspa del aerogenerador. Se obtienen los parámetros f , x_f , D y D_{nariz} , que se presentan en la **Figura 3-11**:

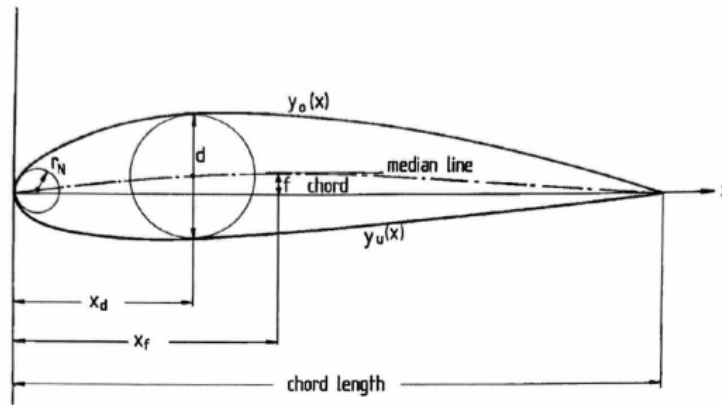


Figura 3-11 – Parametro de diseño de perfil alar [(Bauknecht, Semaan, & Radespiel, 2023)]

Se realizan los siguientes cálculos para obtener las variables de diseño:

$$f = 0.05 * C_{opt} \quad (3.34)$$

$$Xf = 0.5 * C_{opt} \quad (3.35)$$

$$D = 0.28 * C_{opt} \quad (3.36)$$

$$D_{nariz} = 0.015 * D \quad (3.37)$$

Los resultados que se obtienen son:

Tabla 3-8 – Paramtros de diseño de los perfiles alares

	F	Xf	D	D nariz
Pos 3 (NACA 5528)	0.00825m	0.0825m	0.0462m	0.000693m
Pos 4 (NACA 5528)	0.00435m	0.0435m	0.02436m	0.0003654m
Pos 5 (NACA 4423)	0.0016m	0.016m	0.0092m	0.000138m
Pos 6 (NACA 4423)	0.00104m	0.0104m	0.00598m	0.0000897m
Pos 7 (NACA 4418)	0.00112m	0.0112m	0.00504m	0.0000756m

3.3.3 Modelización en CAD

Finalmente, todas las variables de diseño fueron obtenidas y es posible hacer un modelo en CAD de esta. Viéndose el mismo:

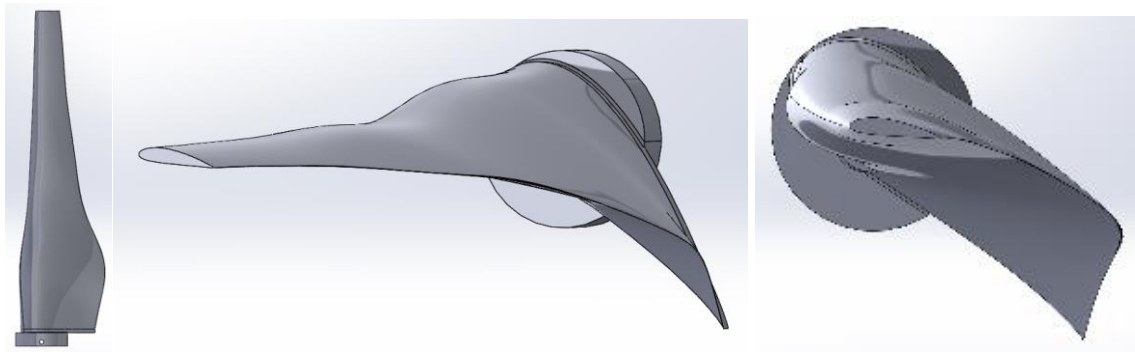


Figura 3-12 – Modelo CAD del aspa

3.3.4 Fabricación del Aspa

Cuando se finalizó la modelización en CAD, se intentó fabricar mediante impresión 3D al igual que los prototipos para los elementos del *hub*. Es importante aclarar que, la

fabricación de las aspas se realizó durante el último mes de trabajo y el tiempo de impresión es muy extenso. Por lo que, se realizaron los testeos con las aspas del proyecto anterior mientras se fabricaban las nuevas. Sin embargo, estas no pudieron ser testeadas. Debido a repetidos errores de impresión las aspas no lograron estar fabricadas a tiempo para realizar el testeo.



Figura 3-13 – intento fallido de impresión del aspa

Las aspas utilizadas para los testeos se presentan entonces en la **Figura 3-14**:



Figura 3-14 – Aspas utilizadas para el testeo [(Buchner, 2020)]

Como se puede apreciar, estas aspas no cuentan con un diseño aerodinámico. Se decide aprovechar esta diferencia entre las aspas para notar la influencia que tiene el diseño aerodinámico de la generación de potencia.

3.3.5 Simulaciones en “Qblade”

Como no es posible testear el nuevo modelo de aspas, se realizaron simulaciones en el software Qblade. Mediante estas simulaciones se compara el desempeño entre ambos modelos y obtenemos una potencia obtenible teórica. Para ello, se modelizaron ambos modelos en el software como se muestran en la **Figura 3-16** y la **Figura 3-15**. Es importante aclarar que, los ángulos utilizados en el modelaje del modelo nuevo no coinciden con los presentados en la sección anterior. Esto se debe a que, para simular correctamente la incidencia del viento en las aspas se le deben sumar 180° a los ángulos obtenidos teóricos. (Esto no implica ningún cambio en el diseño, ni en el montaje posterior).

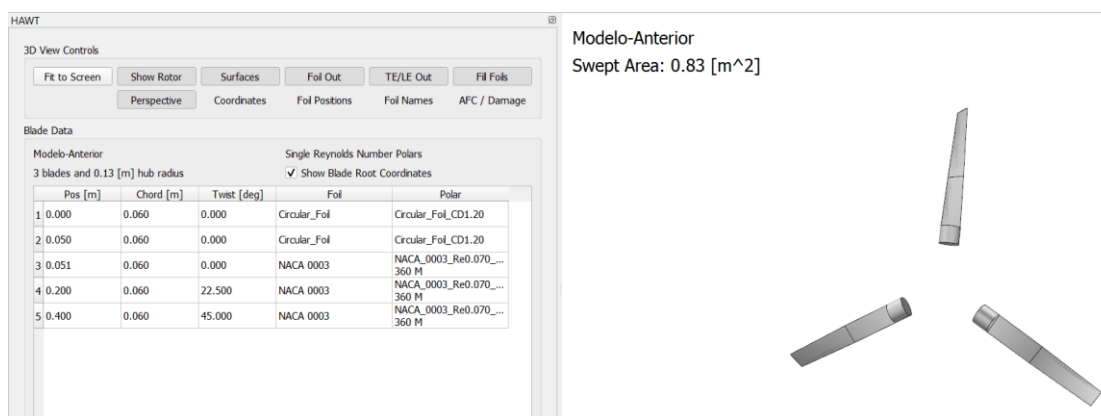


Figura 3-16 – Modelización del modelo anterior en Qblade

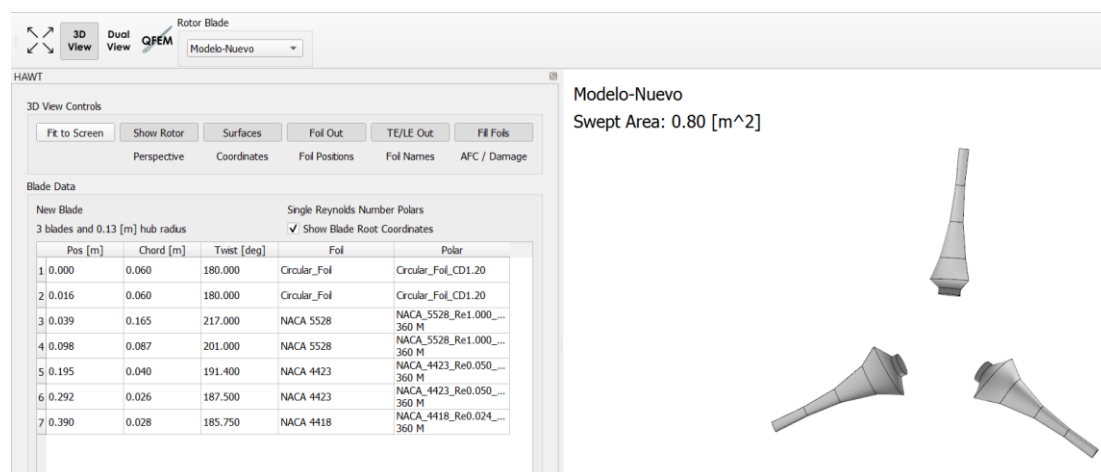


Figura 3-15 – Modelización del modelo nuevo en Qblade

También es importante destacar que, para la simulación, se utilizó en el modelo viejo un perfil NACA 0003. Sin embargo, en la realidad el aspa no tiene un perfil aerodinámico. Además, su geometría curva no es exacta como se presenta en Qblade. Ambas características afectan al resultado final de las mediciones.

Una vez modelizados ambos modelos, se utilizó el módulo de “*Blade Element Momentum*” (BEM). Este método es utilizado para el análisis aerodinámico de rotores, como los de turbinas eólicas. Este método combina la teoría de elementos del aspa (*Blade Element Theory*) y la teoría de momento (*Momentum Theory*) para calcular la distribución de fuerzas y momentos en cada sección del aspa del rotor.

El BEM permite simular cómo se comporta el aspa bajo diferentes condiciones de viento y velocidades de rotación, proporcionando información crucial sobre el rendimiento y la eficiencia del rotor.

Dentro de este módulo, primero se realizan simulaciones en “*Rotor BEM Simulation*”. Primero, es necesario setear las siguientes variables, las cuales son iguales para ambos modelos.

The image shows a software interface for 'Rotor BEM Simulation' with two main panels:

- Variables Panel:** Contains input fields for various physical parameters:
 - Wind Speed [m/s]: 10
 - Collective Pitch [deg]: 0
 - Density [kg/m^3]: 1.225
 - Kinematic Viscosity [m^2/s]: 0.0000149
 - Discretize Blade into N Elements: 50
 - Max Epsilon for Convergence: 1e-06
 - Max Number of Iterations: 500
 - Relax. Factor: 0.1
- Analysis Settings Panel:** Contains controls for the simulation:
 - Buttons: 'Define Simulation' and 'Delete Simulation'.
 - Tip Speed Ratio Start: 0
 - Tip Speed Ratio End: 5
 - Tip Speed Ratio Delta: 0.2
 - Button: 'Start Simulation'

Figura 3-17 – Variables “Rotor BEM”

En este momento, se realizó una primera modificación sobre el modelo teórico presentado con anterioridad. Por la experiencia adquirida del proyecto anterior, se considera inalcanzable una velocidad de $\lambda = 7 \rightarrow 179.5 \frac{rad}{s}$. Ya que, el máximo alcanzado en el proyecto anterior había sido de $150 rpm \rightarrow 16 \frac{rad}{s} \rightarrow 0.6 = \lambda$. Por esta razón, se limita el rango de estudio a $\lambda = 5$, considerando que el nuevo modelo puede lograr velocidades de rotación mayores y dejando un rango de estudio lo suficientemente amplio para

conocer el desempeño de los aerogeneradores; pero disminuyendo el costo computacional al procesar las simulaciones.

Se realizan las simulaciones para las variables seteadas y se obtienen los primeros resultados del coeficiente de potencia y torque en función de la relación de velocidad de punta (λ). En la **Figura 3-18** se presentan los resultados para el modelo anterior y en la **Figura 3-19** se ven los resultados para el modelo nuevo.

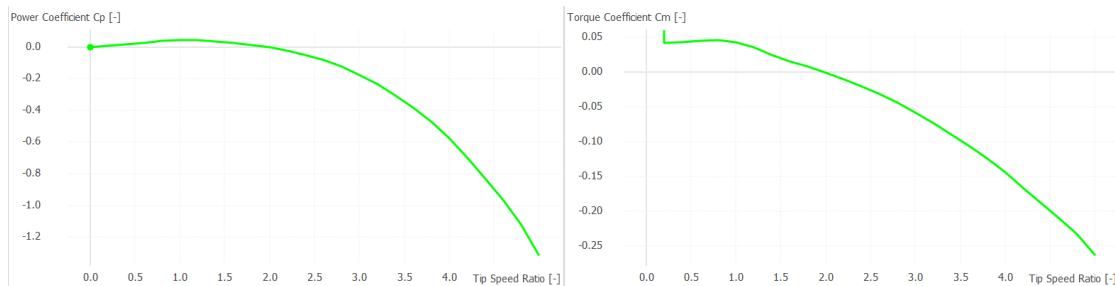


Figura 3-18 – Resultados del modelo anterior en “Rotor BEM”

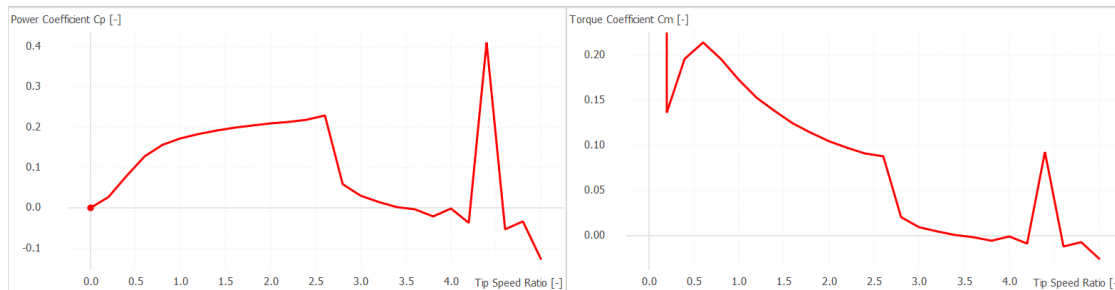


Figura 3-19 – Resultados del modelo nuevo en “Rotor BEM”

Si bien el análisis de resultados del proyecto se realiza en la sección “**Conclusiones**”, se realiza un análisis parcial de lo obtenido hasta el momento. En este análisis parcial, es posible destacar algunas diferencias.

Por un lado, se nota que el modelo anterior tiene un coeficiente de potencia y torque cercano a 0, aún en su máximo cercano a $\lambda = 0.6$ y con el aumento de esta variable, el coeficiente pasa a ser negativo.

Por otro lado, se puede notar una mejora con el nuevo modelo. Si bien ya son notables las pérdidas al ser el coeficiente de potencia cercano a 0.25, es posible generar potencia con el nuevo modelo.

Luego, trabajando en el mismo módulo en “*Multi-parameter BEM Simulation*” se obtienen los valores reales de potencia, torque y empuje (*Thrust*) en función de la velocidad del viento, el ángulo de rotación del aspa y la velocidad de giro del rotor.

Para simplificar el análisis, se consideran la velocidad del aire constante ($10 \frac{m}{s}$) y la velocidad de giro también constante en el máximo alcanzable por el proyecto anterior para poder realizar una comparación fiable (125 rpm), dejando como única variable la rotación del aspa. Como rango se trabaja desde 0 a 30 grados, ya que, el rango normal de ángulo de ataque para los aerogeneradores antes de alcanzar la separación de la capa límite, y por lo tanto evitar el fenómeno de *stall*, suele estar entre 3 y 10 grados. Con 30 grados, se considera rango suficiente para poder ver esta evolución y el efecto del fenómeno de *stall*.

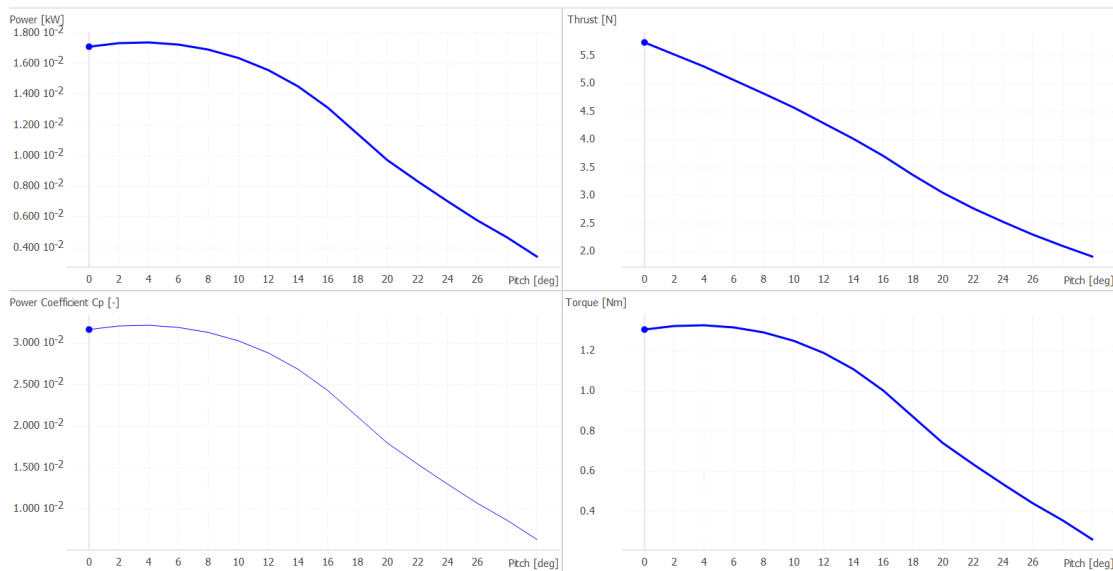


Figura 3-20 – Resultados del “*Multi-parameter BEM Simulation*” para modelo el anterior

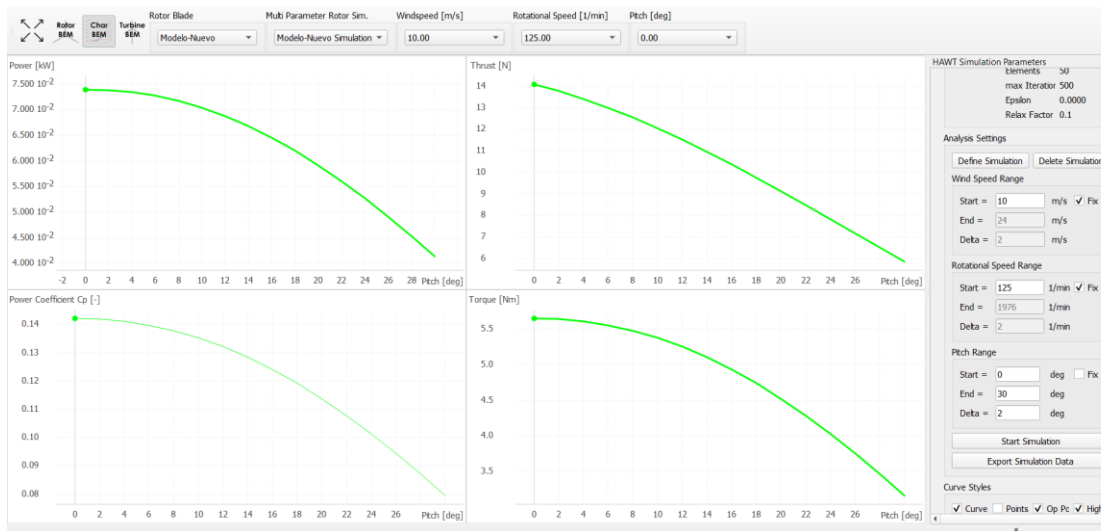


Figura 3-21 – Resultados del “Multi-parameter BEM Simulation” para el modelo nuevo

Estos resultados parciales demuestran que, el modelo anterior podrá generar como máximo 17 Watt de potencia, mientras que el nuevo modelo ronda los 75 Watt de potencia. Esta diferencia también es apreciable tanto en el torque como en el empuje. Y todos los valores caen al variar el ángulo de incidencia de las aspas y su pendiente aumenta notablemente a partir de los 10 grados.

Es importante notar que, ya en las simulaciones podemos notar una perdida mayor al 50% de la potencia de diseño. Lo cual concuerda con la disminución del coeficiente de potencia, disminuyendo del 60% al 25%.

A pesar de las pérdidas de potencia, estos resultados demuestran que el nuevo modelo de aspas presenta una notable mejora respecto del anterior y justifica su fabricación y posterior testeo.

4 Programación en Arduino y Python

Como parte del proyecto se realizaron dos programas, uno en Arduino y el otro en Python. El programa en Arduino es el encargado de comunicarse con los distintos sensores y servomotores del aerogenerador. Para comunicar al usuario que trabajará con el programa de Arduino y controlar el aerogenerador se utilizará el programa en Python.

En esta sección, se explica el funcionamiento de los principales programas y funciones realizadas en los programas mencionados. Para analizar los mismos con mayor detalle se recomienda acceder a los archivos mediante el hipervínculo en el anexo “**Documentos Finales**”

4.1 Arduino

Mediante el programa de Arduino, se realizan las siguientes funciones:

- Control del ángulo de ataque
- Control del freno hidráulico
- Freno de emergencia
- Cálculo de potencia

Además, se realiza una función de coordinación de tiempos para que ambos programas funcionen correctamente y una función de reinicio de contador.

4.1.1 Coordinación

Antes de que comience el programa principal, se ejecuta un programa de coordinación temporal entre Arduino y Python. Para asegurar el correcto funcionamiento se ejecuta una estructura de “*Handshake*” con Python. Esta estructura se ejecuta nuevamente en algunas de las funciones mencionadas, para entender cómo funciona la estructura se detalla en conjunto con un ejemplo en el anexo “**Estructura de “Handshake”**”.

4.1.2 Control del ángulo de ataque

Para controlar el ángulo de ataque se acciona el servomotor lineal mencionado en la sección “**Rotor**”.

Para ejecutar el servomotor lineal, es necesario setear un valor entre 1000 y 2000, siendo 1000 la posición extrema retraída y 2000 la posición extrema saliente. Este valor es enviado por el programa en Python en función del ángulo deseado y seteado por el usuario. Esta función se comunica con el programa de Python mediante el método de *“Handshake”*.

4.1.3 Control del freno mecánico

Para controlar el accionamiento del freno hidráulico mencionado en la sección **“Freno mecánico de disco”**.

En este caso se controla un servomotor de rotación limitada. Para esto, es necesario setear un valor entre 0 y 180. Este valor es enviado por el programa en Python en función del porcentaje que se desea aplicar el freno. Esta función se comunica con el programa de Python mediante el método de *“Handshake”*.

4.1.4 Cálculo de potencia

Esta función se compone de obtener la velocidad de rotación del aerogenerador y obtener el momento aplicado. Se setea una frecuencia arbitraria en Python que llama a la función y ejecuta la estructura de *“Handshake”*.

Por un lado, de manera constante el sensor hall se activa por cada vuelta realizada y se registra en un contador. Cuando se llama a la función se registra en una variable el valor del contador en ese momento y se envía el dato a Python.

Por otro lado, cuando se llama a la función se registra en otra variable el valor leído por el medidor de momento en ese instante. El medidor de momento obtiene un valor digital. Para conocer la equivalencia del valor digital leído y obtener el valor en Newton-metro, fue necesario realizar una conversión del momento digital al momento en Newton-metro.

El rango de medición de par es de 0 a 20 Nm y la entrada analógica de Arduino tiene 10 bits, es decir, 0-1023. Aplicando entonces una regla de tres directa obtenemos la siguiente relación:

$$\text{Momento [Nm]} = \text{Momento [Digital]} * \frac{20}{1023} \quad (4.1)$$

Sin embargo, esto es cierto solo en el contexto de una señal lineal donde 0 corresponde a 0 Nm y 1023 corresponde a 20 Nm. Por lo tanto, se verifica que la salida del transductor sea efectivamente lineal en función del torque realizando una calibración.

Para realizar esta calibración, se utilizaron pesas patrón de un peso conocido. El freno se aplica al 100% imposibilitando la rotación del aerogenerador y toda la fuerza aplicada por la pesa se aplique como momento en el aerogenerador. Utilizando un alambre se ata un extremo del alambre a una pesa patrón y el otro extremo al extremo de una de las aspas. Se plasma la **Figura 4-1** a modo de ejemplo, y no fue parte de la calibración real (puede notarse por la posición de la pesa). Figura 4-1 - Calibración



Figura 4-1 - Calibración

Se envían ambos datos (velocidad de giro y torque) al programa de Python para terminar de realizar el cálculo de potencia. Una vez terminado esto, se llama a la función de reinicio del contador. Ambas funciones trabajan con la estructura de “*Handshake*”.

4.1.5 Freno de emergencia

Esta función hace que el freno magnético desarrollado en la sección “**Freno Magnético**” se active cortando el suministro de energía. Esta función también trabaja con la estructura de “*Handshake*”.

4.2 Python

Como se menciona anteriormente, se crea un programa en Python con tal de poder controlar el funcionamiento del aerogenerador haciendo uso de una interfaz gráfica. El programa consta de una función principal llamada “controlar_programa” la cual abarca tres funciones:

- “esperar_inicialización_completa”
- “ventana_principal”
- “calcular_potencia”

Una vez que se inicia el programa y se ejecuta “controlar programa”, se realiza la sincronización mencionada anteriormente en la sección “**Coordinación**”. Luego, se ejecuta la interfaz gráfica y se ejecuta la función “calcular_potencia” en paralelo mediante el uso de hilos. “Calcular_potencia” se ejecuta cada 60 segundos, este tiempo de ejecución es arbitrario.

Una vez que la “ventana_principal” (**Figura 4-2**) se ejecuta, esta queda visible y utilizable hasta que el usuario lo decida. Esta ventana cuenta con tres recuadros donde se presenta al usuario la velocidad de giro, el momento y la potencia generada. Se presenta una barra desplazable para controlar el ángulo de ataque de la turbina, y una barra desplazable para controlar el freno hidráulico. Finalmente, se agregan tres botones. Uno de ellos, es responsable del freno de emergencia, el otro de guardar los valores que se presentan en la interfaz gráfica y el último finaliza el programa.

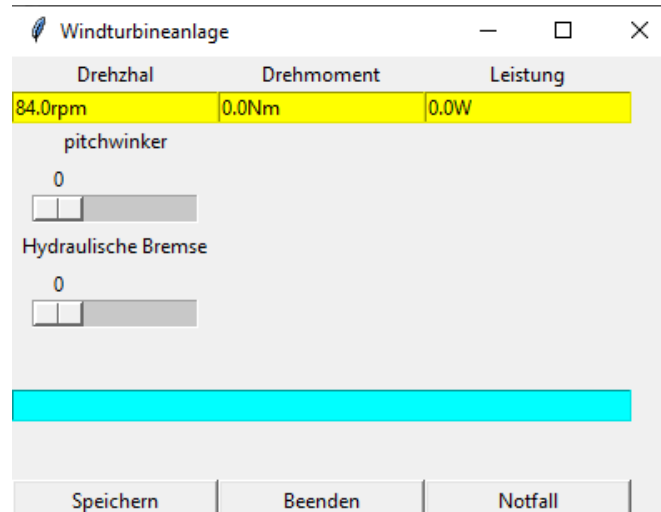


Figura 4-2 – Interfaz gráfica

4.2.1 Cálculo de potencia

Como se menciona anteriormente, la función “calcular_potencia” se ejecuta cada minuto, esta función le solicita al programa en Arduino los valores de las variables “rpm” y “Momento [Nm]”. Una vez que el programa recibe estos datos, realiza el cálculo de potencia:

$$P[W] = \text{Momento [Nm]} * N[rpm] * \frac{2 * \pi}{60} \quad (4.2)$$

Una vez que se realiza el cálculo, se actualiza la interfaz gráfica en Python, presentando en 3 recuadros distintos los valores de torque, revoluciones por minuto y potencia obtenidos. Además, se envía las señales correspondientes a Arduino para reiniciar el contador de vueltas. Esta función se comunica con Arduino mediante la estructura de “Handshake”.

Drehzahl	Drehmoment	Leistung
84.0rpm	0.0Nm	0.0W

Figura 4-3 – Recuadros de velocidad de giro, momento y potencia

4.2.2 Control del ángulo de ataque

El usuario puede controlar el ángulo de ataque mediante el uso de la barra desplazable bajo el nombre de “*pitchwinker*”. El rango de valores de la barra desplazable en la interfaz gráfica va de 0 a 180, haciendo referencia a los grados de rotación posibles de las aspas. La barra se acciona una vez que el usuario deja de accionar la misma y la libera en el valor deseado. Una vez que la barra se libera, se ejecuta la función “*pitchwinker_release*”.

Esta función, toma el valor seleccionado entre 0 y 180 grados y lo convierte a un valor entre 1000 y 2000, para que este sea enviado a Arduino y accione el servomotor lineal. Esta función también se comunica con Arduino mediante la estructura de “*Handshake*”.

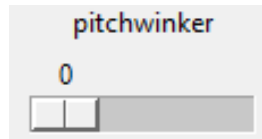


Figura 4-4 – Barra desplazable para control de ángulo de ataque

4.2.3 Control del freno hidráulico

El control del freno hidráulico es análogo al control del ángulo de ataque. Mediante el accionamiento de una barra desplazable el usuario tiene la posibilidad de seleccionar porcentualmente el accionar del freno. El rango de valores posibles a seleccionar es de 0 a 100. Una vez que el usuario suelta la barra desplazable en el valor deseado, se ejecuta la función “*h_bremse_release*” que toma el valor seleccionado por el usuario y lo convierte a un valor legible por el servomotor de rotación limitada en Arduino. La comunicación con Arduino también presenta una estructura de “*Handshake*”

Sin embargo, en este caso fue necesario limitar manualmente los posibles valores que se desean transferir a Arduino. En lugar de transformarlo de 0 a 180 cómo es posible, el rango seleccionado fue de 130 a 180.

Cuando el valor es 180, el freno presenta un accionar del 0% de su capacidad, es decir, no actúa. Manualmente, se disminuye el valor de 180 hasta encontrar el valor extremo donde el freno este accionado al 100%, que en este caso es 130. La razón para limitar este rango de valores es que si el valor enviado es menor a 130 (supongamos un valor

de 0), el servomotor intentará realizar una fuerza significativamente mayor para alcanzar esta posición. A pesar de esto, la limitación física del freno causará que el servomotor no pueda desplazarse y se generen sobrecargas en el mismo que pueden llegar a romperlo.

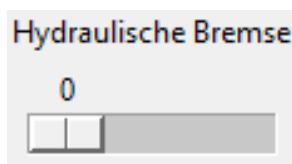


Figura 4-5 – Barra desplazable para el control del freno mecánico

4.2.4 Guardar datos

El pulsador que se encuentra en el extremo izquierdo, en el área inferior de la interfaz gráfica bajo el nombre de “*Speichern*” es la encargada de guardar los datos que se presentan en ese momento.

Speichern

Figura 4-6 – Boton de guardado de datos

Se guarda el valor de las 5 variables mencionadas anteriormente (revoluciones por minuto, torque, potencia, ángulo de ataque y freno hidráulico) y se guarda el momento en el cual se realiza el guardado, en un archivo CSV generado por Python. Mientras el programa se ejecute, se guardan los datos en filas sucesivas por cada ejecución del pulsador. Se muestra un ejemplo a continuación del archivo CSV ya cargado en una planilla de cálculo (Excel en este caso particular):

Drehzahl	Drehmoment	Leistung	Pitchwinkel	Hydraulische Bremse	Zeitpunkt
0.0	0.0	0	85	32	22/03/2024 11:14
92.0rpm	0.0Nm	0.0W	0	0	28/03/2024 15:53
67.0rpm	0.1Nm	0.7W	0	50	28/03/2024 15:57
0.0rpm	0.39Nm	0.0W	0	74	28/03/2024 16:00
103.0rpm	0.0Nm	0.0W	87	0	28/03/2024 16:05
61.0rpm	0.02Nm	0.122W	180	0	28/03/2024 16:09
124.0rpm	0.1Nm	1.3W	90	50	28/03/2024 16:12
70.0rpm	0.76Nm	5.57W	90	75	28/03/2024 16:16
144.0rpm	0.0Nm	0.0W	90	0	28/03/2024 16:25
63.0rpm	0.29Nm	1.91W	93	75	28/03/2024 16:32
114.0rpm	0.08Nm	0.95W	90	0	28/03/2024 17:06
42.0rpm	0.88Nm	3.87W	90	65	28/03/2024 17:28

Figura 4-7 – Ejemplo de guardado de datos en archivo CSV y presentado en Excel

4.2.5 Finalización del programa

A la derecha del pulsador de guardado, se encuentra otro pulsador bajo el nombre de “*Beenden*” y se utiliza para finalizar el programa.

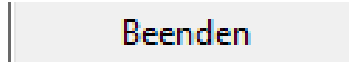


Figura 4-8 – Boton de finalización del programa

4.2.6 Parada de emergencia

El ultimo pulsador, ubicado en el extremo derecho bajo el nombre “*Notfall*” es el encargado de activar la parada de emergencia, y enviar la señal a Arduino para accionar el freno magnético. La comunicación con Arduino también se realiza bajo la estructura de “*Handshake*”.



Figura 4-9 – Boton de parada de emergencia

5 Testeo

Una vez que el aerogenerador fue montado y los programas funcionaban correctamente, se coloca el aerogenerador en posición para realizar los testeos. Se traslada del taller donde se encuentra el canal de viento. Este se posiciona a 3 metros de la salida de aire del canal de viento como se puede apreciar en la **Figura 5-1**.



Figura 5-1 – Testeo del aerogenerador en tunel de viento

Como se puede visualizar en la **Figura 5-1** en color azul, se coloca un anemómetro para conocer la velocidad real del viento que llega a la turbina. En la siguiente imagen se aprecia una lectura del anemómetro a modo de ejemplo.



Figura 5-2 – Control del anemómetro

Se controla el funcionamiento del túnel de viento mediante el uso del Software propio. A continuación, se presenta el interfaz grafico para el control de este.

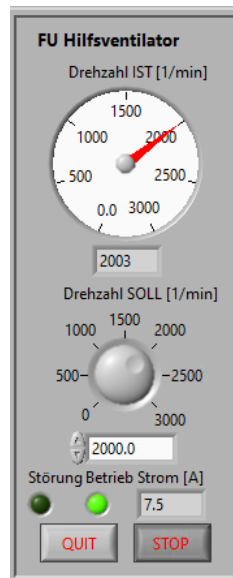


Figura 5-3 – Interfaz gráfica para el control del túnel de viento

Para poder hacer uso del túnel de viento es necesario y obligatorio hacer uso de los elementos de protección personal en todo momento. En este caso, se trata de anteojos de seguridad y protectores auditivos como los que se muestran en la **Figura 5-4**. Ambos elementos son facilitados por el instituto.



Figura 5-4 – Elementos de protección personal

Se realizaron numerosos testeos con el túnel de viento trabajando a 2000 y 3000 revoluciones. Como se mencionó anteriormente, no se pudieron testear los nuevos modelos de aspas debido a fallas en la fabricación de estas. Los resultados más importantes del testeo se plasman y analizan en la próxima sección.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este apartado, se plasman los resultados de los testeos realizados sobre el dispositivo y las conclusiones obtenidas luego de contrastarlos con los objetivos plasmados al iniciar el proyecto.

Analizando los resultados directos obtenidos de los testeos, los cuales ya fueron presentados en la **Figura 4-7**, podemos concluir lo siguiente. Como era de esperarse, la potencia generada por el primer modelo de turbina es muy baja. Se le atribuye el mal rendimiento al modelo de las aspas y a la falta de control sobre el ángulo de ataque.

Basándonos en los resultados de la simulación en la sección “**Simulaciones**”, se puede esperar un mejor rendimiento en el nuevo modelo del aerogenerador. Es importante remarcar que, si bien para el modelo anterior se esperaba una potencia de 17 Watt, esto era para un ángulo específico, el cual no podemos asegurar con el mecanismo actual. Además, al llevar a la realidad el modelo eran esperables mayores pérdidas de potencia. Estas pérdidas de potencia al llevar el modelo a la realidad también son esperables para el nuevo modelo, y en consecuencia obtener una potencia menor a los 70 Watt obtenidos en la simulación. Sin embargo, debido a estos resultados; se espera que pueda generar una potencia suficientemente útil para realizar demostraciones durante el desarrollo de ejercicios prácticos en la clase. Lo cual es el objetivo principal del proyecto.

En aspectos generales, el nuevo aerogenerador funciona. Esto quiere decir que, al correr el programa, el usuario puede notar que el aerogenerador genera potencia y el dispositivo responde bien ante las intervenciones deseadas por el operador. Ya sea cambiar el ángulo de ataque o accionar los frenos. Sin embargo, también se presentaron resultados desfavorables sobre los cuales es necesario trabajar.

En cuanto al funcionamiento de los programas de control en Arduino y Python, esporádicamente se presentan fallas que requieren el reinicio de este. Si se ejecutan dos funciones al mismo tiempo, (por ejemplo, variar el ángulo de ataque y porcentaje de accionamiento del freno seguidos sin esperar a la modificación sobre el dispositivo) se sobrecarga el puerto de comunicación de Arduino y provoca fallas en la comunicación. Lo

mismo sucede, si se ejecuta alguna función mientras se esté ejecutando en paralelo el cálculo de potencia. Si bien se estimó que este error se evitaría al trabajar con hilos en Python, Arduino no puede trabajar con dos tareas en paralelo y en consecuencia, presenta las fallas mencionadas. Por esta razón, cuando se trabaje con el programa se debe tener precaución con estas situaciones y se debe asegurar que al modificar las variables, no se ejecuten dos funciones en paralelo.

Además, otro problema que presenta la programación se origina al utilizar la estructura de “*handshake*” para la comunicación entre ambos Software. La transferencia de mensajes entre ambas no siempre es instantánea y requiere de numerosos intentos. Los tiempos de espera del “*handshake*” son aleatorios y pueden ocasionar retrasos en las mediciones, afectando a la precisión de los resultados. Por ejemplo, si durante el cálculo de potencia esta comunicación es lo suficientemente lenta, no se realizará a los 60 segundos sino a los 62 segundos. Provocando que durante esos 2 segundos el contador de vueltas siga aumentando y afecte posteriormente a la variable “rpm” (en lugar de trabajar con la cantidad de vueltas realizadas en 60 segundos, trabajará con la cantidad de vueltas realizadas en 62 segundos, por lo que tendremos un exceso de vueltas).

Con respecto al sistema mecánico, la rotación de las aspas no es precisa. Como se mencionó anteriormente (sección “**Rotor**”) el sistema de biela-manivela provoca una rotación en el lugar que no se transfiere a las aspas. Esto hace imposible transferir la rotación deseada por el usuario a las aspas por más que la programación sea correcta y el servomotor lineal responsable de este movimiento se desplacé hasta la posición deseada.

Comparando estos resultados con los objetivos propuestos, es posible declarar que, los resultados son favorables y prometedores, pero requieren de continuar trabajando y optimizando el aerogenerador para que sea utilizado en el curso sin problemas.

El aerogenerador ahora genera potencia y es utilizable; y fue posible crear una interfaz gráfica que posibilite al usuario variar las variables de diseño. Es decir, los dos objetivos principales del proyecto fueron logrados.

El proyecto comienza con un aerogenerador que no funcionaba. Como resultado de este trabajo el aerogenerador es funcional, pero presenta sensibilidad a fallos e imprecisiones esporádicas en algunas mediciones y durante el control de las variables; lo que convoca

un nuevo punto de partida. Esto origina nuevos desafíos para continuar trabajando sobre el mismo hasta lograr un programa robusto, confiable y preciso.

6.2 Recomendaciones

Los aspectos sobre los que se recomienda trabajar se pueden separar en aspectos referidos a la programación y a la mecánica.

Por el lado de la programación, se debe encontrar una solución que permita ejecutar varias funciones al mismo tiempo en Python y Arduino y pueda trabajar sin problemas. Luego de haber realizado una investigación, se propone trabajar con “interrupciones” según el orden de prioridad de actuación en Arduino. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo y debido a la falta de conocimientos en esta área no se pudo profundizar la investigación en este aspecto.

En cuanto a las fallas mecánicas en la rotación de las aspas, se recomienda cambiar el sistema presente en el *hub* encargado de este movimiento. Se recomienda reemplazar el sistema de biela-manivela por un sistema de piñón-cremallera. La cremallera se debe mecanizar sobre el eje que se traslada linealmente y el piñón sobre el sistema de vinculación de las aspas. Este problema se descubrió sobre el final de mi estancia en el instituto y la escases de tiempo no permitía fabricar un nuevo *hub*. Por esta razón, se decidió trabajar con el *hub* existente.

Finalmente, se recomienda terminar de fabricar las aspas diseñadas como parte de este proyecto para realizar una comparación con las aspas del proyecto anterior y estudiar así, el efecto de un diseño aerodinámico en las aspas a la generación de energía.

7 Bibliografía

Bauknecht, A., Semaan, R., & Radespiel, R. (2023). *Technology of Wind Turbine Blades*. Braunschweig: Institute of Fluid Mechanics.

Buchner, C. (2020). *Abschließende Konstruktion und Aufbau einer Modellwindenergieanlage inkl. der Steuer- und Regelmöglichkeiten*. Braunschweig: Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen.

Energía, O. L. (16 de Abril de 2024). *OLADE*. Obtenido de <https://www.olade.org/noticias/el-ano-record-de-la-energia-eolica-demuestra-su-crecimiento-segun-gwec/>

Gismondi, A. (17 de Mayo de 2024). *Asociación Argentina de Energía Eólica*. Obtenido de <https://argentinaeolica.org.ar/novedades/que-necesita-argentina-para-impulsar-la-energia-eolica>

Salas, A. T. (2017). *Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.

A. Estructura de “Handshake”

El “Handshake” es un proceso de comunicación en el cual dos programas establecen una conexión sincronizada y confiable antes de intercambiar datos. Este proceso asegura que ambos estén listos y alineados para el envío y recepción de información, evitando errores de comunicación. Para explicar esta estructura se ejemplifica con el código mostrado en la Figura:

```
void loop_hydraulische_bremse() {  
  if (Serial.available() > 0) {  
    String valorOriginal = Serial.readStringUntil('\n');  
    if (valorOriginal.startsWith("HB")) {  
      String valorString = valorOriginal.substring(2);  
      int dataHB = valorString.toInt();  
      if (dataHB >= 0 && dataHB <= 180) {  
        servohb.write(dataHB);  
        Serial.println("ListoHB");  
      }  
    }  
  }  
}
```

Figura 7-1 – Ejemplo de “Handshake” en Arduino

```
def h_bremse_release(scale):  
    global bandera  
    if bandera == 1:  
        hb = scale.get()  
        valor_nuevo_hb = str(int(mapear_valor(hb, (0, 100), (180, 130))))  
        threading.Thread(target=enviar_h_bremse, args=(valor_nuevo_hb,)).start()  
  
def enviar_h_bremse(valor_nuevo_hb):  
    banderahb = 0  
    while banderahb == 0:  
        board.write(("HB"+ valor_nuevo_hb + "\n").encode())  
        respuestahb = board.readline().strip()  
        if respuestahb == b"ListoHB":  
            banderahb = 1
```

Figura 7-2 – Ejemplo de “Handshake” en Python

En el código de Python, la función “h_bremse_release” obtiene un valor desde la interfaz gráfica y lo mapea a un rango específico (130 a 180, desarrollado en la sección “**Control del freno mecánico**”) y luego inicia un hilo para enviar el valor a Arduino. Al ejecutar un hilo, en paralelo a la ejecución del código principal se ejecuta la función “enviar_h_bremse”.

Esta función paralela envía el comando formateado “HB + valor + \n” al puerto serie conectado a Arduino (El prefijo “HB” varía según la función a ejecutar). Después entra en un bucle en espera de la respuesta de Arduino.

Arduino al recibir un mensaje en el puerto serie, verifica si el mensaje comienza con “HB”. Si es así, extrae el “valor” después del prefijo “HB”, lo convierte a entero y ajusta el ángulo del servomotor mediante la función “servohb.write(dataHB)”.

Una vez el ángulo se ajusta Arduino envía una confirmación “ListoHB” devuelta a Python (el comando “Listo+Código” varía según la función).

Cuando Python recibe “ListoHB”, finaliza el proceso y el hilo termina su ejecución.

Se sintetiza esta explicación en el siguiente diagrama (**Figura 7-3**):

Python	Arduino
1-Preparar valor (HB+valor)	
2- Enviar al puerto serie: “HB + valor”	3- Leer valor del puerto serie
	4- Validar y procesar el comando
	5- Ajustar servo
7- Leer respuesta “ListoHB” y finalizar hilo	6- Enviar confirmación: “ListoHB”

Figura 7-3 – Diagrama de la estructura “Handshake”

B. Documentos Finales

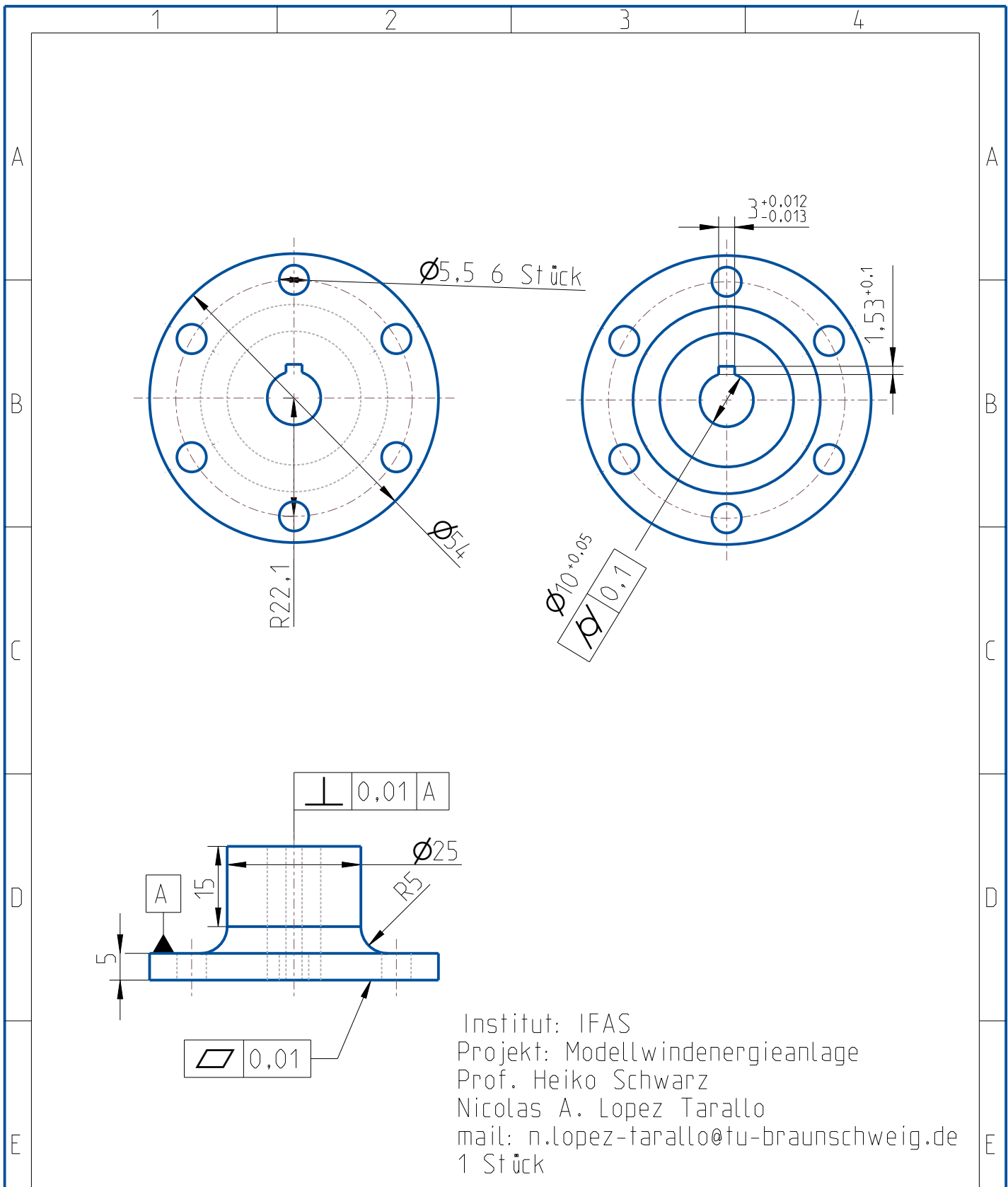
En este anexo se da permiso al lector para visualizar todos los documentos adjuntados como entrega final al Instituto, para que pueda analizar los programas en detalle, visualizar cálculos realizados, visualizar los archivos CAD, resultados del testeo etc.

El lector puede acceder mediante el uso del siguiente hipervínculo:

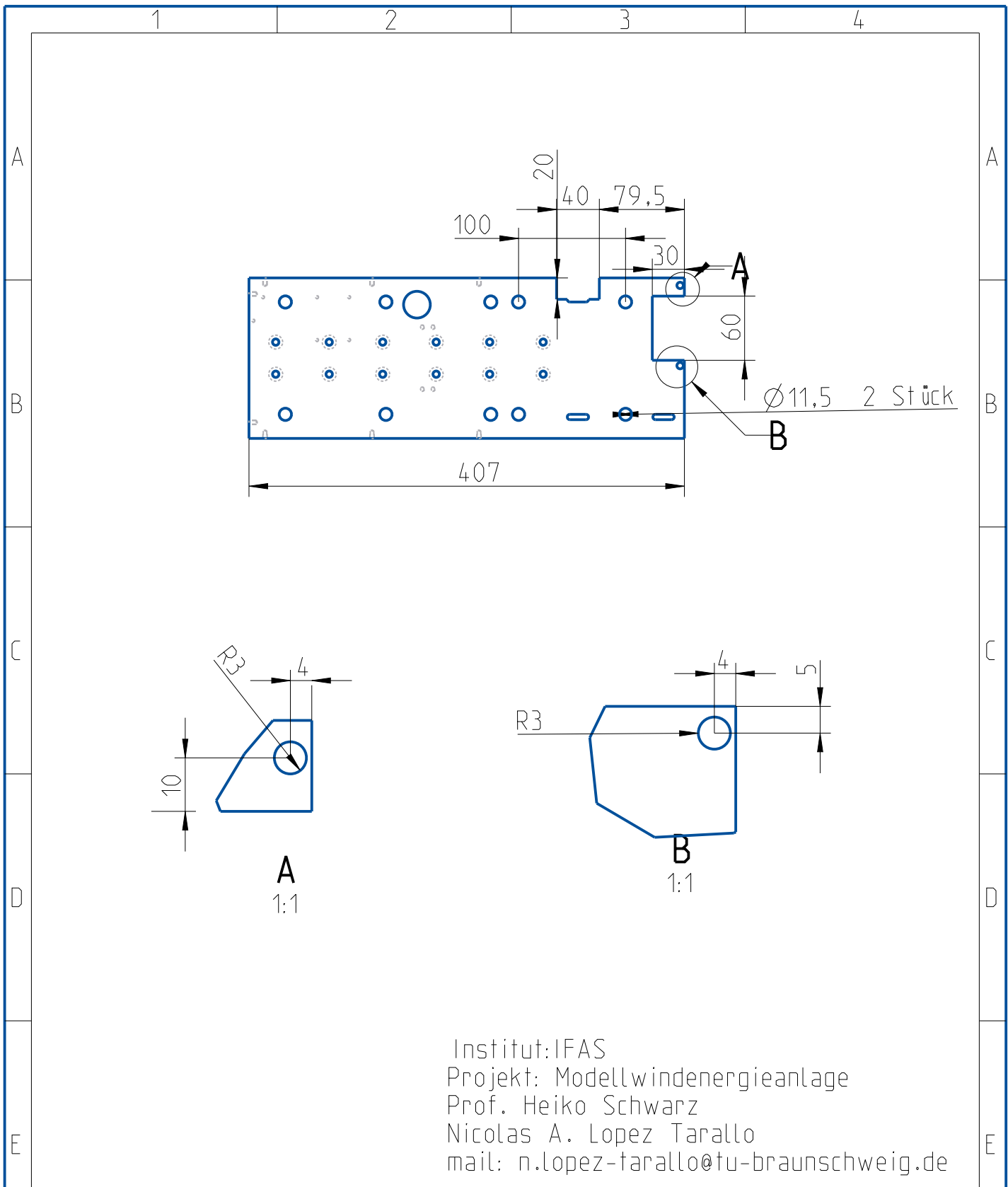
[Carpeta - Entrega Final](#)

C. Planos

A continuación, se adjuntan los planos de los componentes diseñados y fabricados como parte del proyecto. No se incluye los planos del aspa del aerogenerador debido a la falta de conocimiento de como realizar un plano de esta.

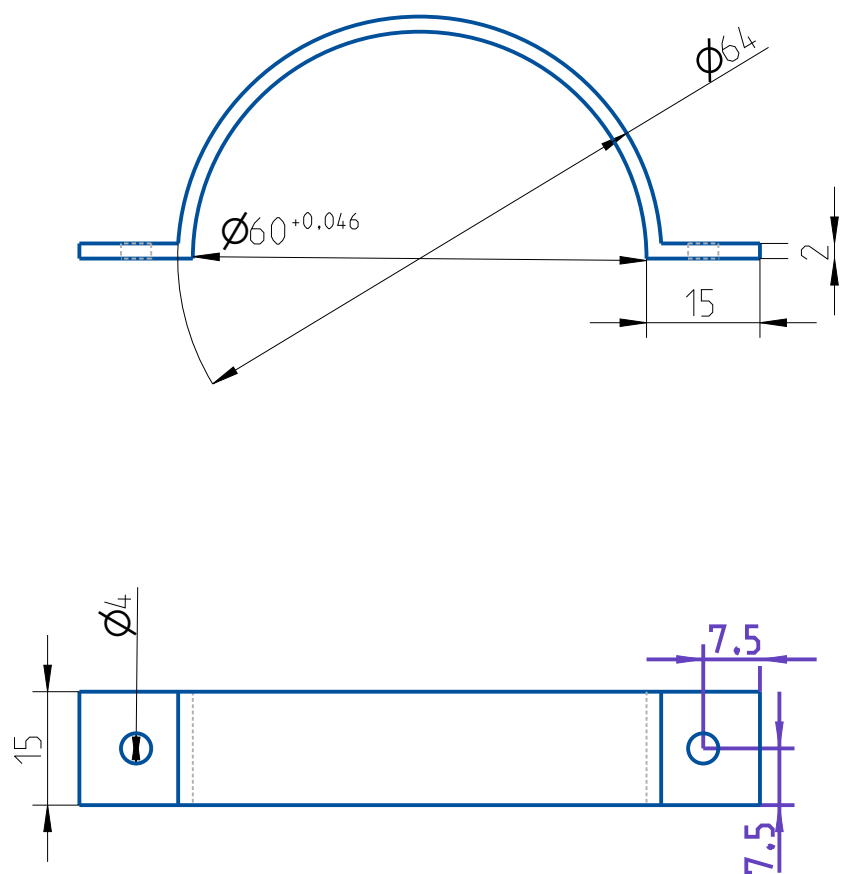


Dateiname des Zeichnungsobjektes: ACHSE-BREMSE				Dateityp: PART		Dateiname der Zeichnung: ACHSE-BREMSE-V01					
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Oberflaeche DIN ISO 1302 Werkst.-Kanten DIN ISO 13715		Maßstab 1:1		Gew.: kg	
								Werkstoff: Stahl Halbzeug:			
					Datum	Name		Benennung: Achse-Bremse-v01			
				Bear.	22.11.23	N.L.Tarallo					
				Gepr.	24.11.23	H. Schwarz					
				Norm							
								Zeichnungsnummer: 2068_004_004			
				IFAS							
Zust.	Änderung	Datum	Nam.	(Urspr.)			(Ers.f.):			(Ers.d.):	
										Blatt 1	
										1 Bl.	



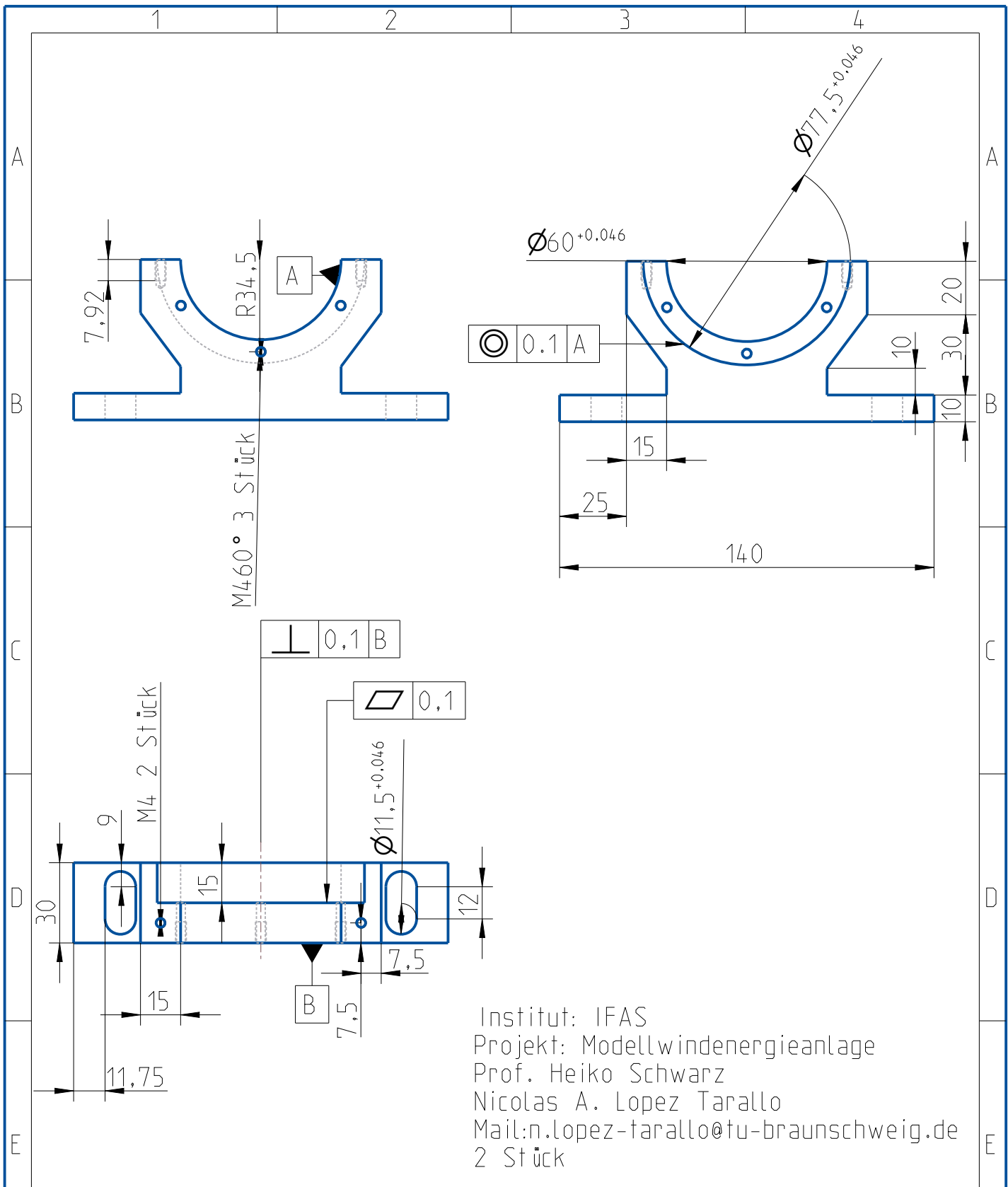
Institut: IFAS
 Projekt: Modellwindenergieanlage
 Prof. Heiko Schwarz
 Nicolas A. Lopez Tarallo
 mail: n.lopez-tarallo@tu-braunschweig.de

Dateiname des Zeichnungsobjektes: GONDELPLATTE					Dateityp: PART		Dateiname der Zeichnung: GONDELPLATTE-V02				
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Oberflaeche DIN ISO 1302 Werkst.-Kanten DIN ISO 13715		Maßstab 1:5		Gew.: kg	
										Werkstoff: Aluminium Halbzeug:	
					Datum		Name		Benennung: Gondelplatte		
				Bear.	28.03.24		N.L.Tarallo				
				Gepr.	28.03.24		H. Schwarz				
				Norm							
									Zeichnungsnummer: 2068_004_001		
				IFAS							
										Blatt 1	
								2068_004_001		1 Bl.	
Zust.		Änderung		Datum		Nam.(Urspr.)		(Ers.f.):		(Ers.d.):	



Institut: IFAS
 Projekt: Modellwindenergieanlage
 Prof. Heiko Schwarz
 Nicolas A. Lopez Tarallo
 mail: n.lopez-tarallo@tu-braunschweig.de
 2 Stück

Dateiname des Zeichnungsobjektes: TOPUNTERSTÜTZUNG				Dateityp: PART		Dateiname der Zeichnung: TOPUNTERSTÜTZUNG							
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Oberfläche DIN ISO 1302 Werkst.-Kanten DIN ISO 13715		Maßstab 1:1		Gew.: kg			
				Werkstoff:Stahl/Aluminium Halbzeug:									
					Datum	Name		Benennung: Top - Unterstüztung -v02					
				Bear.	29.11.23	N.L.Tarallo							
				Gepr.	29.11.23	H.Schwarz							
				Norm									
				IFAS				Zeichnungsnummer: 2068_004_003				Blatt 1	
												1 Bl.	
Zust.		Änderung		Datum		Nam.(Urspr.)		(Ers.f.):				(Ers.d.):	



Institut: IFAS
 Projekt: Modellwindenergieanlage
 Prof. Heiko Schwarz
 Nicolas A. Lopez Tarallo
 Mail: n.lopez-tarallo@tu-braunschweig.de
 2 Stück

Dateiname des Zeichnungsobjektes: UNTERSTÜTZUNG				Dateityp: PART		Dateiname der Zeichnung: UNTERSTÜTZUNG							
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Oberfläche DIN ISO 1302 Werkst.-Kanten DIN ISO 13715		Maßstab 1:2		Gew.: kg			
										Werkstoff: Stahl/Aluminium Halbzeug:			
					Datum	Name		Benennung: Unterstützung					
				Bear.	28.03.2024	N.L.Tarallo							
				Gepr.	28.03.2024	H. Schwarz							
				Norm									
								Zeichnungsnummer: 2068_004_002				Blatt 1	
				IFAS									
Zust.	Änderung	Datum	Nam.	(Urspr.)				(Ers.f.):				(Ers.d.):	



Institut: IFAS
Projekt: Modellwindenergieanlage
Prof. Heiko Schwarz
Nicolas A. Lopez Tarallo
Mail: n.lopez-tarallo@tu-braunschweig.de