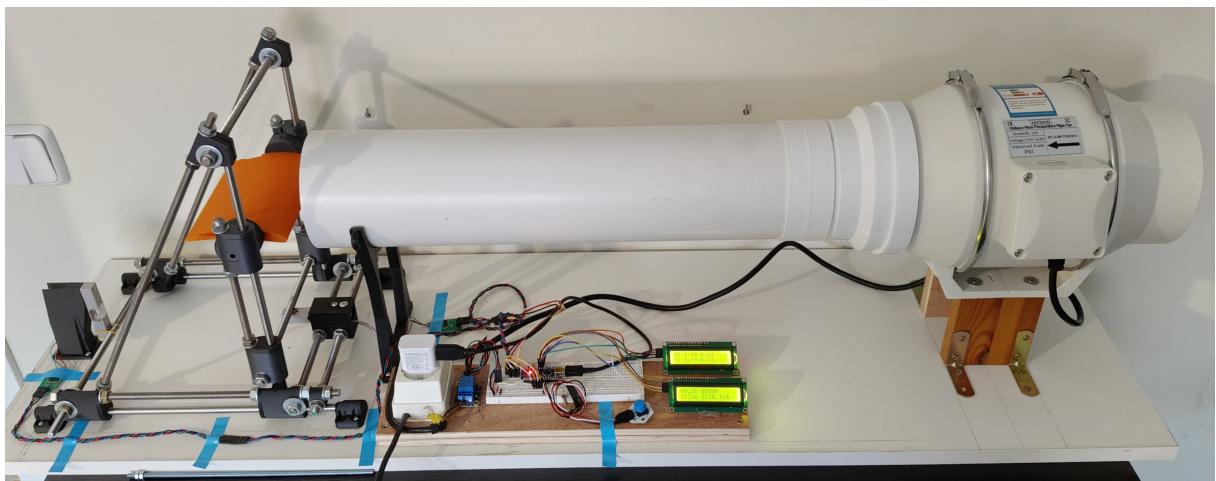


Diseño y construcción de un túnel de viento para perfiles alares

Jorge Palao Núñez

Tutora: Esperanza Rodrigo Masero



Departamento de Física y Química

IES Pintor Antonio López

Tres Cantos, enero 2025

Agradecimientos

A mi tutora, Esperanza por ayudarme y confiar en mí a lo largo del proyecto.

A mis padres por el conocimiento que me han transmitido a lo largo de los años, que me ha permitido hacer este proyecto.

Resumen

El objetivo de este proyecto es crear un dispositivo automatizado, del estilo de un túnel de viento, para analizar la sustentación y la resistencia que generan distintos perfiles alares al estar expuestos a un flujo de aire. Está dirigido por un microcontrolador. El dispositivo es capaz de autocalibrarse, encender y apagar la turbina que genera el flujo de aire, hacer varias pruebas, tomar cientos de medidas de las fuerzas que genera el ala y mostrar los resultados en una primera pantalla que tiene incorporada mientras muestra información crítica en una segunda. La estructura sobre la que está acoplada el perfil alar se mueve libremente en los ejes X e Y con mínima resistencia; esto le permite tomar medidas precisas de la sustentación y resistencia que ejerce; dos celdas de carga, conectadas al microcontrolador, miden estas fuerzas. El proyecto también compara brevemente los resultados de más de una docena de perfiles alares en distintos ángulos de ataque.

Abstract

The goal of this project is to create an automated wind tunnel like device to analyze the lift and drag different airfoils generate when exposed to an airflow. It is run by a microcontroller. With the press of a button the device calibrates itself, turns the turbine that generates the airflow on and off when needed, takes hundreds of measurements of the forces that the wing generates, makes several tests and shows the results on one of two built-in screens, all while displaying live critical data as it is testing the airfoils. The device has a system that allows it to easily interchange wings/airfoils as well as to change the angle of attack. The structure where the wing is placed moves freely in the X and Y axis with minimum friction. This allows it to take precise and accurate measurements of the lift and drag it generates. These forces are measured by two load cells that are connected to the microcontroller. The project also briefly compares the result of over a dozen airfoils at different angles of attack.

Índice general

1. Introducción	1
2. Descripción del dispositivo	2
3. Alas y perfiles NACA de cuatro dígitos	4
3.1. Cómo calcular un perfil NACA de cuatro dígitos	4
3.2. Cómo crear un perfil NACA de cuatro dígitos	5
4. Impresión 3D	7
4.1. Impresoras 3D	7
4.2. Materiales de impresión	9
4.3. Filamentos elegidos	10
5. Construcción del dispositivo	11
5.1. Elementos estructurales	11
5.1.1. Opciones de construcción	11
5.1.2. Construcción final	12
5.1.3. Problemas en la construcción	13
5.2. Electrónica	14
5.3. Programación	16
6. Conclusiones	17
6.1. Trabajo futuro	18
A. Anexos	19
A.1. Ensamblado progresivo del dispositivo	19
A.2. El primer prototipo operativo	20
A.3. Catálogo de diseños de piezas	21
A.4. Perfiles alares probados	22
A.5. Fallos de electrónica	22
A.6. Fallos de impresión y diseño	23
A.7. Código de OpenSCAD para generar perfiles NACA	24
A.8. Código para controlar el Arduino	26
A.9. Proceso de construcción	29
Índice de figuras	32
Bibliografía	33

1. Introducción

Cuando se analiza el comportamiento dinámico de un avión, los dos parámetros más significativos son la sustentación y la resistencia de sus alas.

Hoy en día, a nivel divulgativo, hay cierto desacuerdo sobre el principio físico que explica de la sustentación de las alas. Las teorías más comunes se basan en alguno de los dos siguientes efectos:

- La forma del ala fuerza que el aire fluya más rápidamente por su parte superior. Esto, según el Principio de Bernoulli,¹ produce una zona de baja presión. La diferencia entre presiones hace que el ala experimente una fuerza ascendente (sustentación).
- La otra teoría indica que la forma del ala redirige el flujo de aire hacia abajo. Por la Tercera Ley de Newton (toda acción tiene una reacción igual contraria), el ala experimenta una fuerza ascendente.

Al intentar indagar más en estas teorías me enfrenté a mucha matemática y física demasiado compleja que excedía mi nivel de conocimiento. La resistencia aerodinámica es un tema igualmente complejo. Esto no es un inconveniente para este proyecto ya que su objetivo no es hacer un estudio teórico del comportamiento de las alas, ni hacer simulaciones basadas en dichas teorías, sino construir un dispositivo para poder analizar de forma experimental estas dos fuerzas en cualquier perfil alar para distintos ángulos de ataque (ángulo entre el ala y la dirección del movimiento). El resultado final puede verse en la figura 1.1.

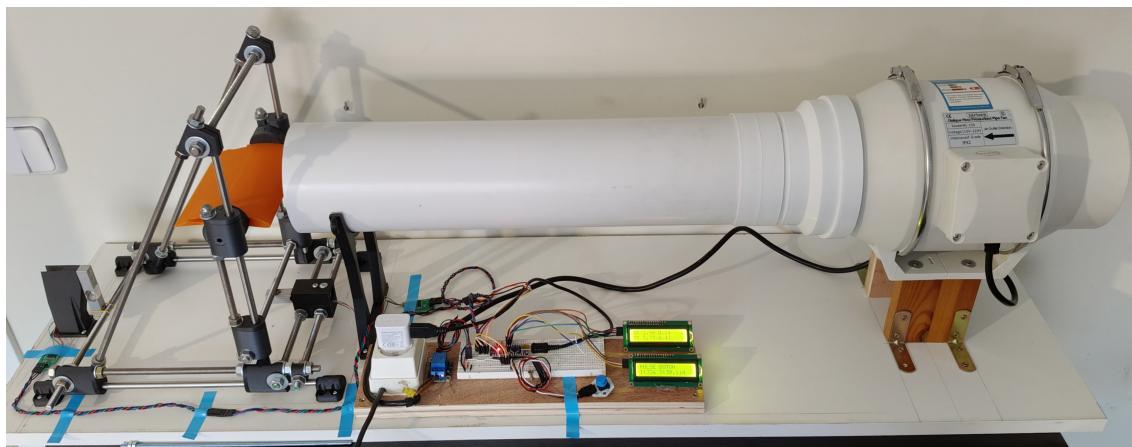


Figura 1.1.: Túnel de viento construido en este proyecto

Este es un proyecto constructivo y experimental, que ha nacido de mi largo interés en la técnica aeroespacial y he podido completarlo gracias a diversas habilidades que he ido adquiriendo en los últimos años.

¹El Principio de Bernoulli, en una forma simplificada, dice que la suma de energías cinética, potencial e interna se mantiene constante en un fluido.

2. Descripción del dispositivo

El objetivo de este proyecto es construir un *túnel de viento abierto* para medir la fuerza de sustentación y de resistencia aerodinámica de un perfil alar. Debe permitir cambiar fácilmente los perfiles y elegir el ángulo de ataque. La toma de las medidas debe estar automatizada en la medida de lo posible. La figura 2.1 es un boceto del dispositivo en cuestión.

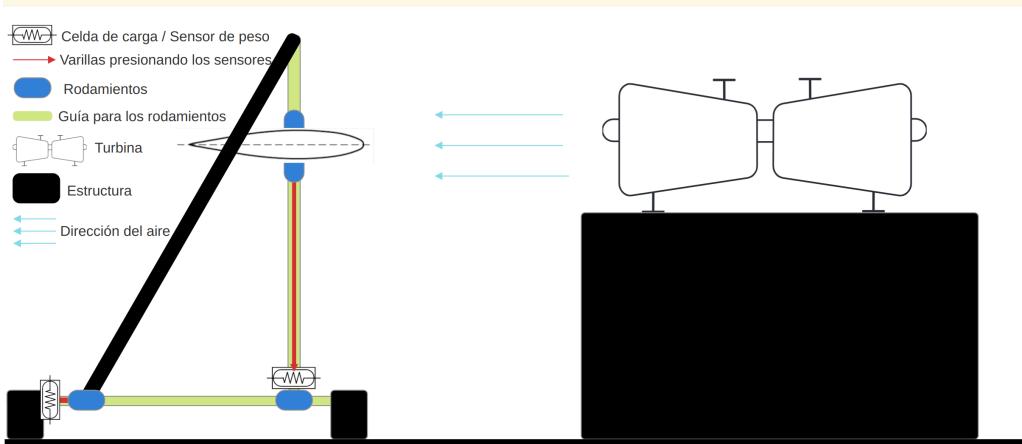


Figura 2.1.: Boceto del dispositivo

Cuando un avión está volando, sus alas en movimiento se enfrentan a una masa de aire esencialmente estática. En un túnel de viento, el ala está fijada a una estructura estática y, para conservar el movimiento relativo, se necesita un flujo de aire dirigido hacia el ala a una velocidad constante. Para ello se utilizará una turbina que genere dicho flujo de aire.

Como la sustentación es una fuerza vertical y la resistencia una horizontal, el ala debe ir fijada a un *chasis* que admita movimiento libre en ambos ejes, con la dificultad añadida de que no debe haber interferencia entre ellos y el rozamiento debe ser el mínimo posible. Es la estructura triangular que puede observarse en la parte izquierda de la figura 2.1. Para poder medir ambas fuerzas es necesario instalar un sensor en cada eje.

Para automatizar el funcionamiento del dispositivo, es necesario un programa que se ejecuta en un microcontrolador. Se encarga de arrancar y parar la turbina, y de tomar las medidas de los sensores.

Tras instalar un perfil alar con el ángulo de ataque deseado, el proceso de medida se inicia con la simple pulsación de un botón. El programa detecta esta pulsación y pasa a tarar los sensores. Luego arranca la turbina y espera a que ésta alcance una velocidad de trabajo estable. Tras varios segundos de tomar medidas en ambos ejes, apaga la turbina y muestra en una pantalla la media y la desviación típica de las fuerzas detectadas. Este proceso se repite varias veces para promediar los errores en el funcionamiento del dispositivo.

Para que el operador sepa el estado de avance de una prueba, una segunda pantalla muestra información operativa: la fase en la que se encuentra el dispositivo, el tiempo invertido en esa fase y el número de medidas tomadas.

La parte más complicada y laboriosa de este túnel de viento ha sido el diseño y construcción del chasis que soporta el ala. Los requisitos funcionales son múltiples: que se mueva en 2 ejes con una resistencia mínima, que mida fuerzas en ambos ejes sin que haya interferencias entre ellas, que sea estructuralmente rígido, y que se puedan intercambiar las alas y configurar su ángulo de ataque fácilmente.

El chasis de la solución final, parcialmente despiezado, puede verse en la figura 2.2. Este chasis tiene



Figura 2.2.: Chasis desensamblado

un *carro principal* en forma triangular que se instala en unas guías cilíndricas en las que corre libremente de forma horizontal gracias a unos rodamientos lineales (ver figura 5.1). En un extremo de las guías horizontales hay un sensor de presión que mide la fuerza que ejerce el carro cuando toca con él como consecuencia del empuje del aire, causado por la resistencia aerodinámica. En el extremo derecho de la figura 2.2 puede verse el sensor de presión horizontal, precedido de las guías horizontales; en el centro está el carro principal. Todo esto resuelve el movimiento horizontal. Para el movimiento vertical hay una solución similar, que consta de un *subcarro vertical* que se desliza sobre una guías cilíndricas verticales situadas en el carro principal. En este subcarro se anclan los perfiles alares y se determina su ángulo de ataque. El subcarro apoya en el sensor que mide la fuerza vertical, causada por la sustentación. En el extremo izquierdo de la figura 2.2 puede verse un perfil alar con los engranajes que determinan el ángulo de ataque. Lo sigue el subcarro vertical, que se instala con rodamientos lineales en las 2 guías del cateto izquierdo el carro principal.

En el anexo A.1 puede verse una secuencia fotográfica del ensamblado progresivo de estos componentes. Adicionalmente, en el anexo A.2 se puede ver un prototipo inicial, que carecía de muchas de las características enumeradas anteriormente.

La solución de los rodamientos lineales deslizándose en guías cilíndricas está inspirada en una impresora 3D que tuve hace 6 años. Salvo esta idea, todo el dispositivo, tanto la parte estructural, como la electrónica, la programación y el modelado 3D son de mi propia creación. Igualmente, todas las imágenes, fotografías y tablas de ese documento han sido creadas por mí.

3. Alas y perfiles NACA de cuatro dígitos

He hecho pruebas con varios perfiles alares, que pueden dividirse en 2 grupos: alas inventadas por mí a base de formas geométricas simples, y perfiles alares NACA.

NACA son las siglas de National Advisory Committee for Aeronautics, Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica en castellano. Esta agencia fue formada en 1915 por el Gobierno Federal de los Estados Unidos de América para institucionalizar las investigaciones aeronáuticas. En 1958 el gobierno disolvió la agencia y trasladó sus recursos a la NASA. En la década de 1930, NACA introdujo una familia paramétrica de perfiles alares conocidos como "perfiles aerodinámicos NACA de cuatro dígitos" (en inglés, Four Digit NACA). Estos perfiles alares hoy en día solo aparecen en algunos aviones pequeños para aficionados pero se siguen usando como base para las alas de grandes aviones comerciales.

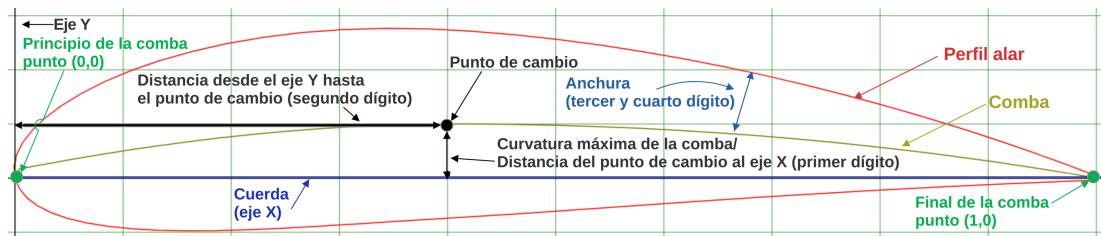


Figura 3.1.: NACA 5418, con sus elementos anotados

En la figura 3.1 puede observarse la estructura de un perfil NACA. Las partes principales de estos perfiles son la *comba*, la *cuerda* y la *anchura*, que se definen como:

- La *comba* es la línea, normalmente curva, que pasa por el centro del perfil alar.
- La *cuerda* es la línea recta que une el principio y el final de la comba. El ángulo que forma la cuerda con la dirección del viento es lo que se conoce como *ángulo de ataque*.
- La *anchura* es la distancia que hay entre la comba y cualquiera de los dos lados del perfil alar. Esta distancia se mide en una recta perpendicular a la pendiente de la comba en cada punto.

Los cuatro dígitos a los que se hace referencia en su nombre actúan como parámetros que condicionan la forma de la comba y la anchura. En la siguiente sección se verá cómo extraer los parámetros de los cuatro dígitos y qué lugar ocupan en las ecuaciones que definen comba y anchura.

3.1. Cómo calcular un perfil NACA de cuatro dígitos

Para definir la *comba* se utiliza la siguiente función:

$$y_c = \begin{cases} \frac{M}{P^2}(2Px - x^2), & \text{si } 0 \leq x \leq P \\ \frac{M}{(1-P)^2}(1 - 2P + 2Px - x^2), & \text{si } P \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Es una función continua a trozos que depende de los parámetros *M* y *P*. Es fácil comprobar su continuidad, porque al sustituir *P* por *x* se obtiene el mismo valor en ambos casos. Como se puede apreciar, *P* define el punto en el que la comba deja de crecer y comienza a decrecer. Por otra parte, *M* controla la curvatura de la comba. La comba comienza en el punto (0,0) y termina en punto (1,0), que son justamente los extremos de la *cuerda*.

Para definir la *anchura* se utiliza la siguiente función, que depende del parámetro T :

$$y_t = \frac{T}{0,2} (a_0 x^{0,5} + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4)$$

donde

$$a_0 = 0,2969, a_1 = -0,126, a_2 = -0,3516, a_3 = 0,2843, a_4 = -0,1015$$

Esta función describe el grosor a lo largo de la comba (entre los puntos $(0, 0)$ y $(1, 0)$).

La anchura se añade a cada lado de la comba para determinar las superficies superior e inferior del perfil alar. Pero ésta no se suma verticalmente, sino en dirección perpendicular a la pendiente de la comba. La pendiente en cada punto se calcula con la derivada de la comba, que se corresponde con la siguiente función:

$$\frac{\partial y_c}{\partial x} = \begin{cases} \frac{2M}{P^2}(P - x), & \text{si } 0 \leq x \leq P \\ \frac{2M}{(1-P)^2}(P - x), & \text{si } P \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Una vez que se tiene la pendiente en cada punto, se calcula la perpendicular y se le suma la anchura a cada lado de la comba en dicha dirección.

Para completar esta descripción solo falta ver la correspondencia entre los cuatro dígitos de los perfiles NACA y los tres parámetros (M , P y T) que se acaban de presentar. Se usará el NACA 5418 como ejemplo. M es el primer dígito partido de cien (5/100). Define el grado de curvatura de la comba; cuanto más grande sea M , más separada estará la comba del eje X. P es el segundo dígito dividido entre diez (4/10). Define el punto en el que la curva deja de crecer y pasa a decrecer; por tanto, cuanto más grande sea P , más alejado estará el punto de máximo de la comba (punto de cambio) del eje Y. T son los dos últimos dígitos divididos entre cien (18/100). Estos condicionan el anchura (distancia perpendicular del perfil a la comba); cuanto más grande sea T , mayor será el grosor y mayor distancia habrá entre el borde del perfil alar y la comba.

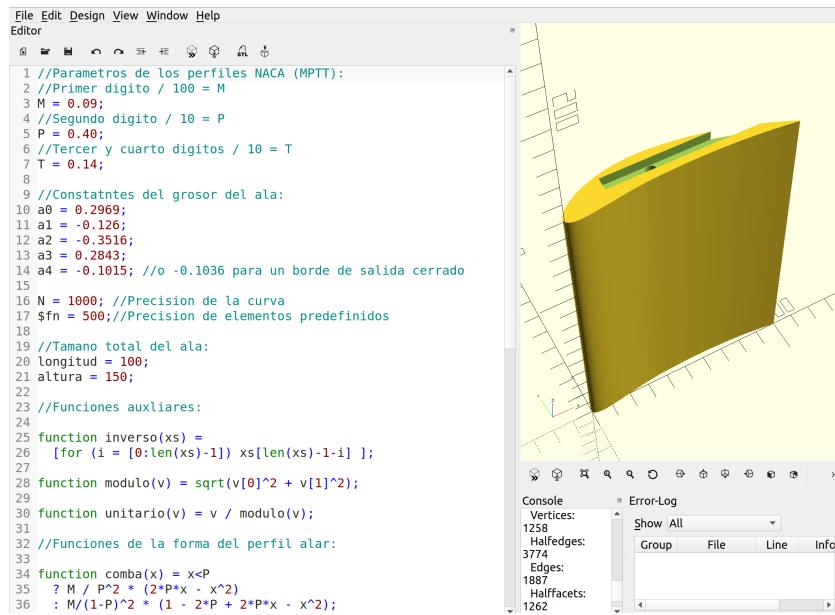
3.2. Cómo crear un perfil NACA de cuatro dígitos

Para poder analizar este tipo de perfiles alares en este túnel de viento, necesitaba tenerlos físicamente. La única opción a mi disposición era imprimirlas usando una impresora 3D, lo que exige tener un modelo tridimensional de estos perfiles. Normalmente diseño las piezas tridimensionales utilizando un programa de modelación 3D interactivo llamado Tinkercad. Para poderlo aplicar a los perfiles de NACA tendría que calcular cientos de puntos a mano utilizando las fórmulas de la sección anterior y después introducirlos uno a uno en el programa. Diseñar un solo ala sería agotador y hacer todas las que quería resultaría inviable.

La primera solución que se me ocurrió fue hacer un programa informático que calculase los puntos para luego meterlos a mano en el programa de modelación 3D. Esta opción, a pesar de ser bastante mejor que la anterior, seguía siendo un proceso que requería demasiado tiempo. Mi última idea fue buscar un programa de modelación 3D no interactivo que definiése los diseños a base de código. De los programas que encontré, el que más me gustó fue OpenSCAD por su comodidad de uso, tanto en instalación como en interacción con el programa, y porque su lenguaje de programación es muy sencillo y focalizado en el problema de diseño. Además es software libre.

En OpenSCAD hice un programa con el que se puede generar el modelo tridimensional de cualquier perfil alar NACA de cuatro dígitos, que puede consultarse en la sección A.7 del anexo. Este programa incorpora las funciones para el cálculo de los perfiles mostradas en la sección anterior y conserva M , P y T como variables. Cambiando los valores de estas variables, se puede generar cualquier perfil alar NACA como un polígono que es un objeto bidimensional. Despues se extruye¹ dicho polígono para formar un ala tridimensional. Para que las alas tengan las dimensiones adecuadas para el dispositivo, el programa siempre las genera con una altura de 150 mm (eje Z) y una profundidad de 100 mm (eje

¹Extruir es una herramienta habitual en programas de modelación 3D que convierte una forma de dos dimensiones a una de tres dimensiones.



```

File Edit Design View Window Help
Editor
1 //Parametros de los perfiles NACA (MPTT):
2 //Primer digito / 100 = M
3 M = .09;
4 //Segundo digito / 10 = P
5 P = .40;
6 //Tercer y cuarto digitos / 10 = T
7 T = .14;
8
9 //Constantes del grosor del ala:
10 a0 = .2969;
11 a1 = -.126;
12 a2 = -.3516;
13 a3 = .2843;
14 a4 = -.1015; //o -0.1036 para un borde de salida cerrado
15
16 N = 1000; //Precision de la curva
17 $fn = 500;//Precision de elementos predefinidos
18
19 //Tamaño total del ala:
20 longitud = 100;
21 altura = 150;
22
23 //Funciones auxiliares:
24
25 function inverso(xs) =
26 [for (i = [0:len(xs)-1]) xs[len(xs)-1-i] ];
27
28 function modulo(v) = sqrt(v[0]^2 + v[1]^2);
29
30 function unitario(v) = v / modulo(v);
31
32 //Funciones de la forma del perfil alar:
33
34 function comba(x) = x<P
35 ? M / P^2 * (2*P*x - x^2)
36 : M/(1-P)^2 * (1 - 2*P + 2*P*x - x^2);

```

Figura 3.2.: Entorno de desarrollo de OpenSCAD

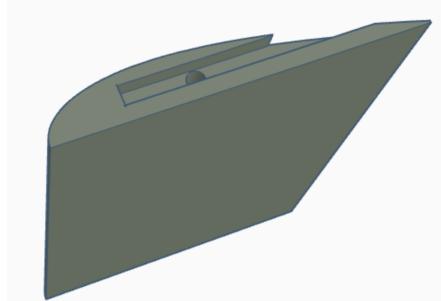


Figura 3.3.: Perfil simétrico NACA 0015 cortado por la mitad con Tinkercad

X). Además hace un agujero y un par de ranuras para que el ala se conecte adecuadamente al acople del dispositivo.

Las alas que no son NACA sí las he diseñado con Tinkercad porque no era necesario calcularlas punto a punto. Con este programa hice formas geométricas simples, como triángulos o rectángulos, para experimentar con sus coeficientes aerodinámicos. También corté un perfil alar simétrico NACA por la mitad, como puede verse en la figura 3.3. En teoría, los perfiles alares simétricos, dispuestos a un ángulo de ataque de 0°, no ejercen ningún tipo de sustentación porque las fuerzas de cada lado se cancelan, por eso lo partí por la mitad, para ver cómo se comportaba con esa forma.

4. Impresión 3D

Una gran parte de este proyecto ha estado estructurado alrededor de la impresión 3D. Para entender el proceso de construcción y algunas de las complicaciones de este proyecto es necesario tener un conocimiento básico de esta tecnología. El chasis del dispositivo cuenta con 29 piezas de plástico creadas por una impresora 3D además de 14 perfiles alas construidos de la misma manera. La impresora que he utilizado para construir el dispositivo y las alas es una *Creality Ender-3 S1 Pro* (ver figura 4.1), que es una impresora 3D FDM. FDM son las siglas de Fused Deposition Modeling que en castellano es Modelado por Deposición Fundida. La inmensa mayoría de las impresoras 3D hoy en día son de este tipo y la siguiente discusión se centrará exclusivamente en ellas.

4.1. Impresoras 3D

Este tipo de impresoras son de *fabricación aditiva*, lo que quiere decir que crean las piezas a base de ir añadiendo material poco a poco, al contrario que las fresadoras CNC que funcionan a base de ir extrayendo material del pedazo original. Las FDM se pueden dividir en dos categorías: *abiertas* y *cerradas*. Las segundas tienen una estructura alrededor que retiene el calor de la cama (superficie sobre la que se imprimen las piezas) y mantienen una alta temperatura en la zona de impresión. Esto es esencial para imprimir algunos materiales. En las abiertas el aire corre libremente por la zona de impresión, el calor de la cama no se retiene en la zona de la impresión y su temperatura es mucho más baja.

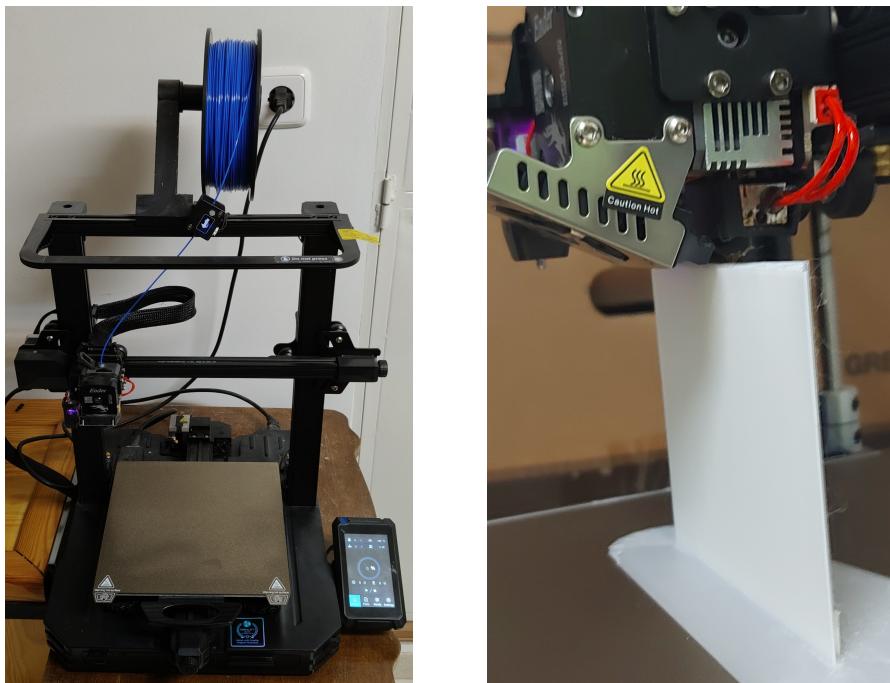


Figura 4.1.: *Creality Ender-3 S1 Pro* utilizada para este proyecto y una toma imprimiendo un perfil alar

La impresión 3D es un proceso de fabricación delicado porque la tasa de fallos es alta y depende de muchas variables como el modelo de la impresora, sus horas de trabajo, el estado de la máquina, la dirección de soplado de los ventiladores, la suciedad de la impresora, la temperatura ambiental, la temperatura de la cama, de la boquilla, etc.

Las impresoras se alimentan de un largo filamento de plástico que tiene 1.75 mm de diámetro. Este filamento es suministrado a una *garganta* (tubo de metal) que suele configurarse entre los 200°C y 300°C dependiendo del material. A continuación pasa a una *boquilla* de 0.4 mm de diámetro que suelta el plástico derretido en el lugar deseado. Hay un ventilador que sopla justo debajo de la boquilla para que según se deposite el material derretido sobre la parte previamente construida, éste se enfrie y endurezca formando parte de la pieza. No es nada fuera de lo común que la zona de la garganta y de la boquilla se atasquen. Esto arruina la pieza porque la impresora sigue actuando como si todo fuera correctamente pero sin añadir más material con lo que terminará dejando la pieza a medias (ver figura 4.2). Los atascos dependen de varios factores: si la garganta o la boquilla están desgastadas hay huecos en los que se puede ir acumulando material potenciando un atasco; el tener una temperatura distinta a la necesaria del material que se está utilizando; hay materiales más propensos a atascarse que otros, como el TPU (un tipo de filamento flexible).

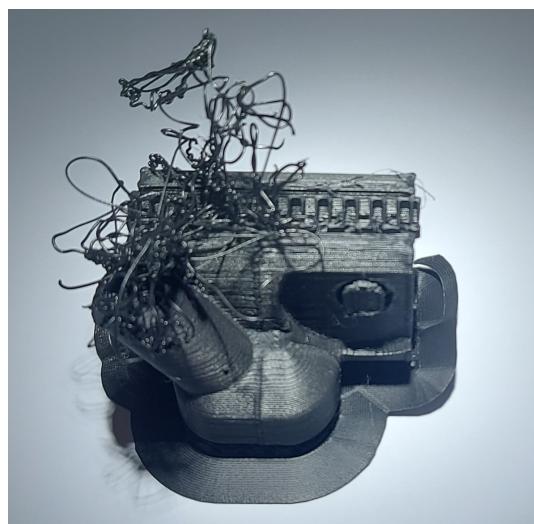


Figura 4.2.: Fallo de impresión por atasco

El filamento derretido se va depositando capa a capa de abajo a arriba. Todas las capas son del mismo tamaño. La base de la pieza se apoya en lo que se conoce como *base* o *cama* de la impresora, una superficie plana con la capacidad de calentarse. Para que la pieza se mantenga adherida a la cama esta debe estar caliente, a una temperatura que depende del material. Los dos puntos más importantes para el mantenimiento de la cama son el calibrado y la limpieza.

La cama puede ensuciarse por la acumulación de residuos de impresión o por la grasa de las manos al manipularla, y en alguna ocasiones es muy difícil apreciar esta situación. Cuando se ensucia, tiende a perder adherencia.

La cama debe estar calibrada, lo que significa que la tobera debe estar a la misma distancia (alrededor de 0.15mm) de todas las partes de la cama. El proceso de calibrado depende de la impresora. En las de gama alta lo realiza la propia máquina automáticamente, pero en las de media o baja, como la mía, se hace ajustando cuatro tornillos, uno en cada esquina de la base.

Que las piezas se hagan capa a capa tiene sus inconvenientes. El primero es el tiempo que se requiere. Lo más común es que las capas sean de 0.2 mm de altura. Mi impresora, por ejemplo, tarda alrededor de una hora en hacer un cubo macizo de 2 cm de lado, aunque las piezas macizas no son co-

munes por su gran consumo de tiempo y material. Otra desventaja del sistema de capas es que genera puntos débiles en los lugares donde se juntan las capas. Para evitar este problema, cuando se diseña una pieza se hace teniendo en cuenta que se pueda imprimir de forma que la fuerza que va a soportar el objeto no se haga en el mismo sentido que el de las capas. El último inconveniente es que no puede aportar filamento donde no hay pieza debajo (voladizo). La solución para esto es que la impresora vaya generando soportes para que actúen como puntos de apoyo para las partes de la pieza que sobresalen. Estos soportes, una vez terminada la pieza, se deben quitar. Afortunadamente casi todos los programas de laminado generan soportes automáticamente donde es necesario.

Para imprimir una pieza no basta con tener el modelo 3D en un ordenador. Primero hay que convertirlo en un formato estándar como STL u OBJ para que lo entienda un programa de laminado. Un programa de laminado parte de un diseño 3D y lo convierte en capas con las que genera un fichero G-code que es el formato que esperan las impresoras 3D. Además indica a la impresora dónde debe posicionar la boquilla usando los motores de la máquina, las temperaturas que debe tener, cuándo tiene que expulsar filamento por la boquilla, etc. El programa de laminado que he utilizado para este proyecto es UltiMaker Cura 5.8.1. Este programa me permite además determinar la anchura de las paredes de la pieza, el porcentaje de relleno que debe de tener en su interior, la forma del relleno, las características del soporte y muchos ajustes más complejos que no se suelen alterar.

4.2. Materiales de impresión

Las impresoras FDM suelen poder imprimir múltiples materiales. PLA¹ es el más popular para aficionados. Éste tiene muchas ventajas. Es el más fácil de encontrar, bastante barato, tiene un bajo porcentaje de fallos, no requiere altas temperaturas, cualquier FDM abierta lo puede imprimir y es el único que no expulsa gases tóxicos al derretirse. Requiere alrededor de 200°C en la boquilla y unos 60°C en la cama, y no necesita una temperatura ambiente mínima. Este es el material con el que más experiencia tengo imprimiendo y sé que mi impresora es capaz de utilizarlo perfectamente. Entre los inconvenientes del PLA cabe destacar que es bastante frágil, las piezas no aguantan grandes cargas, no resiste la luz del sol durante periodos largos de tiempo y pierden consistencia a temperaturas por encima de los 50°C.

El ABS² es otro material común, bastante menos frágil y que aguanta cargas y temperaturas más elevadas. Este material necesita una temperatura de 230°C a 260°C en la boquilla y 80°C a 130°C en la cama. No obstante, es necesaria también una temperatura ambiental alta; en caso contrario empiezan a despegarse los bordes y a curvarse hacia arriba, con lo que la boquilla terminará golpeando a la pieza y despegándola de la base. Lo he intentado con varias marcas de filamento pero siempre tengo este problema. Creo que es necesaria una impresora cerrada. Por este motivo no he usado el ABS para ninguna pieza de este proyecto.

El PETG³ es otro material bastante común. Es por lo general más duro que el ABS y aguanta la exposición al sol. Necesita que la boquilla esté entre 220°C y 255°C y la cama entre 70°C y 90°C. Esto son temperaturas con las que mi impresora puede trabajar. No requiere una alta temperatura ambiente y es factible manejarlo con impresoras abiertas de gama media. Tengo bastante experiencia trabajando con este material. Es algo más caro y más difícil de encontrar que el PLA y además tiene un mayor porcentaje de fallo.

El PLA con fibra de carbono es el menos común de estos pero tampoco es difícil de encontrar. Requiere las mismas condiciones de impresión que el PLA pero es bastante menos frágil y aguanta considerablemente más carga. Lo he usado bastante y en mi experiencia falla más que el PLA pero menos que el PETG. El problema que tiene es que es notablemente más caro que el PLA normal, sólo está disponible en negro o colores muy oscuros y desgasta bastante las boquillas.

¹El PLA (ácido poliláctico) es el plástico más común para la impresión 3D. Es un plástico biodegradable que se obtiene de la fermentación de plantas como el maíz.

²El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un plástico común encontrado en objetos cotidianos como los juguetes Lego.

³El PETG es un material de impresión formado por tereftalato de polietileno (PET) y glicol (G). El PET es un plástico común fuera del mundo de la impresión 3D. Las botellas de plástico suelen estar hechas de este material.

4.3. Filamentos elegidos

Por todo lo anterior, para este proyecto he utilizado PLA normal y PLA con fibra de carbono. Los perfiles alares son de PLA porque no tienen que resistir grandes cargas ni exponerse a altas temperaturas. Además es el material más barato y menos problemático al imprimir, lo que es determinante para piezas que han tardado unas 7 horas. Se han imprimido con paredes de 0,8 mm y con un 10 % de relleno. Las piezas del dispositivo no podían ser de PLA porque estas sí que se enfrentan a mayores cargas. Las dos opciones viables eran el PETG y el PLA con fibra de carbono. Acabé decidiéndome por el segundo material porque tenía la resistencia suficiente y no quería enfrentarme a los fallos de PETG. Además el dispositivo no va a estar sometido a altas temperaturas ni va a estar expuesto al sol, factores que sí me habrían animado a elegir PETG. Estas piezas se han imprimido con paredes de 1,6 mm y un relleno del 20 %.

5. Construcción del dispositivo

5.1. Elementos estructurales

El dispositivo tiene dos ejes de movimiento libre, uno es el de la X que se mueve cuando hay resistencia aerodinámica en el ala, y el otro es el de la Y que se mueve cuando hay sustentación. Para que el movimiento de los ejes tuviese la mínima resistencia y afectara lo menos posible a las mediciones, cada eje tiene cuatro rodamientos lineales que corren sobre dos guías calibradas. A pesar de que los ejes puedan moverse libremente con mínima resistencia, a efectos prácticos no se mueven porque están conectados de forma solidaria a los sensores de fuerza. Esta característica es deseada con la intención de evitar la fuerza de rozamiento.



Figura 5.1.: Disposición de los rodamientos en las guías

Al principio del diseño del proyecto no sabía cómo integrar en el mismo dispositivo la toma de ambas medidas sin que las lecturas de uno afectaran las del otro. Por este motivo el proyecto comenzó siendo dos dispositivos separados, uno media la sustentación y otro la resistencia. Poco antes de acabar el que se encargaba de la sustentación (véase Anexo A.2) se me ocurrió cómo incorporarlo al dispositivo de la resistencia para que leyese también dicho parámetro. Esto hizo que tuviese que cambiar algunas partes pero el resultado final de un solo dispositivo es más interesante que tener dos dispositivos separados.

5.1.1. Opciones de construcción

Primero pensaba hacer la estructura completa del dispositivo a base de grandes piezas de plástico con una impresora 3D. Esto genera varios inconvenientes porque las piezas ocupan toda la cama de la impresora lo que las hace muy propensas a tener problemas de adherencia.

Cuanto más grande es una pieza, más cargas soporta, por lo que tiene que estar hecha de un material más resistente, que siempre es más difícil de imprimir y tiene mayor tasa de fallo. Además necesita un porcentaje de relleno muy alto, lo que aumenta el tiempo de impresión.

Una pieza de estas dimensiones le llevaría a mi impresora varios días. Si en este tiempo se atascara la boquilla o hubiera algún otro problema, la pieza quedaría arruinada y tendría que volver a imprimirla desde el principio.

Otro problema es la cama. Mi impresora tiene una cama cuadrada de 220 mm de lado. Una estructura que fuera capaz de acomodar un ala de un tamaño razonable, no habría cabido en esa cama.

Por esos problemas de tamaño y la alta probabilidad de fallos en la impresión decidí no hacer una estructura de grandes piezas de plástico.

Mi siguiente opción fue construirlo a base de madera. Con este material no tendría limitaciones de tamaño ni los problemas de la impresora 3D. Además tengo algunas herramientas de carpintería y algo de experiencia con ellas. Sin embargo, no tengo ni las herramientas ni el conocimiento para hacer piezas precisas, detalladas e idénticas. Necesitaría una fresadora CNC, máquina que no tengo a mi alcance. Esto significaba que la madera, como único material, tampoco era una opción viable.

Otra opción era hacerlo de hierro. Este material tiene la ventaja de aguantar mucha más carga que los demás. Tengo algunas herramientas para trabajar este material y algo de experiencia manejándolo. Pero tiene el mismo problema que la madera: no tengo ni los medios ni el conocimiento para poder hacer piezas pequeñas que sean iguales, precisas y detalladas.

5.1.2. Construcción final

Como no podía hacer el chasis del dispositivo de un único material, decidí hacerlo de los tres. La base del dispositivo es de madera, al igual que el soporte de la turbina. El esqueleto del dispositivo está construido a base de varillas roscadas de acero inoxidable de 8 mm. Elegí acero inoxidable frente a acero normal porque las varillas de este material suelen ser más resistentes y estar más rectas. Estas varillas están conectadas por piezas de PLA con fibra de carbono que están imprimidas con mi impresora 3D. Dichas piezas son pequeñas y precisas. Con estas piezas imprimidas y las varillas roscadas se forma una estructura que tiene como vértices a las piezas y como aristas a las varillas. Hay varias disposiciones en los vértices; algunas pueden verse en la figura 5.2. A las piezas imprimidas se acoplan el resto de elementos: los rodamientos, sus guías, el enganche de los perfiles alares, el soporte para los sensores de presión de ambos ejes, etc.



Figura 5.2.: Muestra de cómo las piezas imprimidas conectan las varillas

Este método tiene muchas ventajas. En caso de que haya una medida mal en una pieza o un cambio en el diseño, no hay que rehacer una impresión de días sino sólo una de unas pocas horas. Ya no hay limitaciones de tamaño, lo que permite que los perfiles alares sean más grandes. La rigidez estructural que tiene el dispositivo con las varillas de acero es mejor que la que se habría obtenido con piezas de plástico. La impresión 3D ha sido mucho más cómoda. Estas piezas pequeñas al estar ocupando sólo el centro de la cama se adhieren muy bien. La única pieza grande que he tenido que imprimir me llevó 4 intentos hasta que conseguí que no tuviera problemas de adherencia.

Todas las piezas del chasis del dispositivo las he diseñado utilizando Tinkercad, las he laminado utilizando Cura y las he imprimido en PLA con fibra de carbono para que tengan mayor resistencia a las fuerzas que están sujetas.

He cortado las varillas con sus longitudes necesarias con una sierra de mano de metal. A continuación he limado la rebaba de los bordes para recuperar la rosca. Las piezas imprimidas están sujetas a las varillas con arandelas y tuercas.

Este esqueleto de plástico y metal está atornillado a una tabla de madera junto con el resto del dispositivo.

Para generar el flujo de aire, he utilizado una turbina eléctrica que mueve $540m^3/h$. Este flujo se reduce a un diámetro de 120 mm, por tanto el aire lleva una velocidad de 47,74 km/h. Para evitar, en la medida de lo posible, que el ala se enfrente a las turbulencias que pueda generar la reducción del flujo o las aspas de la turbina, entre ésta y el perfil alar hay un tubo de 50 cm de longitud. El tubo acaba a pocos centímetros del ala y ambos están centrados. El tubo se apoya en la única pieza grande de plástico imprimida y la turbina está colocada sobre dos tablas de madera ancladas a la tabla que hace de base de todo el dispositivo.

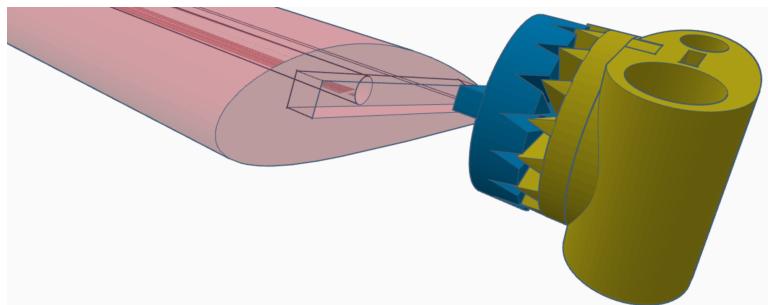


Figura 5.3.: Modelo del acople del ala al carro vertical y del mecanismo de cambio de ángulo

El enganche al que se acoplan las alas puede cambiar de ángulo. Éste está conectado al chasis con unos engranajes formados por hendiduras triangulares cada 22.5° (ver figura 5.3). Esto permite cambiar el ángulo de ataque de los perfiles alares y analizar cómo afecta a la sustentación y a la resistencia.

Toda la electrónica está unida a una pequeña tabla de madera que a su vez está atornillada al tablero que hace de base.

5.1.3. Problemas en la construcción

Esto no significa que no haya tenido ningún problema con la impresora 3D, porque siempre generan alguno. Las impresoras 3D siempre crean las piezas con un tamaño ligeramente distinto al del diseño 3D. Esto hacía que algunas partes como las varillas o los rodamientos no entrasen bien en las piezas imprimidas. Después de varios intentos determiné que el diámetro de un agujero, en el diseño 3D, para que una varilla de 8 mm entrase a presión, debía ser 8.165 y para que entrase sin presión ni holgura debía ser de 8.2mm.

Además hubo una temporada en la que la impresora fallaba mucho. Las piezas no se adherían a la cama. Cuando iba a recoger la pieza terminada me encontraba un caos de filamento derretido sobre media pieza. Después de limpiar bien todo y hacer el mantenimiento rutinario la impresora seguía fallando. Fue entonces cuando determiné que debía de haber algo en mal estado en la propia máquina. Al hacer una revisión más profunda vi que la boquilla estaba muy desgastada (ver figura 5.4); al cambiarla, la impresora volvió a funcionar bien. Esto ocurrió porque la fibra de carbono desgasta mucho la boquilla.



Figura 5.4.: Boquilla nueva y usada. Se aprecia la reducción de altura y el ensanchamiento del orificio

Cuando las boquillas se desgastan se acortan y se ensancha la punta y el orificio. Al ser más corta, coloca el filamento de la primera capa más lejos de la base, lo que afecta a la adherencia. Al ser el agujero más ancho, la máquina no es precisa al depositar el material derretido. Al ser la punta más ancha, esta empuja a los cordones de filamento adyacentes y los arranca de la cama.

También tuve problemas con los diseños. El programa original que hice en OpenSCAD para modelar los perfiles alares NACA siempre centraba el agujero de acople en el punto de máxima altura de la com-

ba. No fue hasta hacer las pruebas de los perfiles en el dispositivo que descubrí un problema evidente: los perfiles que tenían el segundo dígito mayor que 4 chocaban contra el tubo, porque al estar el acople más retrasado, su punta sobresalía más. Afortunadamente, la mayoría de los perfiles alares que tenía imprimidos cuando descubrí este error cabían en el dispositivo. De ahí en adelante imprimí todos los perfiles alares con el agujero para el acople centrado a $4/10$ de la longitud del ala. Así tenían el acople igual que si su segundo dígito fuese cuatro y todos los perfiles alares quedan igual en el dispositivo.

5.2. Electrónica

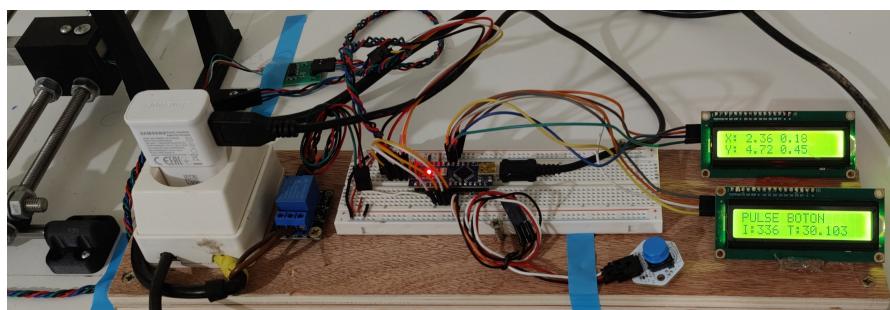


Figura 5.5.: Electrónica del dispositivo

La electrónica y programación que hay detrás del dispositivo ha supuesto una parte importante del proyecto. Quería que el dispositivo funcionase de forma completamente autónoma. Lo natural es resolver este tipo de tareas con un microcontrolador. He elegido un Arduino Nano, porque tenía experiencia previa con Arduino y porque la variante Nano se puede *pinchar* en una placa de inserción¹ donde también está acoplada el resto de la electrónica. Hay un botón para indicar al dispositivo que inicie una prueba, un relé que controla la turbina, dos sensores para medir las fuerzas que ejercen las alas y dos pantallas LCD para mostrar los datos porque en una no cabían todos.

Para medir las fuerzas que producen los perfiles alares al enfrentarse a un flujo de aire hay dos sensores. Uno situado en la parte trasera del dispositivo conectado al eje de movimiento libre horizontal (eje X) para medir la resistencia aerodinámica y otro conectado al eje de movimiento libre vertical (eje Y) para medir la sustentación.

El sensor horizontal está conectado en el extremo opuesto a la turbina. Cuando esta se enciende empuja el ala alejándola de la turbina y empujándola hacia ese sensor. Este empuje es la resistencia aerodinámica; cuanto mayor sea, mayor será la fuerza que ejerce sobre el sensor.

El sensor vertical está colocado debajo de la parte del dispositivo que se mueve libremente en la dirección vertical. Por tanto, todo el peso de esta parte del dispositivo, unos 400 gramos, apoya en el sensor. Cuando se enciende la turbina, el ala genera una fuerza de sustentación que se opone al peso y reducirá la presión sobre el sensor. El microcontrolador mide esa reducción y la muestra como fuerza de sustentación.

Estos sensores son celdas de carga, también conocidas como sensores de presión. Se utilizan habitualmente en las básculas electrónicas para medir peso. El peso es una fuerza y por tanto este dispositivo lo utiliza para medir las fuerzas que generan las alas. Las celdas de carga son transductores que transforman las fuerzas que se le aplican en señales eléctricas. Tienen una parte ligeramente deformable en la que hay anclado un cable muy largo de forma que al aplicar presión este cable se alarga, cambia su resistencia y esto se puede medir como cambio de voltaje con un puente de Wheatstone. Ese cambio

¹Una placa de inserción o placa de pruebas es un tablero con orificios conectados eléctricamente. Se utiliza para insertar cables y elementos electrónicos con el objetivo de crear un circuito eléctrico.

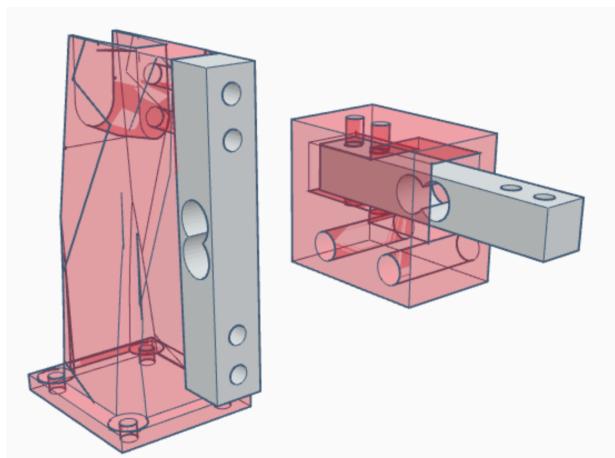


Figura 5.6.: Modelo de los soportes (en rojo) de los sensores (en gris)

de voltaje no se mide directamente con el microcontrolador sino con un módulo amplificador llamado HX711 que se coloca entre la célula de carga y el Arduino. En cualquier caso, la lectura de una celda de carga es una actividad muy compleja que se abstrae y reusa con una *librería*² en C++. He recurrido a la de Rob Tillaar (ver bibliografía, pág. 33).

Cuando se lee una celda de carga con esa librería (o con cualquier otra) se obtiene un valor numérico que no se corresponde con ninguna unidad oficial (como gramos o libras). Además, cada sensor, por diferencias en la construcción, da valores ligeramente distintos para una misma fuerza. Esto obliga a calibrar los sensores, cosa que hice de la siguiente manera. Preparé un pequeño programa para que Arduino mostrara los valores inalterados que generaba el sensor de presión. Coloqueé ocho monedas de dos euros sobre el sensor e hice la media de varias medidas. Luego dividí el peso de las ocho monedas (68 gramos) entre esa media (50558.5 para el horizontal y 49526.0 para el vertical). En el programa final proporciono esos valores a la librería para que, a partir de ese momento, me devuelva la lectura en gramos. Utilicé monedas porque es algo fácilmente disponible, con un peso fijo (8.5 gramos según indica el Banco de España) y cercano a las fuerzas que esperaba en mi dispositivo. No obstante, comprobé el peso de las 8 monedas con una pequeña báscula de precisión.

El microcontrolador alimenta de electricidad a todos los elementos que tiene conectados. Pero no puede alimentar a la turbina, porque las características eléctricas son completamente distintas: el Arduino trabaja a 5V en DC y con nivel bajos de intensidad, mientras que la turbina trabaja a 230V en AC y necesita 75W de potencia. Para ello es necesario separar la alimentación de la turbina y controlar el flujo de corriente con un relé, que es un interruptor en el circuito de 230V que se controla desde un puerto digital del Arduino.

Un LCD (Liquid-crystal display) es una pantalla muy simple que permite mostrar información alfanumérica. En este proyecto se utilizan dos LCDs con 2 filas de 16 caracteres. Hay 2 alternativas de conexión de un LCD a un Arduino. En la *conexión directa* son necesarios 7 pines del Arduino con un cableado bastante sofisticado. Conectar 2 LCDs con esta técnica es algo muy complejo y exigiría consumir todos los pines disponibles en el microcontrolador. Afortunadamente, existe una segunda alternativa de conexión, con una placa I2C intermedia. I2C es un mecanismo de comunicación serie que sólo consume 2 pines que además se pueden compartir entre múltiples pantallas. Para distinguirlas, se introduce el concepto de *puerto*: todo componente I2C tiene un puerto asociado (un número entre 0 y 255), y cuando se mandan datos por I2C hay que indicar el puerto receptor.

El I2C de ambas pantallas venía preconfigurado con el puerto 27_{16} .³ El fabricante proporciona un

²Librería es el *false friend* habitual en informática para traducir *library* que realmente significa biblioteca

³Se utilizará esta notación para números en base 16 y en general el subíndice indicará la base.

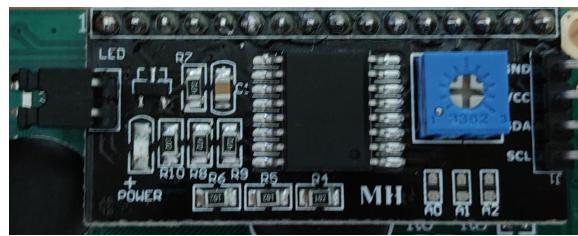


Figura 5.7.: Adaptador I2C del LCD

mecanismo *hardware* para modificar el número de puerto. En el circuito integrado hay tres terminales marcadas con las siglas A0, A1 y A2, como puede verse en la parte inferior derecha de la figura 5.7. Al soldar los dos extremos del terminal A_i se cambia el bit⁴ i de la representación binaria del puerto. El desarrollo binario del valor 27_{16} es 100111_2 . En uno de los circuitos I2C soldé el terminal A2 con lo que pasó a tener el puerto 100011_2 que se corresponde con el valor 23_{16} .

Para manejar un LCD conviene usar una librería. Para este proyecto he elegido la de Frank de Brander (véase bibliografía, pág. 33). Hay que conectar los cables de datos de ambas pantallas a los pines analógicos 4 y 5.

En el código, en el momento de creación de los objetos C++ que controlan las pantallas, hay que indicar el puerto de cada una. Son las constantes 0x27 y 0x23 que pueden verse en el programa (líneas 28 y 29 del anexo A.8).

5.3. Programación

Para controlar el Arduino he preparado un programa en C++, lenguaje de programación principal de la plataforma Arduino. Este programa muestra en los LCDs todo lo que está ocurriendo. Primero espera a que se solicite un ciclo de medición con la pulsación del botón. Una vez detectada la pulsación, pasa a tarar ambos los sensores, proceso similar al que hace cualquier báscula electrónica. Luego arranca la turbina y empieza a tomar y mostrar las medidas de los sensores. Las primeras medidas se descartan porque la turbina tarda unos segundos en alcanzar su máxima velocidad. Luego empieza a acumular las medidas en 3 variables de la siguiente forma: en n , el número de medidas, en s , su suma y en c , la suma de sus cuadrados. Esto permite calcular la media y la desviación típica con las ecuaciones

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{s}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^n (x_i - \mu)^2 \right)} = \sqrt{\frac{1}{n} \left((\sum x_i^2) - n\mu^2 \right)} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \mu^2} = \sqrt{\frac{c}{N} - \mu^2}$$

Después de unos segundos deja de guardar lecturas, apaga las turbinas y espera a que las aspas hayan perdido toda la velocidad. Luego repite todo el proceso otras dos veces para promediar los errores. Finalmente muestra la media y la desviación típica de todos las medidas que ha tomado en el eje X y en el eje Y, por separado. La desviación típica sirve para comprobar que no ha habido ningún error; si fuera muy alta indicaría que ha habido medidas muy diferentes y el análisis debería repetirse.

⁴Un bit es un dígito binario

6. Conclusiones

Para comprobar el adecuado funcionamiento del túnel de viento analicé 14 perfiles alares a tres ángulos de ataque (0° , $22,5^\circ$ y 45°). Los resultados pueden verse en la figura 6.1. Para cada perfil alar se indica su nombre, una imagen del perfil, y los valores de las fuerzas en 2 filas: la superior, precedida del símbolo \leftrightarrow , con la resistencia aerodinámica; la inferior, precedida del símbolo $\downarrow\uparrow$, con la sustentación. En cada celda figura la media acompañada de la desviación típica entre paréntesis.

Perfil	Eje	0°	$22,5^\circ$	45°
NACA 0015		\leftrightarrow 0,68 (0,09)	3,25 (0,28)	15,49 (0,32)
	$\downarrow\uparrow$ -0,29 (0,2)	12,3 (0,71)	12,49 (0,68)	
NACA 2412		\leftrightarrow 0,34 (0,07)	3,67 (0,26)	16,78 (0,5)
	$\downarrow\uparrow$ 2,64 (0,46)	14,99 (0,82)	14,48 (0,49)	
NACA 4418		\leftrightarrow 1,18 (0,15)	4,69 (0,39)	16,81 (0,49)
	$\downarrow\uparrow$ 3,14 (0,15)	15,35 (0,9)	12,52 (0,51)	
NACA 4712		\leftrightarrow 0,85 (0,16)	4,27 (0,13)	18,65 (0,4)
	$\downarrow\uparrow$ 3,92 (0,25)	16,60 (0,64)	15,07 (0,51)	
NACA 6112		\leftrightarrow 1,72 (0,15)	5,77 (0,28)	17,99 (0,33)
	$\downarrow\uparrow$ 4,17 (0,40)	15,98 (0,9)	15,48 (0,38)	
NACA 7426		\leftrightarrow 2,52 (0,25)	5,56 (0,32)	17,06 (0,34)
	$\downarrow\uparrow$ 5,93 (0,37)	16,66 (0,96)	13,85 (0,57)	
NACA 9412		\leftrightarrow 2,03 (0,12)	5,54 (0,4)	19,62 (0,46)
	$\downarrow\uparrow$ 7,14 (0,36)	19,03 (0,83)	18,43 (0,48)	
SC(2)-0610 Airbus 380		\leftrightarrow 0,68 (0,12)	6,11 (0,62)	19,43 (0,56)
	$\downarrow\uparrow$ 2,45 (0,27)	14,16 (0,76)	13,54 (0,41)	
NACA 0026 mitad superior		\leftrightarrow 1,8 (0,12)	4,02 (0,13)	18,05 (0,46)
	$\downarrow\uparrow$ 3,87 (0,24)	14,5 (0,33)	21,08 (0,8)	
Rectángulo		\leftrightarrow 3,78 (0,30)	8,92 (0,67)	18,37 (0,48)
	$\downarrow\uparrow$ -0,12 (0,19)	9,76 (0,77)	10,79 (0,31)	
Delta adelantada		\leftrightarrow 4,11 (0,21)	4,56 (0,85)	18,24 (0,33)
	$\downarrow\uparrow$ 2,13 (0,28)	8,99 (0,93)	16,68 (0,51)	
Delta centrada		\leftrightarrow 3,25 (0,29)	5,04 (0,35)	17,79 (0,49)
	$\downarrow\uparrow$ 2,09 (0,28)	11,73 (0,73)	14,77 (0,49)	
Delta retrasada		\leftrightarrow 2,9 (0,31)	5,15 (0,35)	18,07 (0,43)
	$\downarrow\uparrow$ -0,8 (0,27)	11,46 (0,64)	14,51 (0,53)	
Delta hueca		\leftrightarrow 4,23 (0,18)	6,57 (0,46)	16,81 (0,73)
	$\downarrow\uparrow$ 4,31 (0,23)	13,88 (0,84)	18,57 (0,69)	

Figura 6.1.: Sustentación y resistencia medidas en el túnel del viento

Varios de estos perfiles alares son simétricos y no deben ejercer sustentación a 0° . Fueron muy útiles para la calibración del dispositivo. Adicionalmente se analizaron otros perfiles en posición invertida para asegurar que el valor absoluto de su sustentación era el mismo al de su posición directa. La calibración se hace ajustando las tuercas de la cruz superior del dispositivo.

Ambas fuerzas de resistencia y sustentación son bastante bajas y se mueven en el rango de 1 a 20 gramos. De haber sabido que las fuerzas iban a ser tan bajas habría instalado un sensor de peso de hasta 100 g en vez del actual que soporta hasta 1 Kg. No obstante, no creo que esto haya supuesto mayor problema porque los sensores utilizados son muy precisos y llegan a medir centésimas de gramo de forma consistente.

El motivo fundamental por el que las fuerzas producidas son tan bajas se debe a que la velocidad del flujo de aire es relativamente baja. Asumiendo que las especificaciones de la turbina¹ son ciertas, la velocidad del flujo de aire es aproximadamente de $47,74 \text{ Km/h}$. Con una turbina más potente los resultados de las fuerzas generadas por el ala serán significativamente mayores (ver la sección 6.1).

Los resultados de la resistencia y la sustentación a un ángulo de ataque de 0° son lo que cabe esperar según la teoría. Por una parte, los perfiles NACA más anchos y/o más curvos fueron los que generaron mayor sustentación. Por otra parte, los perfiles más finos generaron mínima resistencia. Esto se comprueba en que el perfil NACA 9412 (un perfil muy curvo) es el que más sustentación ha generado.

Las diferencias observadas al repetir la prueba para un mismo perfil son muy pequeñas. Además los cientos de medidas que se toman por prueba son muy parecidas, como puede apreciarse en la desviación típica que es muy pequeña con respecto a la media. Esto significa que la tasa de error es razonablemente baja.

A $22,5^\circ$ la sustentación es significativamente mayor y similar entre las distintas alas porque el perfil frontal es semejante. La sustentación a 45° es muy parecida a la de $22,5^\circ$ y además es el único caso en el que la resistencia aerodinámica es ligeramente mayor a la sustentación. Esto se debe a que cuando el ángulo de ataque es excesivamente elevado el flujo del aire deja de ser laminar y se forman torbellinos que dificultan el avance del ala.

De las observaciones de los párrafos anteriores se puede concluir que el dispositivo tiene un comportamiento correcto porque los resultados son consistentes con lo que cabría esperar.

Para cerrar estas conclusiones, se va a analizar brevemente los resultados de los perfiles alares. El ángulo de ataque más significativo es el ángulo a 0° . Con este ángulo, el perfil con menor resistencia es NACA 2412, lo que no es sorprendente ya que es el perfil más fino. Lo que sí sorprende es que además es el más eficiente, entendiendo que la eficiencia es el cociente entre la sustentación y la resistencia.

Con ángulo de ataque $22,5^\circ$, el perfil que menos resistencia ha generado es NACA 0015, un perfil simétrico. NACA 2412 también se ha comportado muy bien con este ángulo, con una resistencia muy similar a la de NACA 0015.

Con ángulos de ataque 0° y $22,5^\circ$, el perfil que más sustentación ha generado es el NACA 9412. Esto se debe a su forma curvada que es excelente para generar sustentación a bajas velocidades.

Con ángulo de 45° todos los perfiles han tenido malos resultados tanto en sustentación como en resistencia porque, como ya se ha comentado anteriormente, a estas inclinaciones el flujo del aire deja de ser laminar y genera muchas turbulencias alrededor del ala.

6.1. Trabajo futuro

La mejora más importante que se podría hacer al dispositivo sería instalar una turbina con mayor potencia para aumentar la velocidad del flujo del aire. Como la energía del flujo de aire depende del cuadrado de la velocidad, una turbina con el doble de potencia generaría fuerzas cuatro veces mayores y la diferencia del comportamiento entre perfiles alares sería más apreciable. Además los errores de medida debidos a las imprecisiones del aparato serían menos significativos.

No obstante, antes sería interesante añadir un anemómetro, para comprobar con más precisión el cambio en la velocidad del flujo del aire.

Otro área de mejora es el anclaje de las alas. Se tendría que rediseñar para que fuese más sencillo realizar el cambio de ala y su ángulo de ataque. Además sería útil que el salto entre ángulos de ataque fuese más pequeño.

Una actividad que me ha resultado bastante pesada ha sido recolectar todos los datos de la tabla. Sería interesante poder pasar los datos directamente desde el Arduino a una hoja de cálculo en un ordenador o incluso subirlos a una aplicación web.

¹La turbina es de aliexpress y habría que comprobar que las especificaciones se corresponden con las anunciadas en la página web.

A. Anexos

A.1. Ensamblado progresivo del dispositivo

A partir de una foto del chasis completamente montado, no es fácil de entender su estructura. Aquí se muestra una secuencia de fotos de un ensamblaje progresivo. La primera muestra los 6 elementos fundamentales; de izquierda a derecha: (1) el perfil alar con los engranajes para configurar el ángulo de ataque, (2) el subcarro vertical, (3) el carro principal, que tiene las guías verticales en el cateto izquierdo, (4) el sensor de presión vertical, que va montado en la parte izquierda del carro vertical, (5) las guías horizontales. y (6) el sensor de presión horizontal, que va montado en un soporte que se atornilla al tablero.



El perfil alar se monta en el subcarro vertical, que a su vez se desliza en las guías verticales del carro principal, y apoya en el sensor vertical:



Finalmente, el carro principal se monta en las guías horizontales:



El apoyo de la turbina está calculado para que su eje coincida con la *cuerda* del perfil alar. Un tubo de 50 cm de largo canaliza el aire hacia el perfil alar; es tan largo para que el flujo de aire pierda turbulencias

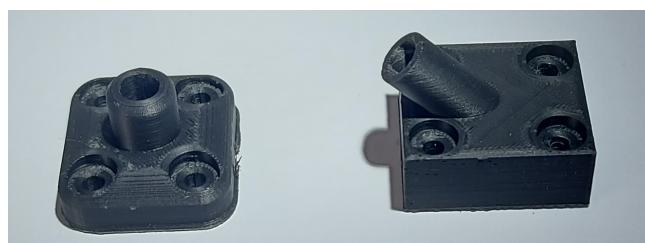


A.2. El primer prototipo operativo

En las dos siguientes imágenes se puede ver el primer prototipo operativo del dispositivo. Solo mide sustentación con ayuda de una báscula de cocina. En ese momento todavía no sabía cómo construir un dispositivo que tomara simultáneamente las dos medidas.

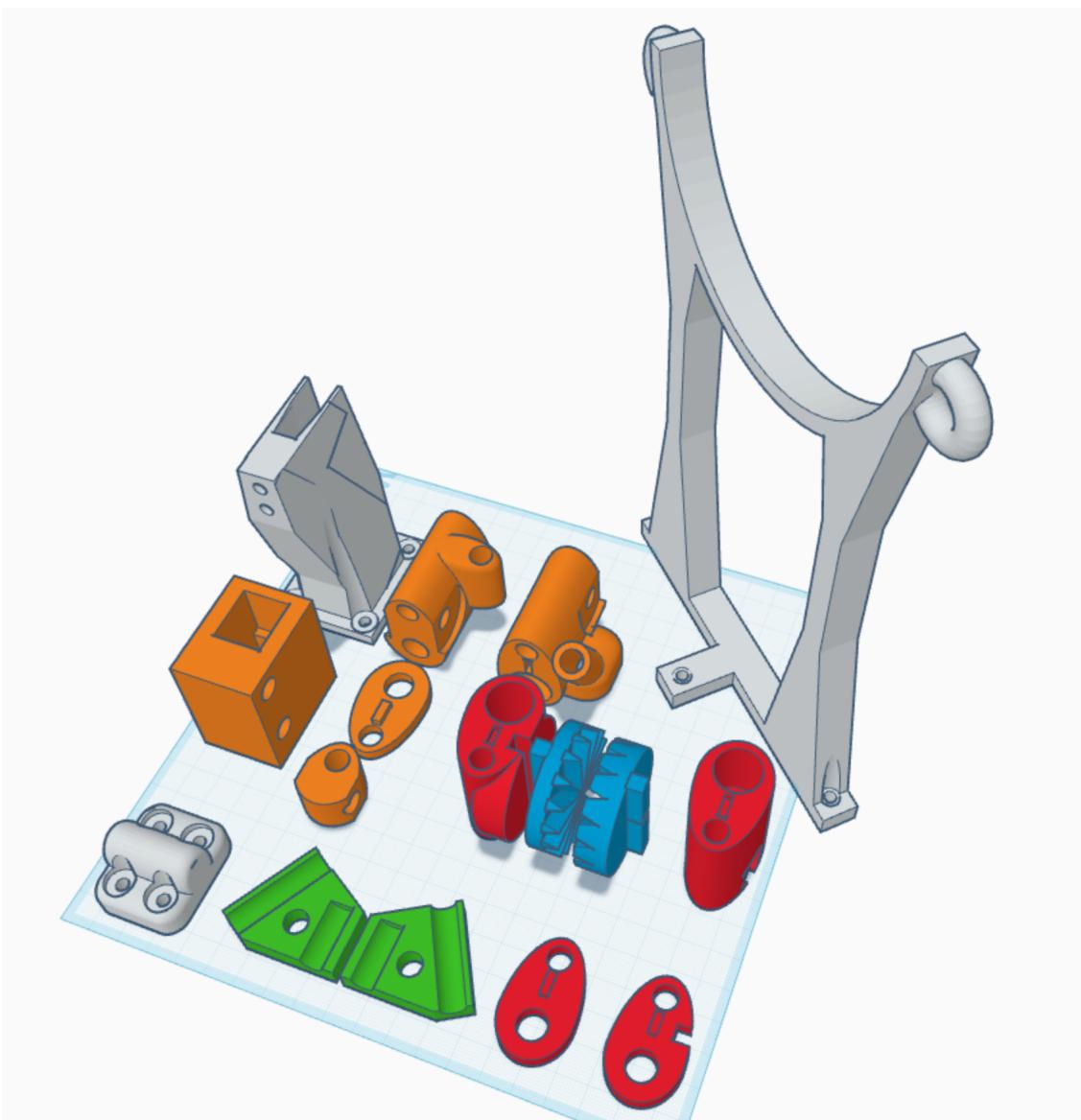


En la siguiente imagen se puede observar el detalle de las *zapatas* en las que apoyaba el chasis de este primer prototipo. En el modelo final éstas corren sobre las guías del eje X y el ángulo es de 30°, en vez de ir atornilladas al tablero a un ángulo de 45°.



A.3. Catálogo de diseños de piezas

En la siguiente imagen pueden verse los modelos 3D de todas las piezas de plástico imprimidas que tiene el dispositivo. Las piezas grises son las que están ancladas al tablón de la base. Las piezas naranjas y verdes son las que forman la estructura del carro que se mueve en el eje de X. Las piezas rojas son las que forman la estructura del carro del eje Y. Las piezas azules conectan el perfil alar al carro del eje Y, permitiendo cambiar el ángulo de ataque.



A.4. Perfiles alares probados

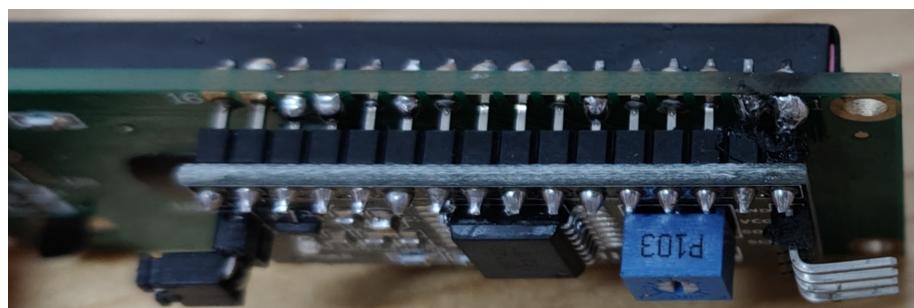
En la siguiente imagen pueden verse todos los perfiles alares que se han probado. Los de color amarillo son perfiles NACA con una forma más común. Los perfiles de color naranja son los perfiles NACA de formas menos comunes. El perfil de color azul es el mismo que utiliza el Airbus A380 (el avión de pasajeros más grande del mundo). Los de color blanco son los perfiles inventados a base de formas geométricas básicas.



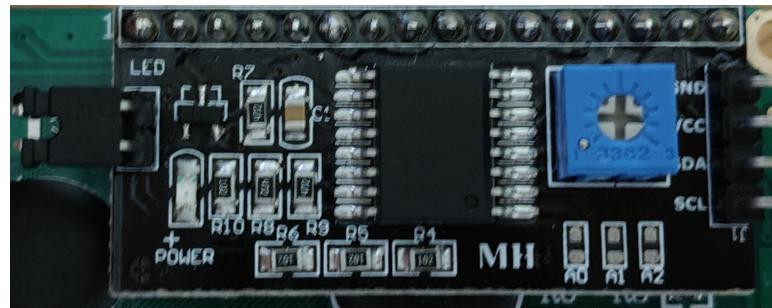
A.5. Fallos de electrónica

Varios de los componentes electrónicos venían desmontados. Al soldarlos cometí algunos errores que recojo en esta sección.

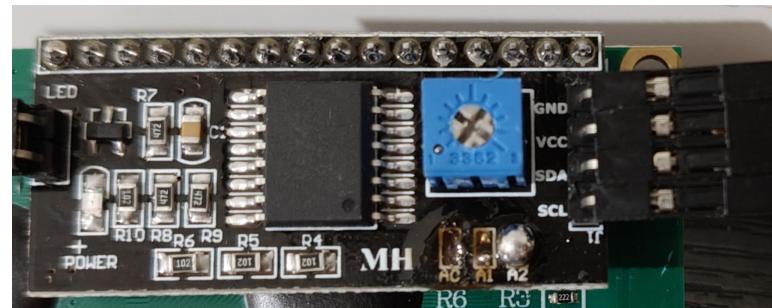
Este es el primer intento de soldar un I2C a su LCD. Añadí demasiado estaño que fluyó por las patillas y conectó varias entre ellas.



Para cambiar el puerto de un I2C hay que conectar con estaño alguna de las terminales marcadas como A0, A1 y A2. Este es el aspecto de un I2C nuevo:

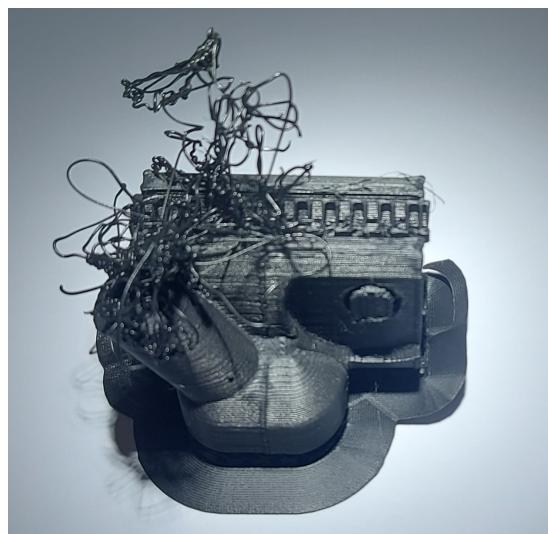


Primero lo intenté con A0, pero apliqué tanto calor que la terminal se derritió. Afortunadamente, siguió funcionando correctamente. Luego lo intenté con A2 con mejor resultado. Aunque el aspecto es muy malo, funciona correctamente:



A.6. Fallos de impresión y diseño

En la siguiente imagen hay una pieza en la que la impresora falló poco antes de acabar. Se aprecia claramente la capa de adherencia en la base y el soporte que se genera para apoyar la parte superior de las perforaciones. La maraña de filamento es lo que depositó la impresora una vez que dejó de añadir las capas ordenadamente.



Este es el primer perfil alar que imprimí. Al diseñar la ranura para el acople no me percate que debía llegar hasta el extremo para poderla introducir deslizando. Hice un corte para poder acoplarla y comprobar que éste era el único error de diseño.



A.7. Código de OpenSCAD para generar perfiles NACA

```
1 //Parametros de los perfiles NACA (MPTT):
2 //Primer digito / 100 = M
3 M = 0.09;
4 //Segundo digito / 10 = P
5 P = 0.40;
6 //Tercer y cuarto digitos / 10 = T
7 T = 0.14;
8
9 //Constantes del grosor del ala:
10 a0 = 0.2969;
11 a1 = -0.126;
12 a2 = -0.3516;
13 a3 = 0.2843;
14 a4 = -0.1015; //o -0.1036 para un borde de salida cerrado
15
16 //Anclajes
17 ejeP = 0.4; //Porcentaje para el eje del anclaje
18 ejeRadio = 5.2 / 2; //Radio del pasador
19 ranLong = 41; //Dimensiones de la ranura
20 ranAnch = 5.65;
21 ranAlt = 5.7;
22
23 //Precisiones
```

```

24 $fn = 500; // Precisión elementos predefinidos
25 N = 1000; // Precisión de la curva
26
27 //Tamaño total del ala:
28 longitud = 100;
29 altura = 150;
30
31 //Funciones auxiliares:
32
33 function inverso(xs) =
34   [for (i = [0:len(xs)-1]) xs[len(xs)-1-i] ];
35
36 function modulo(v) = sqrt(v[0]^2 + v[1]^2);
37
38 function unitario(v) = v / modulo(v);
39
40 //Funciones de la forma del perfil alar:
41
42 function comba(x) = x<P
43   ? M / P^2 * (2*P*x - x^2)
44   : M/(1-P)^2 * (1 - 2*P + 2*P*x - x^2);
45
46 function anchura(x) =
47   T/0.2 *(a0*x^0.5 + a1*x + a2*x^2 +a3*x^3 + a4*x^4);
48
49 function combaPendiente(x) = x<P
50   ? 2*M/P^2 * (P-x)
51   : 2*M/(1-P)^2 * (P-x);
52
53 function combaGradiente(x) = unitario([-combaPendiente(x),1]);
54
55 module NACA() {
56   pa = [ for (i = [0:N])
57     [i/N,comba(i/N)] + combaGradiente(i/N)*anchura(i/N)];
58   pab = [ for (i = [0:N])
59     [i/N,comba(i/N)] - combaGradiente(i/N)*anchura(i/N)];
60   pf = concat(pa, inverso(pab));
61   polygon(pf);
62 };
63
64 // Modelo completo
65
66 ejeX = ejeP * longitud;
67 ejeY = longitud*comba(ejeP);
68
69 ranX = ejeX - ranLong/2;
70 ranY = ejeY - ranAnch/2;
71 ranZ = altura - ranAlt;
72 ranC = [longitud, ranAnch, ranAlt+1];
73
74 difference() {
75   linear_extrude(altura) scale([longitud,longitud]) NACA();

```

```

76
77     translate([ejeX, ejeY, -1]) cylinder(h=altura+2, r=ejeRadio);
78     translate([ranX, ranY, -1]) cube(ranC);
79     translate([ranX, ranY, ranZ]) cube(ranC);
80 }

```

A.8. Código para controlar el Arduino

```

1 #include <HX711.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3
4 const int ESPERA_ARRANQUE_TURBINA = 3000;
5 const int ESPERA_APAGADO_TURBINA = 7000;
6 const int TIEMPO_MEDIDAS = 10000;
7
8 const double CORR_X = 50558.5/68;
9 const double CORR_Y = 49526.0/68;
10
11 const int SENSOR_X_DATO_PIN = 4;
12 const int SENSOR_X_SINC_PIN = 5;
13 const int SENSOR_Y_DATO_PIN = 2;
14 const int SENSOR_Y_SINC_PIN = 3;
15 const int BOTON_PIN = 6;
16 const int RELE_PIN = 7;
17
18 const int COLS = 16;
19 const int LECTURAS = 1;
20 const int ITERS = 3;
21
22 // 0123456789012345
23 const char BLANCOS[17] = "          ";
24
25 HX711 SENSOR_X;
26 HX711 SENSOR_Y;
27
28 LiquidCrystal_I2C LCD1(0x23, COLS, 2);
29 LiquidCrystal_I2C LCD2(0x27, COLS, 2);
30
31 void setup() {
32     pinMode(RELE_PIN, OUTPUT);
33     digitalWrite(RELE_PIN, LOW);
34     pinMode(BOTON_PIN, INPUT);
35
36     Serial.begin(57600);
37     SENSOR_X.begin(SENSOR_X_DATO_PIN, SENSOR_X_SINC_PIN);
38     SENSOR_Y.begin(SENSOR_Y_DATO_PIN, SENSOR_Y_SINC_PIN);
39
40     LCD1.init(); LCD2.init();
41     LCD1.backlight(); LCD2.backlight();
42     LCD1.clear(); LCD2.clear();
43     escribeAccion("PULSE BOTON");
44 }

```

```

45
46 bool activo = false;
47
48 void loop() {
49     int estadoBoton = digitalRead(BOTON_PIN);
50     if (estadoBoton == LOW) return;
51     LCD1.clear(); LCD2.clear();
52     escribeAccion("EMPEZANDO ANALISIS");
53     delay(2000);
54
55     int ns = 0;
56     long ts = 0;
57     double XSS = 0, YSS = 0, XSS2 = 0, YSS2 = 0;
58
59     for (int i = 0; i < ITERS; i++) {
60         Serial.print("Intento "); Serial.println(i);
61
62         escribeAccion("TARANDO SENSORES");
63         SENSOR_X.tare(); SENSOR_Y.tare();
64         SENSOR_X.set_scale(CORR_X); SENSOR_Y.set_scale(CORR_Y);
65
66         escribeAccion("ARRANCANDO TURBINA");
67         digitalWrite(RELE_PIN, HIGH);
68         int n = 0;
69         long t0 = millis();
70         while (millis()-t0 < ESPERA_ARRANQUE_TURBINA) {
71             n++;
72             float x = SENSOR_X.get_units(LECTURAS);
73             float y = -SENSOR_Y.get_units(LECTURAS);
74             escribeIteracion(n, millis()-t0);
75             escribeMedida("X", 0, n, x, 0);
76             escribeMedida("Y", 1, n, y, 0);
77         }
78
79         escribeAccion("TOMANDO MEDIDAS");
80         double xs = 0, ys = 0, xs2 = 0, ys2 = 0;
81         n = 0;
82         t0 = millis();
83         while (millis()-t0 < TIEMPO_MEDIDAS) {
84             n++;
85             float x = SENSOR_X.get_units(LECTURAS);
86             float y = -SENSOR_Y.get_units(LECTURAS);
87             xs += x; ys += y; xs2 += x*x; ys2 += y*y;
88             escribeIteracion(n, millis()-t0);
89             escribeMedida("X", 0, n, x, xs);
90             escribeMedida("Y", 1, n, y, ys);
91         }
92
93         ns += n; ts += millis() - t0;
94         XSS += xs; YSS += ys; XSS2 += xs2; YSS2 += ys2;
95         escribeIteracion(ns, ts);
96         escribeTotal("X", 0, ns, XSS, XSS2);

```

```

97     escribeTotal("Y", 1, ns, yss, yss2);
98
99     escribeAccion("APAGANDO TURBINA");
100    digitalWrite(RELE_PIN, LOW);
101    delay(ESPERA_APAGADO_TURBINA);
102
103    escribeAccion("PULSE BOTON");
104 }
105 }
106
107 void escribeAccion(const char* accion) {
108     Serial.println(accion);
109     limpiaLinea(LCD1, 0);
110     LCD1.print(accion);
111 }
112
113 void escribeIteracion(int n, long t) {
114     char buf[COLS+1];
115     saturalinea(buf, sprintf(buf, "I:%3i T:%2.3f", n, t/1000.0));
116     Serial.println(buf);
117     LCD1.setCursor(0,1);
118     //print_clear(LCD1, buf);
119     LCD1.print(buf);
120 }
121
122 void escribeMedida(const char* eje, int line, int n, float v, float s) {
123     char buf[COLS+1];
124     saturalinea(buf, sprintf(buf, "%s: %3.2f %3.2f", eje, v, s/n));
125     Serial.println(buf);
126     LCD2.setCursor(0,line);
127     LCD2.print(buf);
128 }
129
130 void escribeTotal(const char* eje, int line, int n, float s, float s2) {
131     char buf[COLS+1];
132     float m = s/n;
133     float dt = sqrt(s2/n - m*m);
134     saturalinea(buf, sprintf(buf, "%s: %3.2f %3.2f", eje, s/n, dt));
135     Serial.println(buf);
136     LCD2.setCursor(0,line);
137     //print_clear(LCD2, buf);
138     LCD2.print(buf);
139 }
140
141 void saturalinea(char* buf, int n) {
142     for (int i = n; i < COLS; i++) buf[i] = ' ';
143     buf[COLS] = '\0';
144 }
145
146 void limpialinea(LiquidCrystal_I2C& lcd, int linea) {
147     lcd.setCursor(0,linea);
148     lcd.print(BLANCOS);

```

```
149     lcd.setCursor(0,linea);  
150 }
```

A.9. Proceso de construcción

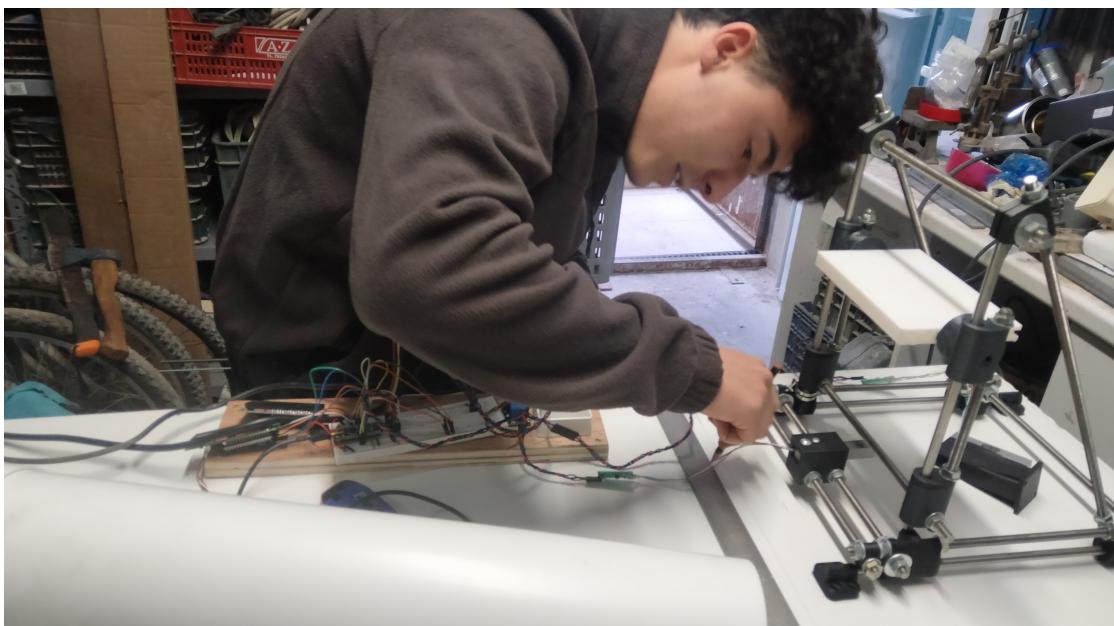
En la siguiente imagen se ve la impresora 3D haciendo una de las piezas.



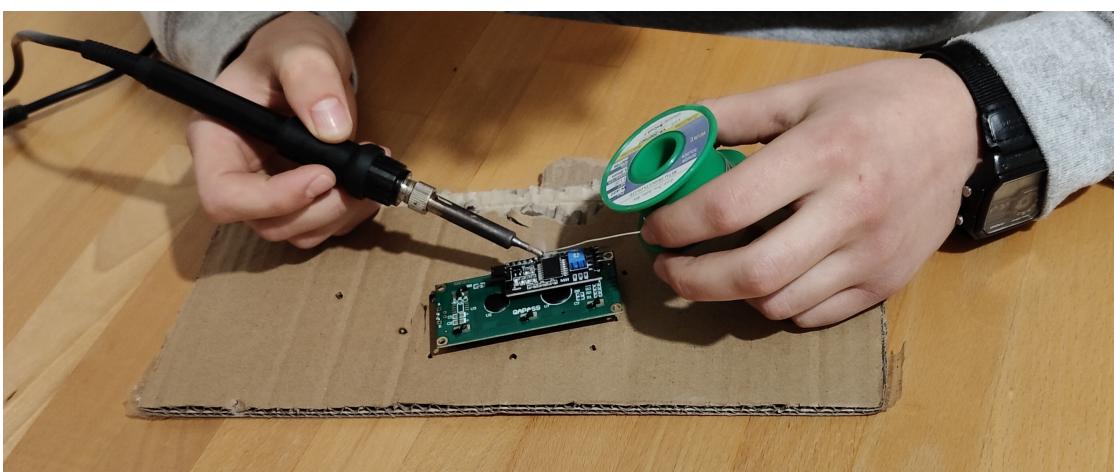
En estas imágenes estoy cortando la tabla de madera que hace de base y atornillando el chasis a la base.



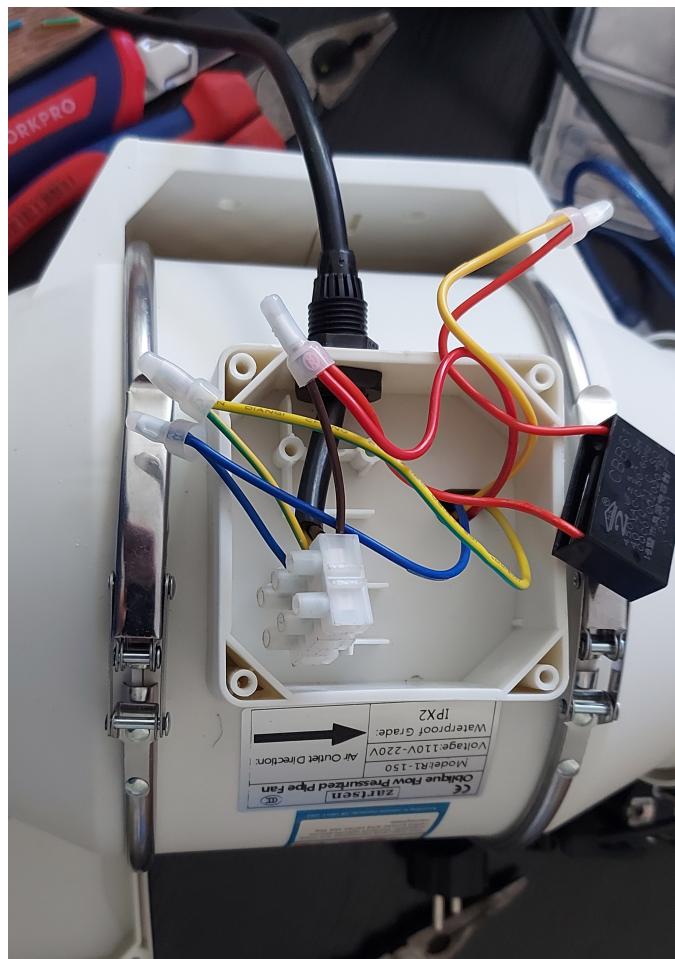
Aquí estoy haciendo medidas en la tabla para acoplar el resto del dispositivo.



En la siguiente imagen estoy soldando el I2C a la pantalla LCD encima de un cartón para que mi padre no me grite.



El cable de la turbina venía de fábrica con una clavija. Para poder conectarla al relé tuve que cambiarlo. En esta imagen se ve el cable que puse conectado a la alimentación de la turbina con una clema.



Índice de figuras

1.1. Túnel de viento construido en este proyecto	1
2.1. Boceto del dispositivo	2
2.2. Chasis desensamblado	3
3.1. NACA 5418, con sus elementos anotados	4
3.2. Entorno de desarrollo de OpenSCAD	6
3.3. Perfil simétrico NACA 0015 cortado por la mitad con Tinkercad	6
4.1. Boquilla nueva y usada	7
4.2. Fallo de impresión por atasco	8
5.1. Disposición de los rodamientos en las guías	11
5.2. Muestra de cómo las piezas imprimidas conectas las varillas	12
5.3. Modelo del acople del ala al carro vertical y del mecanismo de cambio de ángulo	13
5.4. Boquilla nueva y usada	13
5.5. Electrónica del dispositivo	14
5.6. Modelo de los soportes (en rojo) de los sensores (en gris)	15
5.7. Adaptador I2C del LCD	16
6.1. Sustentación y resistencia medidas en el túnel del viento	17

Bibliografía

Alzate, O. M. F. (s. f.). *Módulo HX711*. CodigoElectronica. [Consulta: enero 2025] http://codigoelectronica.com/blog/modulo-hx711#google_vignette

Arduino - home. (s. f.). [Consulta: enero 2025] <https://www.arduino.cc/>

Colaboradores de Wikipedia. (julio 2024). *Celda de carga*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. [Consulta: enero 2025] https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_carga

Colaboradores de Wikipedia. (septiembre 2024). *Puente de Wheatstone*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone

Colaboradores de Wikipedia. (diciembre 2024). *Desviación típica*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. [Consulta: enero 2025] https://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci%C3%B3n_t%C3%ADpica

Colaboradores de Wikipedia. (diciembre 2024). *Principio de Bernoulli*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. [Consulta: enero 2025] https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli

Colaboradores de Wikipedia. (enero 2025). *Leyes de Newton*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. [Consulta: enero 2025]

https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Newton#Tercera_ley_de_Newton_o_principio_de_acci%C3%B3n_y_reacci%C3%B3n

Impresora 3D Ender-3 S1 Pro. (s. f.). Creality-es. [Consulta: enero 2025]

<https://www.creality.com/es/products/creality-ender-3-s1-pro-fdm-3d-printer>

LiquidCrystal I2C. (noviembre 2015). Arduino Libraries. [Consulta: enero 2025]

<https://www.arduinolibraries.info/libraries/liquid-crystal-i2-c>

Medidas de seguridad de las monedas. (s. f.). Banco de España. [Consulta: enero 2025] <https://www.bde.es/wbe/es/areas-actuacion/billetes-monedas/monedas-euros/contenido/medidas-seguridad>

NACA 4 digit airfoil generator. (s. f.). [Consulta: enero 2025]

<http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

OpenSCAD. (s. f.). The Programmers Solid 3D CAD Modeller. [Consulta: enero 2025]

<https://openscad.org/>

RobTillaart. (s. f.). *GitHub - RobTillaart/HX711: Arduino library for HX711 24 bit ADC used for load cells and scales*. GitHub. [Consulta: enero 2025] <https://github.com/RobTillaart/HX711>

Tinkercad - From mind to design in minutes. (s. f.). Tinkercad. [Consulta: enero 2025]

<https://www.tinkercad.com/>