



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Diseño e implementación de un banco automatizado para  
el ensayo de microturbinas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Cheikh Waez, Firas

Tutor/a: Guardiola García, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial**

# **Diseño e implementación de un banco automatizado para el ensayo de microturbinas**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

AUTOR: Cheikh Waez, Firas  
Tutor: Guardiola García, Carlos  
CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

**Accroche**

Diseño de un banco de pruebas para turbinas

Destinado a facilitar su evaluación y análisis

Diseño mecánico, aerodinámico, eléctrico, control y sensórica

Adquisición de datos precisos y fiables

Se opera con una sencilla interfaz

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objeto del proyecto . . . . .	2
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Contexto Inicial . . . . .	2
1.4. Estructura del trabajo . . . . .	3
<b>2. Diseño Mecánico</b>	<b>4</b>
2.1. Croquis básico . . . . .	4
2.1.1. Requerimiento de Monitorización . . . . .	5
2.1.2. Requerimiento de Control . . . . .	5
2.1.3. Otros Requerimientos. . . . .	5
2.1.4. Limitación por técnicas de impresión 3D . . . . .	7
2.1.5. Limitación de potencia . . . . .	8
2.1.6. Limitación dimensional . . . . .	9
2.2. Construcción del Banco . . . . .	9
2.2.1. Distanciado . . . . .	9
2.2.2. Generador eléctrico de la turbina . . . . .	11
2.2.3. Caudalímetro . . . . .	12
2.2.4. Sensores de presión . . . . .	12
2.2.5. Sistema de adquisición y control . . . . .	13
2.2.6. Etapa de potencia . . . . .	14
2.2.7. Variador de Frecuencia . . . . .	16
2.2.8. Circuito del Rectificador . . . . .	16
2.2.9. Transformador de corriente . . . . .	17
2.2.10. Optimización del Aspirador . . . . .	17
<b>3. Diseño Aerodinámico</b>	<b>18</b>
3.1. Tendencias de Diseño . . . . .	18
3.2. Modelado CAD (Diseño Asistido por Computadora) . . . . .	19
3.3. Simulación computacional de la turbina . . . . .	19
3.4. Impresión en 3D de la turbina y ensayos mecánicos . . . . .	21
<b>4. Diseño Eléctrico</b>	<b>22</b>
4.1. Diseño y montaje de la eléctrica . . . . .	22
4.2. Elaboración de electrónica de potencia . . . . .	23
<b>5. Diseño Electrónico</b>	<b>24</b>
5.1. Montaje de la parte electrónica . . . . .	24
5.2. Programación de la parte electrónica . . . . .	25
5.2.1. Procesador . . . . .	25
5.2.2. FPGA . . . . .	28
5.3. Fuentes de Error . . . . .	30
5.4. Sistema de suma de valores para la FPGA . . . . .	31
5.4.1. Concepto . . . . .	31

5.4.2. Comparación entre los valores individuales y los valores suma . . . . .	33
5.5. Creación del programa de automatización . . . . .	34
5.6. Elaboración de una interfaz gráfica para el usuario . . . . .	36
<b>6. Resultados</b>	<b>37</b>
6.1. Análisis de resultados obtenidos . . . . .	37
<b>7. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>40</b>
<b>8. Presupuesto</b>	<b>40</b>
8.1. Costes de personal . . . . .	41
8.2. Costes de software . . . . .	41
8.3. Costes de material . . . . .	41
8.4. Presupuesto total . . . . .	41
<b>9. Anexo</b>	<b>42</b>
9.1. Fotos . . . . .	42
9.2. Planos . . . . .	42
9.3. Código MATLAB . . . . .	46
9.3.1. Código de la identificación matemática del modelo experimental . . . . .	46
9.3.2. Código para graficar los datos de masa y rpm . . . . .	47
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>

## Resumen

El proyecto abarca el diseño de detalle de un banco de ensayo para la caracterización de microturbinas. Este banco está destinado a facilitar la evaluación y análisis de microturbinas en condiciones controladas, permitiendo la adquisición de datos precisos y fiables. El sistema cuenta con un variador de frecuencia para controlar el gasto de aire en la turbina a ensayar, así como una carga variable para la disipación de la energía producida por la turbina. El trabajo cubre tanto el diseño mecánico como el aerodinámico, el eléctrico y el sistema de control y sensórica. El banco busca automáticamente los valores de las turbinas y los guarda. Se opera con una sencilla interfaz, proporcionando una herramienta valiosa para la evaluación de microturbinas a cualquier usuario.

## Abstract

The project encompasses the detailed design of a test bench for the characterization of microturbines. This bench is intended to facilitate the evaluation and analysis of microturbines under controlled conditions, allowing for the acquisition of precise and reliable data. The system includes a frequency converter to control the air flow in the turbine being tested, as well as a variable load for dissipating the energy produced by the turbine. The work covers mechanical, aerodynamic, electrical design, and the control and sensor system.

The bench automatically searches for the values of the turbines and saves them. It operates with a simple interface, providing a valuable tool for microturbine evaluation to any user.

## Agradecimientos

Gracias a Allah en primera y última instancia. Agradecimientos mi familia por el apoyo, y a mi tutor por la oportunidad de hacer el mejor proyecto.

## Índice de figuras

2.	Vista frontal banco de ensayos. Se aprecian todos los componentes que incluye el banco.	1
3.	Vista en caballera del banco . . . . .	1
4.	Croquis de la estructura general del banco de ensayos. . . . .	4
5.	Estructura Metálica . . . . .	6
6.	Ejemplo de piezas reemplazables . . . . .	6
7.	Placa metálica con agujeros . . . . .	6
8.	Aspirador TechnoCleaner 20 P [8] . . . . .	9
9.	Ejemplo de tubos de acrílico . . . . .	9
10.	Croquis de distancias . . . . .	10
11.	Motor sin escobillas COMPACT 260Z R7004 [9] . . . . .	11
12.	Medidor de gasto Bosch HFM 2 - 0 280 217 102 . . . . .	12
13.	Curva 1 de calibración gasto másico-voltaje. . . . .	12
14.	Sensor de presión diferencial 03L 906 051B [14] . . . . .	13
15.	Configuración para los sensores de presión . . . . .	13
16.	Sistema de adquisición y control - MyRio 1900 [5] . . . . .	14
17.	Etapa de potencia - Infineon BTN8982TA . . . . .	15
18.	PWM generado por la etapa de potencia . . . . .	15
19.	Resistencias de potencia . . . . .	15
20.	Montaje de las resistencias . . . . .	15
21.	Variador de Frecuencia [16] . . . . .	16
22.	Efecto del Condensador en la señal . . . . .	16
23.	Placa del Rectificador . . . . .	16
24.	Periodo del pulso de la turbina . . . . .	17

25.	Configuraciones de la aspirador . . . . .	18
26.	Respuesta en frecuencia de las configuraciones del aspirador . . . . .	18
27.	Diseño CAD del estator . . . . .	19
28.	Diseño CAD del rotor . . . . .	19
29.	Rotor mallado para la simulación con las fuerzas aplicadas . . . . .	20
30.	Desplazamientos en milímetros . . . . .	20
31.	Piezas de tolerancia . . . . .	21
32.	Rotor mallado para la simulación con las fuerzas aplicadas . . . . .	21
33.	Montaje de la turbina con cuatro piezas independientes . . . . .	21
34.	Ensayo de fuerza de rotura de los álabes . . . . .	22
35.	Croquis de la eléctrica del banco . . . . .	23
36.	Croquis de la electrónica de potencia del banco . . . . .	24
37.	Montaje y Resultado de la electrónica de potencia del banco . . . . .	24
38.	MyRio montado con sus respectivos cables . . . . .	25
39.	Esquema de las conexiones del MyRio de los puertos A y B . . . . .	25
40.	Código del procesador a tiempo real . . . . .	26
41.	Código del bucle principal . . . . .	27
42.	Bucle rápido de la de la FPGA . . . . .	29
43.	Bucle de la FPGA de un solo tick y debajo el bucle lento . . . . .	29
44.	Señal a evitar aplicando el Anti-Bounce en la FPGA [17] . . . . .	31
45.	Croquis de la lectura de 256 valores de la FPGA sincronizada con el Duty Cycle. . . . .	32
46.	Comparación de diferencia entre medidas y varianzas . . . . .	33
47.	Diferencia entre valores medios y crudos de rpm . . . . .	34
48.	Entrada de escalón y salida del sistema experimental . . . . .	36
49.	Lugar de las raíces del modelo matemático . . . . .	36
50.	Interfaz gráfica para el usuario del banco . . . . .	37
51.	Durante el funcionamiento, el PID se encarga de contener los valores dentro de los límites de las tolerancias . . . . .	38
52.	Puntos de funcionamiento estable obtenidos por el sistema automático . . . . .	38
53.	Capturas de la interfaz cuando se encuentra fuera de los límites . . . . .	39
54.	Diferentes tipos de saltos para diferentes regímenes de funcionamiento . . . . .	39
55.	Captura del sistema automático en pleno funcionamiento. Se aprecian dos saltos en un lapso menor a cinco segundos. . . . .	40
56.	Vista Trasera del banco, se puede observar el cableado por debajo de la placa metálica, la turbina, los sensores de presión y el aspirador que general el flujo . . . . .	42
57.	Circuito electrónico del Rectificador . . . . .	44

## Índice de cuadros

1.	Propiedades del PLA [6] . . . . .	7
2.	Propiedades de la Resina Fotopolimerizable [6] . . . . .	8
3.	Propiedades del PA12 (Nylon 12) [6] . . . . .	8
4.	Especificaciones del aspirador TechnoCleaner 20 P [7] . . . . .	8
5.	Especificaciones del motor Graupner COMPACT 260Z R7004 [10] . . . . .	11
6.	Especificaciones del medidor de gasto Bosch HFM 2 - 0 280 217 102 [4] . . . . .	12
7.	Especificaciones del controlador BTN8982TA [13] . . . . .	14
8.	Costes de personal . . . . .	41
9.	Costes de software . . . . .	41
10.	Costes de material . . . . .	41
11.	Presupuesto total . . . . .	41

## Lista de Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$T_{\text{entrada}}$	Temperatura en la entrada ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{salida}}$	Temperatura en la salida ( $^{\circ}\text{C}$ )
$P_{\text{entrada}}$	Presión en la entrada (Pa)
$P_{\text{salida}}$	Presión en la salida (Pa)
$F_{\text{máx}}$	Fuerza máxima (N)
$\dot{m}$	Caudal másico (kg/s)
$W_{\text{turbine}}$	Potencia generada por la turbina (W)
$n_{\text{turbine}}$	Velocidad de rotación (rpm)
$K_p$	Constante de proporcionalidad del PID
$K_i$	Ganancia integral del PID
$K_d$	Ganancia derivativa del PID
$DC$	Ciclo de trabajo ("Duty Cycle") (%)
Hz	Hertz
V	Voltios
rpm	Revoluciones por minuto
PWM	Modulación de ancho de pulso
$2^n$	Potencia de 2 en binario
$2\pi$	Constante $2\pi$
$\sqrt{\cdot}$	Raíz cuadrada
$\pm$	Más/menos
RMS	Raíz cuadrática media
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
mbar	Milibares
$I_{DS}$	Corriente de drenaje
$\rho$	Densidad del material
$E$	Módulo de Young
$T_{\text{max}}$	Temperatura máxima en servicio



# 1. Introducción

Para facilitar la comprensión del lector, se presentan las figuras 2 y 3, donde se muestra el banco de pruebas montado.

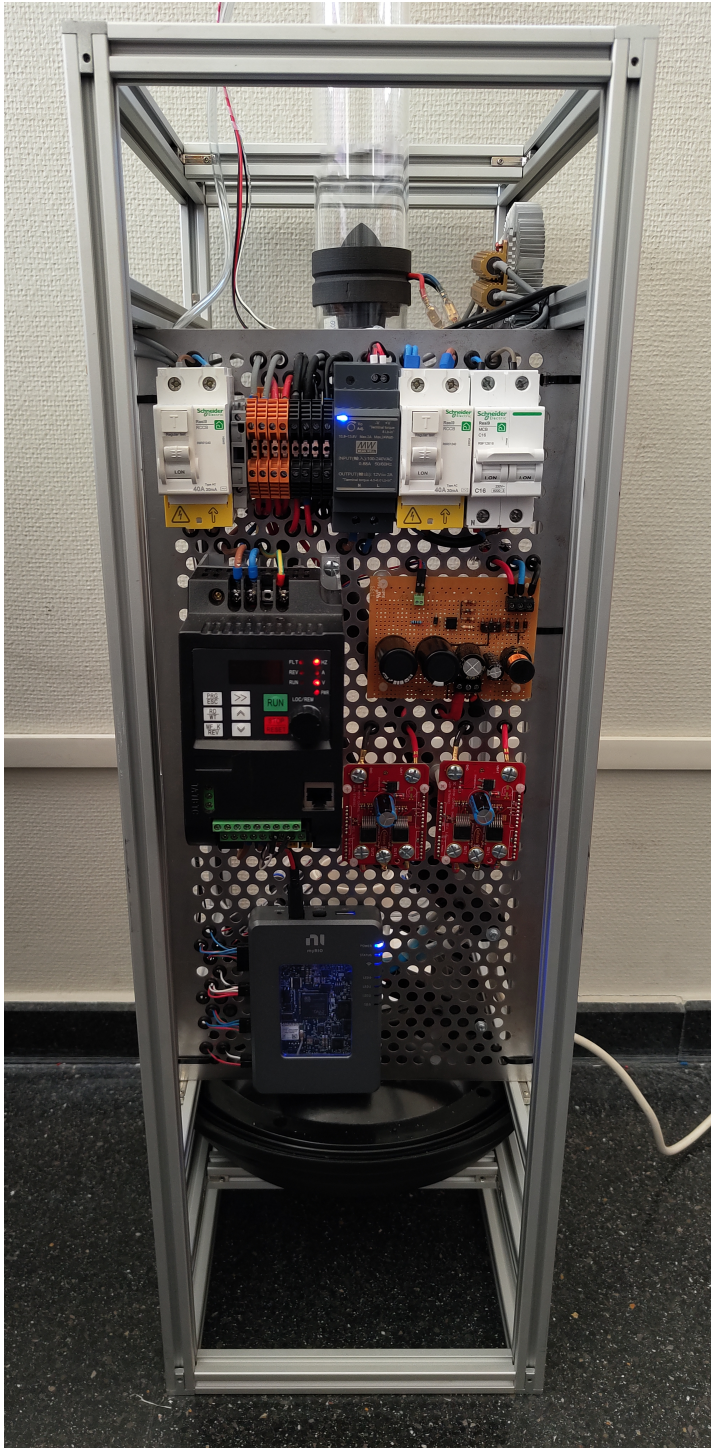


Figura 2: Vista frontal banco de ensayos. Se aprecian todos los componentes que incluye el banco.

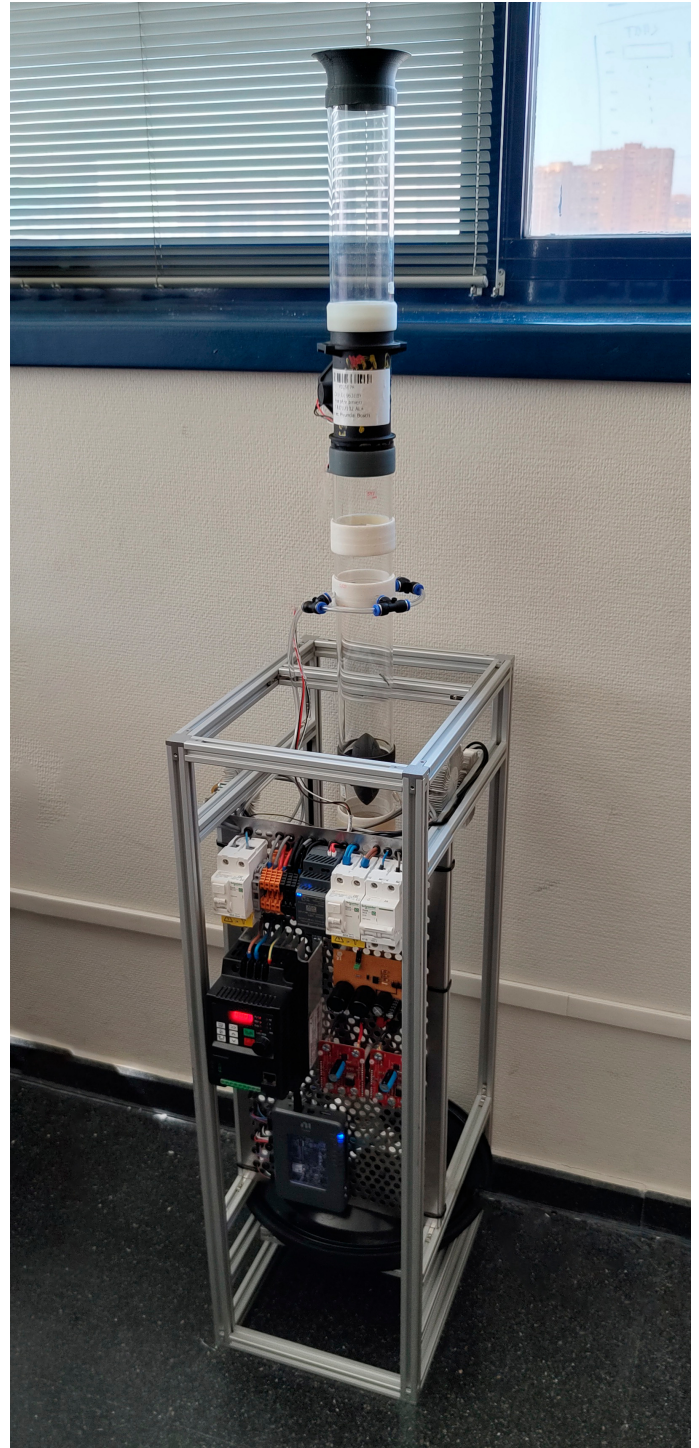


Figura 3: Vista en caballera del banco

## 1.1. Objeto del proyecto

El objetivo principal del TFG es el desarrollo de un banco de pruebas automatizado para micro-turbinas. Este proyecto busca proporcionar una plataforma accesible para estudiantes, que les permita estudiar y entender diversos desafíos técnicos como la monitorización y control de la parte eléctrica, la optimización del rendimiento, el comportamiento fuera de diseño y la incertidumbre de los sistemas instrumentales.

El trabajo se estructura en varias secciones que abordan diferentes aspectos del diseño y la implementación del banco de ensayos. Estas secciones incluyen el diseño mecánico, aerodinámico, eléctrico y electrónico, así como la programación necesaria para la automatización y el control del sistema.

## 1.2. Motivación

Las técnicas de impresión aditiva han revolucionado las posibilidades en investigación y desarrollo. Éstas son especialmente útiles para fabricar componentes pequeños, únicos y a medida, siendo más asequibles que otros métodos de fabricación. En cambio, la impresión por inyección de plástico requiere moldes que pueden costar miles de euros, lo que hace que la impresión aditiva sea muy accesible para la investigación, donde se necesitan pocas piezas para los prototipos.

Por otra parte, los sistemas de propulsión híbridos, que permiten tanto combustión interna como eléctrica, están despertando un gran interés en aplicaciones aeronáuticas. Además, están surgiendo nuevas tecnologías como el e-booster, que es una turbina que recupera la energía del escape de los coches de Fórmula 1, y la convierte en electricidad. Esta tecnología aún no se ha implementado en la producción de coches debido a su complejidad, aun cuando esto sería un gran paso para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Unión Europea. Su complejidad radica en monitorizar todos los componentes y contar con un sistema de control eficaz, lo que representa un desafío enorme.

El proyecto está alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- **ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante:** La optimización de microturbinas mejora la eficiencia en la generación de energía y promueve el uso de fuentes renovables.
- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura:** Desarrolla tecnología avanzada para la caracterización de microturbinas, fomentando la innovación industrial.
- **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Contribuye a sistemas de energía más sostenibles, apoyando el desarrollo de comunidades y ciudades sostenibles.
- **ODS 12: Producción y Consumo Responsables:** Fomenta el uso eficiente de recursos energéticos y reduce el desperdicio de energía.
- **ODS 13: Acción por el Clima:** Mejora la eficiencia de las microturbinas, reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero y apoyando la lucha contra el cambio climático.

En relación a esto, el proyecto actual nace de la necesidad tecnológica de la industria y propone un banco de ensayos asequible para los estudiantes. Esto les permitirá estudiar y aprender sobre sus retos y dificultades, como los desafíos de la monitorización y control de la parte eléctrica, la optimización y el comportamiento fuera de diseño o la incertidumbre de los sistemas instrumentales.

## 1.3. Contexto Inicial

El presente proyecto surge como una evolución y mejora de una iniciativa anterior desarrollada por otro estudiante de ingeniería aeroespacial [1]. El proyecto actual presenta varias mejoras significativas en comparación con el proyecto anterior de Grasa Martínez. Aquí se detallan los principales aspectos:

1. **Portabilidad y Operatividad:** El nuevo banco de ensayos es más fácil de transportar y operar, mejorando significativamente la accesibilidad y el uso en diferentes entornos y escenarios.

2. **Automatización y Precisión:** Se ha incorporado un sistema automatizado para el control en bucle cerrado. Esto minimiza la necesidad de intervención manual, aumentando la precisión en la adquisición de datos y mejorando la eficiencia general del proceso de ensayo.
3. **Diseño y Organización:** Los sistemas del banco de ensayos han sido reorganizados de manera más eficiente y compacta. Esta mejora facilita tanto la operación como el mantenimiento del banco, optimizando el espacio y reduciendo el desorden.
4. **Software e Interfaz de Usuario:** Se ha desarrollado una interfaz de usuario intuitiva que simplifica la adquisición y análisis de los datos de funcionamiento. Este software permite a los usuarios interactuar fácilmente con el sistema, mejorando la experiencia del usuario y la eficacia de los ensayos.

## 1.4. Estructura del trabajo

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo del banco de ensayos automático para microturbinas. Para lograrlo, he propuesto el siguiente orden de trabajo, que a su vez se divide en 4 secciones:

### Diseño Mecánico

- Creación de un croquis básico que cumpla con las necesidades básicas del banco de ensayos. Esto define sus necesidades de monitorización. Estableciendo sus capacidades y limitaciones.
- Modelado y construcción de la arquitectura del banco en función de sus dimensiones y conveniencia para el usuario. Teniendo en cuenta que puede verse limitada la precisión por un tamaño más reducido.

### Diseño Aerodinámico

- Modelado y simulación de la turbina en entorno CAD (Diseño Asistido por Computadora).
- Impresión en 3D de la turbina y sus posteriores ensayos mecánicos.

### Diseño Eléctrico

- Diseño y montaje de la eléctrica, con sus debidos estándares de seguridad para el operador.
- Elaboración de la electrónica de potencia, para la disipación de la energía generada por la turbina.

### Diseño Electrónico

- Selección de componentes, buscando un balance entre precio y precisión. Estableciendo la incertidumbre instrumental y la potencia máxima del sistema.
- Montaje de la parte electrónica, con su correspondiente sistema de adquisición, sistema de control y monitorizado. Esto controlará tanto la fluidodinámica: medida de gasto y presión; como la parte eléctrica: generación eléctrica y su disipación.
- Programación del controlador, y a su vez la elaboración de una interfaz que permita al usuario adquirir los datos de funcionamiento para su análisis.
- Creación del programa que permita la automatización para el control en bucle cerrado y facilitar la adquisición de datos.

## Conclusiones

- Análisis de resultados obtenidos.
- Consideraciones sobre la posibilidad de ampliación y mejora del banco.

Una vez enumerados los objetivos, procedo a explicar detalladamente cada parte de ellos en su orden correspondiente.

## 2. Diseño Mecánico

El diseño mecánico incluye todos los aspectos relacionados con las dimensiones, el material y la forma que pueden afectar al banco.

### 2.1. Croquis básico

Como sucede en otro tipo de instalaciones, antes de escoger el equipamiento o comenzar la construcción, se han de definir las capacidades y limitaciones necesarias, en función del tipo de ensayos que se pretendan conseguir.

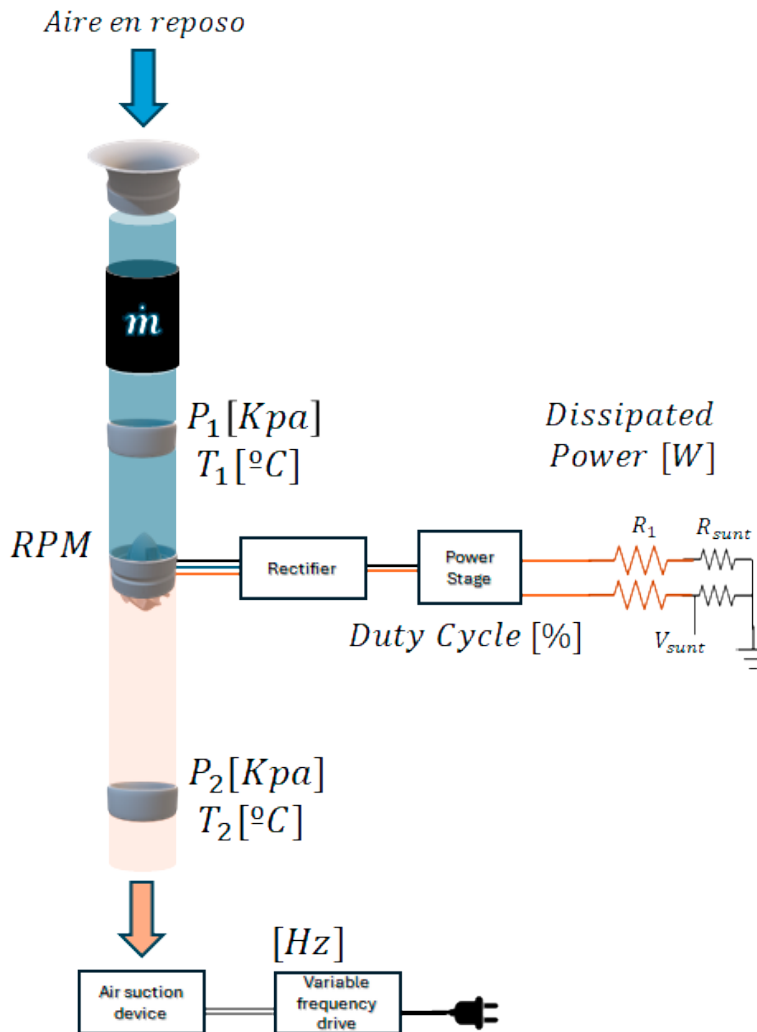


Figura 4: Croquis de la estructura general del banco de ensayos.

### 2.1.1. Requerimiento de Monitorización

El funcionamiento de una turbina como la que vamos a usar, con sus parámetros geométricos fijos, viene dado por diferentes variables:

- $f_{\text{giro}}[Hz]$  : Frecuencia de giro en revoluciones por minuto .
- $\dot{m}[kg/h]$  : El gasto másico trasegado, que será igual a lo largo del tubo.
- $T_{\text{entrada}}[^{\circ}C]$   $T_{\text{salida}}[^{\circ}C]$  : Condiciones de temperatura del aire en la entrada y salida de la turbina.
- $P_{\text{entrada}}[kPa]$   $P_{\text{salida}}[kPa]$  : Condiciones de presión del aire en la entrada y salida de la turbina.
- $\dot{W}[W]$  : Potencia generada por la turbina.

Suman un total de 7 variables a medir para poder caracterizar la turbina. Midiendo estos puntos a lo largo de toda la curva de funcionamiento, podremos sacar información muy útil de la turbina para poder compararla con otras, haciendo uso de parámetros adimensionales.

### 2.1.2. Requerimiento de Control

El requerimiento de control surge de la necesidad de someter la turbina a sus diferentes puntos de operación y así poder recorrer el mapa de funcionamiento. Para ello el control de dos variables diferentes es fundamental. Para lograr esto, se pueden variar diversos pares de parámetros, obteniendo diferentes mapas con cada par de variables.

En este caso, como se trata de turbinas impresas en 3D su temperatura máxima queda limitada. Por lo que nuestra  $T_{\text{entrada}}$  es fija a la temperatura del lugar de ensayo. Por otro lado, las condiciones de presión de entrada en nuestro caso van a ser las mismas del aire de la sala de ensayos. En esta configuración,  $P_{\text{entrada}}$  va a ser la presión atmosférica. Teniendo estos dos parámetros fijos, nos quedan las siguientes variables:  $\dot{W}$  ,  $f_{\text{giro}}$  ,  $P_{\text{salida}}$  ,  $T_{\text{salida}}$  y  $\dot{m}$

A partir de las ecuaciones de conservación se puede deducir un sistema de ecuaciones. Operando, se llega a un sistema con dos grados de libertad. Para ello, es habitual elegir  $f_{\text{giro}}$  y  $\dot{m}$  por lo que estos se convertirán en los grados de libertad del banco.

Una forma de recorrer el mapa es fijando el régimen de giro (por ejemplo 5000 rpm) y recorrer todo el rango de caudal para ese régimen, guardando todas las variables de funcionamiento. En el siguiente paso, se ajusta el régimen (por ejemplo 6000 rpm) recorriendo nuevamente todo el rango de caudales. De esta forma salen los mapas bidimensionales de funcionamiento que buscamos.

Actualmente, existen muchas industrias donde el mapeo se hace de forma manual. En este estudio se propone buscar un sistema automático. Y para ello será necesario incluir un sistema de control en bucle cerrado que busque automáticamente los valores prefijados.

### 2.1.3. Otros Requerimientos.

#### Flexibilidad

También, se deben considerar el tamaño de la instalación, de forma que tenga un tamaño compacto pero ofreciendo al mismo tiempo cierta flexibilidad o facilidades para realizar recambios o trasladar el banco. Por ello se ha optado por la utilización de una estructura esqueleto metálica que permite una gran flexibilidad en la construcción.

A nivel de componentes, es idóneo que sea lo más sencillo posible. Sobre todo para poder hacer cambios si fuera necesario. Para facilitar el cambio entre diferentes diseños de turbina, se ha diseñado de forma que todas las piezas fueran reemplazables. Se puede quitar fácilmente cualquier pieza sin necesidad de atornillar, pero se mantienen juntas herméticamente por sus ajuste en las tolerancias.



Figura 5: Estructura Metálica

### Operatividad

Para facilitar la operación del banco, este debe incluir los sistemas de adquisición, tanto de la parte eléctrica (cables, transformación de corriente...) como de las partes mecánicas necesarias (tubos de presión...) todo para que la operación con el banco sea lo más sencilla posible. Siendo compacto, ordenado y con posibilidad de recambio. En esta dirección, se ha optado por una placa, como la de la figura 7, con muchos puntos para poder pasar los cables por debajo.



Figura 6: Ejemplo de piezas reemplazables

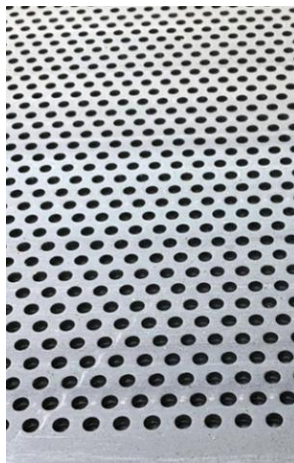


Figura 7: Placa metálica con agujeros

### Seguridad

El banco tendrá componentes de alta y baja tensión, por lo que hay que componerlo de forma que se garantice la seguridad de los componentes y del operador. Para conseguirlo, se han implementado una serie de sistemas de seguridad en la parte eléctrica, y sistemas de aislamiento para evitar el contacto con la estructura. El banco tiene dos diferenciales de corriente para casos de desviación de la corriente. Uno a la entrada y otro tras el variador de frecuencia, ya que este genera su propia corriente. Además, el banco en su totalidad ha sido conectado a tierra a través de un tornillo en la parte metálica de la estructura.

#### 2.1.4. Limitación por técnicas de impresión 3D

El material empleado para la impresión de la turbina es algo que va a ser de gran importancia a lo largo de todo el proyecto. Hay que tener en cuenta las tolerancias de impresión de cada tipo de impresión para las piezas más precisas, como pueden ser las piezas aerodinámicas. Ese tipo de detalles son difíciles de reflejar en cualquier proceso de impresión 3D. Aquí se reflejan las diferentes opciones existentes:

- PLA

Este poliéster termoplástico, con buenas propiedades mecánicas, es común en la impresión 3D. Ofrece ventajas como bajo coste, facilidad de uso y es reciclable, lo que es bueno para los ODS. Sin embargo, su baja temperatura de operación limita el uso de sistemas de calentamiento. Juntando esto con una alta elongación bajo cargas, y muy altas tolerancias en la impresión, obliga a establecer regímenes máximos para evitar tensiones por fuerzas centrífugas y aumentar mucho la distancia de precaución (tolerancia) entre el diseño y la pieza real.

Esto hace que no sea adecuado para componentes precisos o sujetos a fuerzas como turbinas. Sin embargo, su bajo costo lo hace útil para soportes.

Parámetro	Valor
Densidad ( $\rho$ )	1250 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (E)	3,3-3,6 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,38-0,4
Límite elástico (LE)	55-70 MPa
Tensión de rotura ( $\sigma_R$ )	50-70 MPa
Tensión de rotura a compresión ( $\sigma_R$ )	66-86 MPa
Tensión de rotura a fatiga ( $\sigma_F$ )	22-27 MPa
Temperatura de fusión ( $T_F$ )	145-177 °C
Temperatura de transición vítrea ( $T_V$ )	52-60 °C
Temperatura máxima en servicio ( $T_{max}$ )	45-55 °C

Cuadro 1: Propiedades del PLA [6]

- Resina fotopolimerizable

La resina es un material innovador en la impresión 3D ya que permite que la precisión sea mucho más alta. La distancia entre capas puede llegar a ser tan solo de 0,01 milímetros por lo que para piezas precisas puede ser ideal.

En las primeras piezas, el borde de fuga del perfil aerodinámico acababa completamente en punta, afilado como un cuchillo, lo que hacía que fuera muy frágil, ya que las resinas tienden a ser algo quebradizas. Esto, sumado a los soportes necesarios para su impresión, acaba por romper completamente su pieza o convertirla en defectuosa para la aerodinámica. Aún así, su facilidad de impresión la hizo fundamental para prototipos en este proyecto.

Parámetro	Valor
Densidad ( $\rho$ )	1150-1300 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (E)	1,5-2,8 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3-0,4
Límite elástico (LE)	30-70 MPa
Tensión de rotura ( $\sigma_R$ )	30-60 MPa
Tensión de rotura a compresión ( $\sigma_R$ )	50-80 MPa
Tensión de rotura a fatiga ( $\sigma_F$ )	15-30 MPa
Temperatura de degradación térmica	200-300 °C
Temperatura de transición vítrea (TV)	90-100 °C
Temperatura máxima en servicio ( $T_{max}$ )	60-70 °C

Cuadro 2: Propiedades de la Resina Fotopolimerizable [6]

- Sintetizado por láser de nailon

En el sintetizado no hay soportes, esto evita uno de los defectos de las anteriores técnicas. Por ejemplo, con los bordes de fuga de las palas de la turbina. Además, es igual de preciso que la resina y es mucho menos quebradizo. Por lo que se ha decidido que el diseño final sea con este material, a pesar de su precio más elevado.

Parámetro	Valor
Densidad ( $\rho$ )	970-990 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (E)	1.5 - 1.8 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0.34
Límite elástico (LE)	48-50 MPa
Tensión de rotura ( $\sigma_R$ )	48-52 MPa
Tensión de rotura a compresión ( $\sigma_R$ )	60-65 MPa
Tensión de rotura a fatiga ( $\sigma_F$ )	30-35 MPa
Temperatura de fusión ( $T_F$ )	178-182 °C
Temperatura de transición vítrea ( $T_V$ )	40-45 °C
Temperatura máxima en servicio ( $T_{max}$ )	95-105 °C

Cuadro 3: Propiedades del PA12 (Nylon 12) [6]

### 2.1.5. Limitación de potencia

El banco debe funcionar en una red eléctrica común. Esto limita la potencia máxima del generador de flujo, que es básicamente un aspirador común modificado para minimizar las pérdidas. Esto limita el gasto máximo que se puede tener. Lo que está relacionado con la limitación de velocidad del flujo.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación	220-240 V
Potencia nominal	1100 W
Potencia máxima	1200 W
Depresión máxima	190 mbar
Gasto volumétrico máximo	190 m <sup>3</sup> /h
Diámetro de la base	300 mm
Altura	400 mm
Diámetro de la sección de entrada	60 mm

Cuadro 4: Especificaciones del aspirador TechnoCleaner 20 P [7]

El aspirador de aire solo tiene una velocidad, dado que tiene un motor asíncrono que se conecta a



la corriente común, que suele rondar los 50Hz. Para poder disponer del grado de libertad que se ha comentado anteriormente, se debe de poder variar el caudal de este a voluntad. Esto se puede hacer de diferentes formas. Una de ellas puede ser el uso de una válvula de sobre presión y otra de fuga. Sin embargo, la opción más conveniente es instalar un variador de frecuencia que permita suministrar la potencia que nos convenga en cada momento.

Este variador de frecuencia debe ser manipulable por el sistema de control electrónico.



Figura 8: Aspirador Techno-Cleaner 20 P [8]



Figura 9: Ejemplo de tubos de acrílico

### 2.1.6. Limitación dimensional

La elección del material para el tubo del flujo será acrílico, por su resistencia y transparencia. Para la elección de las dimensiones de éste, hay que hacer una decisión de compromiso.

Si se hace el diámetro del tubo demasiado pequeño, la mayoría de las pérdidas serán aerodinámicas, debido a la capa límite y el rozamiento del flujo. Para hacer unos cálculos rápidos, si se tiene en cuenta que del diámetro interior del tubo se reservan 2 mm para tolerancias, otros 30 mm para el motor eléctrico, que va insertado en el interior de la turbina, obtendríamos un diámetro mínimo de 32mm. Sin embargo si fuera demasiado ancho, la velocidad del flujo decaería, lo que reduciría mucho la velocidad de rotación de la turbina. Esto implicaría que fuese difícil recuperar mucha potencia de la turbina.

Entre los valores mínimos y máximos se encuentra 60mm de diámetro externo que corresponde a 56 mm de diámetro interno. Obteniendo unos álabes de 12 milímetros de altura, lo que es sigue siendo considerablemente bajo pero permite tener ensayos con velocidad aceptable. Una altura tan pequeña corresponderá con pérdidas muy altas, lo que es habitual en turbomáquinas tan compactas.

## 2.2. Construcción del Banco

En este apartado vamos a detallar la materialización del banco. Tanto de la estructura final como de los componentes específicos que se van a utilizar. Para la selección de equipamiento, ha de haber un equilibrio entre calidad de precisión y precio. En la siguiente sección se justifica el uso de cada componente.

### 2.2.1. Distanciado

Existen unas recomendaciones estandarizadas para las distancias mínimas, aguas arriba y aguas abajo, de una turbomáquina, como las de ISO 5167 [2] y ASME PTC 19.5 [3], se basan en pruebas y estudios que han demostrado ser efectivas para estabilizar el flujo de aire y obtener mediciones precisas.

Es importante tener en cuenta que estas recomendaciones son generales y que pueden variar dependiendo de la aplicación específica y de las características de la turbomáquina. En algunos casos, puede

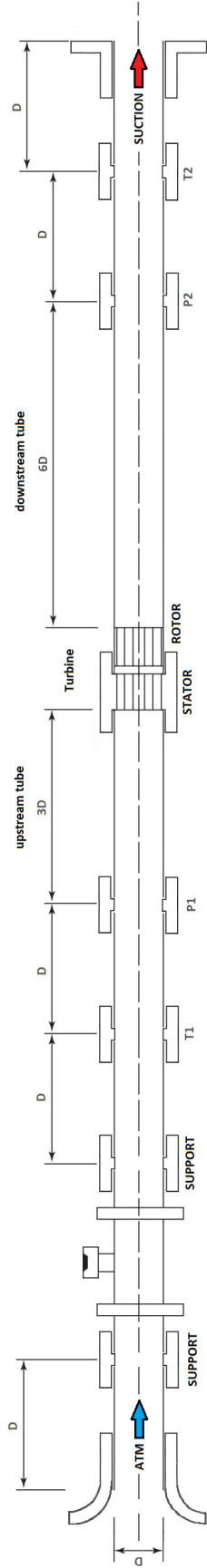


Figura 10: Croquis de distancias

ser necesario realizar pruebas adicionales para determinar la distancia óptima entre la turbomáquina y el dispositivo de medición.

Luego, la distancia exacta depende de diversos factores, pero para un sensor de presión diferencial como el que tendremos en el banco, el 03L 906 051B, se suele recomendar una distancia entre 5 y 10 diámetros de tubería aguas abajo de la turbomáquina.

En cuanto a aguas abajo de los sensores, se ha puesto un solo diámetro ya que estos no perturban el flujo apenas.

En la imagen del croquis se muestran las distancias elegidas para cada segmento.

### 2.2.2. Generador eléctrico de la turbina

El generador, tiene la crucial misión de transformar la energía cinética del flujo de aire en electricidad. Éste, es un motor síncrono sin escobillas, que actúa como generador si se le induce una fuerza externa. Estos motores son muy compactos, lo que es necesario como hemos comentado anteriormente.

Un aspecto fundamental en su diseño es la integración física con la turbina. En este proyecto se ubica el generador en el interior del tambor de la turbina, fijándolo a este mediante tornillos. De esta manera, se simplifica la construcción del banco de pruebas. Sin embargo, puede haber otras configuraciones, como por ejemplo, a través de ejes que permitan alejar al generador de la turbina, en caso de que esto fuera necesario para futuros proyectos.

Se ha elegido el motor COMPACT 260Z R7004 de la marca Graupner. Las especificaciones técnicas del motor se detallan en la Tabla.

Parámetro	Valor
Rango de voltaje	7,4-11,1 V
KV	1100 RPM/V
Intensidad máxima	9 A
Potencia máxima	108 W
Número de devanados	12
Pares de polos	7
Diámetro	29 mm
Longitud	26 mm
Peso	48 g
Diámetro del eje	3,17 mm
Longitud libre del eje	12 mm
Rendimiento máximo	0,77

Cuadro 5: Especificaciones del motor Graupner COMPACT 260Z R7004 [10]



Figura 11: Motor sin escobillas COMPACT 260Z R7004 [9]

### 2.2.3. Caudalímetro

Para la medida del gasto de aire se ha optado por hacer uso de un medidor de gasto másico basado en anemometría de placa caliente. Básicamente, se calienta una placa de metal en el interior del caudalímetro, que se enfría a medida que pasa el flujo. Con una fórmula matemática se deduce cuanto aire está pasando calculando cuanto se enfría la placa metálica. Este caudalímetro es muy utilizado en la industria automotriz por sus buenas prestaciones. El modelo seleccionado ha sido el *Bosch HFM 2 - 0 280 217 102*. Sus características se muestran en la Tabla.

Parámetro	Valor
Rango de medida	10-350 kg/h
Precisión de medida	$\pm 4\%$
Tensión de alimentación	10-14 V
Temperatura de funcionamiento	-30 - 110 °C
Caída de presión (aprox.)	15 mbar
Diámetro exterior	60 mm
Longitud	130 mm

Cuadro 6: Especificaciones del medidor de gasto Bosch HFM 2 - 0 280 217 102 [4]



Figura 12: Medidor de gasto Bosch HFM 2 - 0 280 217 102

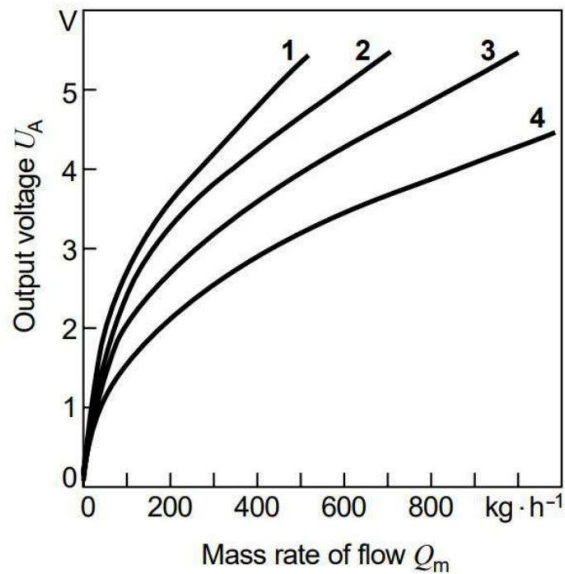


Figura 13: Curva 1 de calibración gasto másico-voltaje.

El fabricante nos proporciona además su correspondiente curva de calibración para traducir la tensión [V] a caudal [kg/h]. Corresponde a la curva 1 de la figura.

### 2.2.4. Sensores de presión

Los sensores de presión que se han utilizado son los 03L 906 051B que son de presión diferencial extensiométrico. Es decir, miden la diferencia de presión entre sus dos orificios gracias a una membrana que se sitúa entre los dos, que actúa como resistencia para un circuito eléctrico. Cuando hay una diferencia de presión la resistencia se extiende o se contrae, lo que aumenta o reduce su resistencia. Este cambio de resistencia luego se amplifica y se traduce a un voltaje que podrá leer nuestro sistema de adquisición.



Figura 14: Sensor de presión diferencial 03L 906 051B [14]

El fabricante nos facilita una escala lineal para convertir el voltaje en presión. De todas formas, se ha comprobado si es correcto en el laboratorio con un tubo de agua y se ha ajustado la escala.

Para tener la mejor medida de presión minimizando el error por turbulencia, se utiliza un tubo que toma la presión en cuatro puntos de la sección, lo que se traduce en una presión media. Usando una pieza para unir los tubos herméticamente [18]

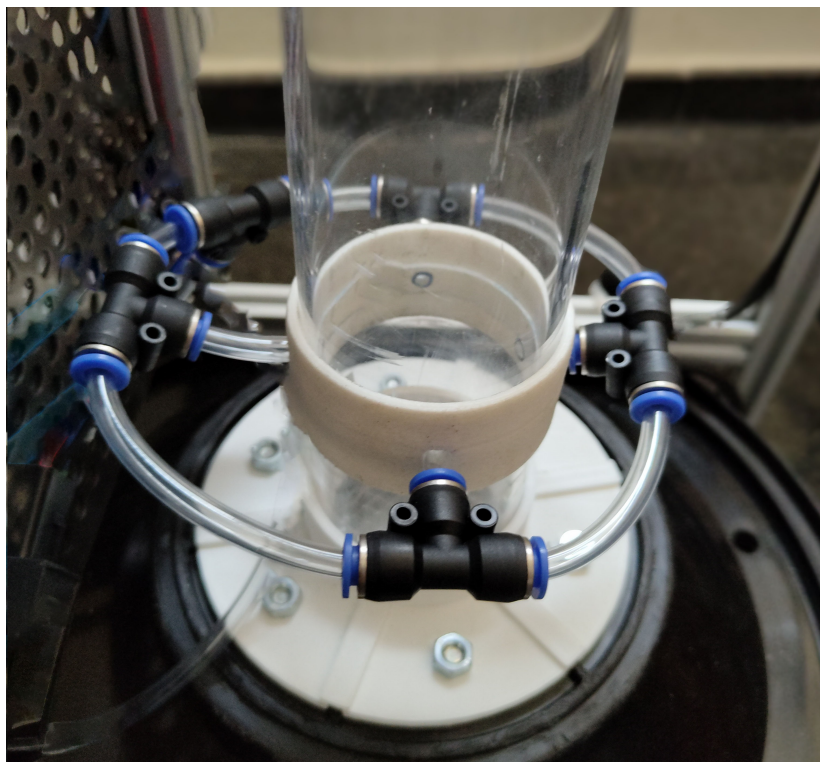


Figura 15: Configuración para los sensores de presión

### 2.2.5. Sistema de adquisición y control

La parte central de todo el banco de ensayos es el sistema de adquisición, el cual determinará que instrumentos podrán ser compatibles. Además, para la automatización del banco, necesitaremos una capacidad de procesamiento a tiempo real elevada. Con estas características, se ha optado por el MyRio de National Instruments. [5]



Figura 16: Sistema de adquisición y control - MyRio 1900 [5]

Este aparato, tiene un procesador de dos núcleos a 667 GHz. Además tiene una FPGA (Field-Programmable Gate Array) a 40 MHz. Esto es un tipo de circuito integrado que puede ser reconfigurado físicamente después de su fabricación para implementar diferentes funciones lógicas. Es decir, es un chip que puede especializarse en algunas tareas y adaptar sus transistores a ello para tener una velocidad de procesamiento altísima. La combinación entre estos dos componentes nos permitirá la automatización del banco. Además, tiene una salidas de 5V y 3,3V para los sensores y multitud de entradas y salidas analógicas para diversos componentes.

### 2.2.6. Etapa de potencia

#### Circuito

Si quisiéramos disipar la máxima potencia siempre, podríamos conectar el generador directamente a unas resistencias, pero el objetivo del banco es poder probar la turbina en todos sus puntos. Ahí es donde entra la etapa de potencia, su objetivo es disipar la potencia eléctrica generada por la turbina de forma controlada.

La placa que se ha utilizado es la Infineon DC Motor Control Shield, que se usa comúnmente para controlar la velocidad y potencia de los motores eléctricos mediante PWM.

PWM o modulación por ancho de pulso (del inglés Pulse Width Modulation), es una técnica utilizada para controlar la cantidad de energía entregada a una carga sin utilizar componentes analógicos para variar la tensión.

La placa tiene dos circuitos integrados BTN8982TA para un control más preciso de la potencia disipada. Cada uno es un puente en H, compuesto por dos MOSFETs, que permiten controlar la dirección y velocidad de los motores. A la salida de estas placas, en vez de tener motores, tenemos conectadas las resistencias. A pesar de que el circuito tiene un alto umbral de intensidad de corriente, se le ha puesto dos resistencias, una por cada circuito, para repartir la corriente. A su vez, se han habilitado dos circuitos para tener la posibilidad de ampliar el banco.

Parámetro	Valor
VDS	4,5-40 V
IDS continua máxima; $T < 85^{\circ}\text{C}$	50 A
IDS pico máxima; $T < 85^{\circ}\text{C}$ ; DC=0.5	68 A
Temperatura máxima	150 °C

Cuadro 7: Especificaciones del controlador BTN8982TA [13]

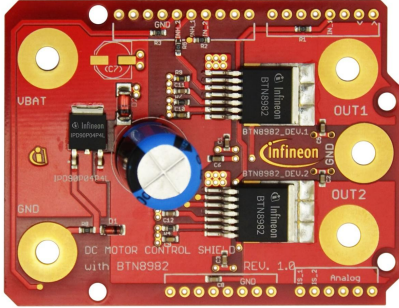


Figura 17: Etapa de potencia - Infineon BTN8982TA

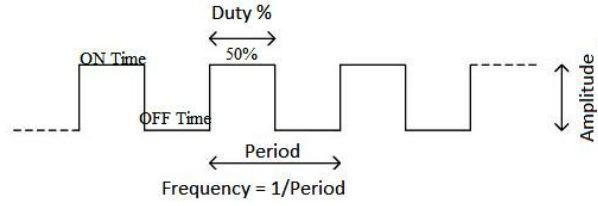


Figura 18: PWM generado por la etapa de potencia

### Resistencias

Las resistencias están atornilladas a disipadores de aluminio con una capa de pasta térmica entre ellos, que a su vez está atornillado al chasis del banco. Se ha optado por colocar dicho componente lejos de la electrónica para evitar calentamientos excesivos. Las resistencias y el circuito están unidos mediante un conector, para facilitar el cambio de alguna resistencia o añadir más. A la salida de las resistencias se ha incluido una resistencia de shunt, que tiene una precisión en su resistencia (Omios) alrededor al 1% [15] y tiene una resistencia baja comparada con las resistencias de potencia. Esto permite sacar una señal de tensión entre 0 y 5 Voltios, que pueda leer el sistema de adquisición para saber cuanto están consumiendo las resistencias en total.

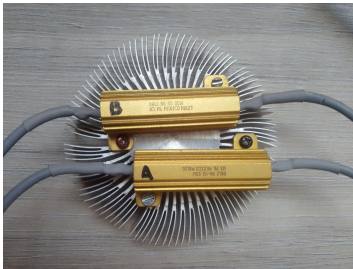


Figura 19: Resistencias de potencia



Figura 20: Montaje de las resistencias

### 2.2.7. Variador de Frecuencia

Se necesita que este elemento pueda ser controlado de forma digital para poder automatizarlo. El elegido, puede ser controlado de ambas formas cambiando un interruptor. Además debe satisfacer las necesidades de potencia del aspirador. [16]



Figura 21: Variador de Frecuencia [16]

### 2.2.8. Circuito del Rectificador

#### Rectificador

La energía generada por la turbina es trifásica, es decir, tiene 3 cables y cada uno tiene una fase, separadas entre si  $120^\circ$ . El primer paso para poder consumir y medir esa energía eléctrica es rectificarla para obtener corriente continua.

Para ello, se utiliza un circuito electrónico, montado a medida, que utiliza un puente de diodos [11] para conseguir una sola polaridad. El modelo de diodo elegido es el 1N4007. Luego, se emplean condensadores para estabilizar la señal y reducir las oscilaciones. El circuito completo: Figura 57

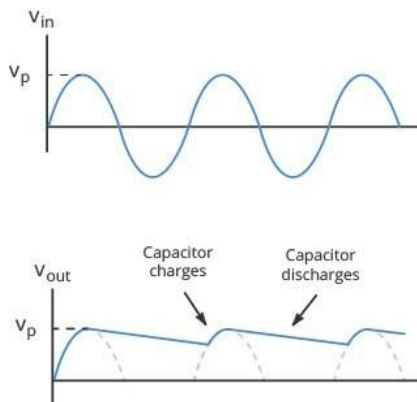


Figura 22: Efecto del Condensador en la señal

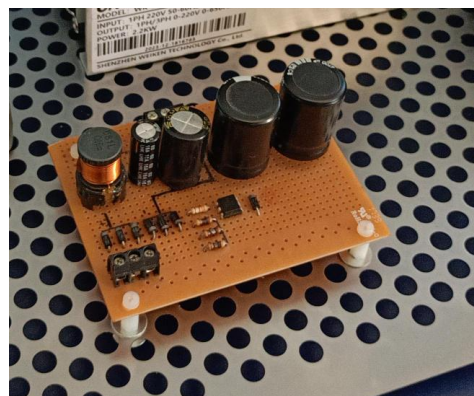


Figura 23: Placa del Rectificador

#### Contador de pulsos

La placa del rectificador se complementa con un optoacoplador que une dos circuitos a través de un receptor óptico. Este receptor enciende una luz interna que permite cortocircuitar el otro circuito



independiente. [12] Este optoacoplador, se configura para que deje pasar la corriente cuando el voltaje sin rectificar es mayor al rectificado. De esta forma podemos contar fácilmente la distancia entre picos haciendo uso de una señal digital. De esta forma, midiendo el tiempo entre pulsos se pueden obtener las revoluciones del motor.

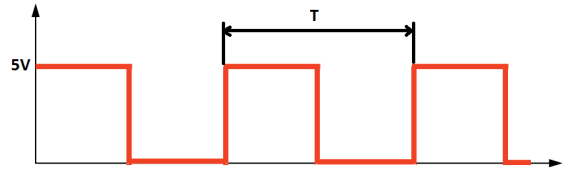


Figura 24: Periodo del pulso de la turbina

### 2.2.9. Transformador de corriente

Para alimentar el MyRio y el caudalímetro se ha dispuesto en el banco un transformador que proporciona corriente a 12V. Éste, se coloca en la barra DIN del cuadro eléctrico junto a los conectores de las resistencias y los componentes de seguridad.

### 2.2.10. Optimización del Aspirador

Para el uso eficiente del aspirador de aire, que es básicamente el componente que limita la potencia máxima, se ha de quitar toda parte que no fuera estrictamente necesaria. Se han diferenciado tres actualizaciones de este aspirador.

- Configuración Original (sin filtros) Esta es la configuración inicial del aspirador, quitándole todos los complementos.
- Configuración Modificada (solo la cavidad) Para esta prueba se ha quitado todo el plástico estructural pero manteniendo la cavidad del polvo. Quitando todos los plásticos sobrantes evitamos todos los cambios de dirección posibles, optimizando su rendimiento.
- Configuración Libre Para esta prueba se ha desarmado totalmente el aspirador con una sierra, y se ha atornillado su salida directamente al tubo de acrílico. Esto hace que el aire no tenga que pasar por la cavidad lo que lo convierte en la configuración más limpia de obstáculos.

Para comprobar la potencia de estas configuraciones se ha hecho uso de la turbina y un micrófono. La turbina, cuando llega a su régimen constante, genera unos armónicos que dependen de la velocidad de giro y la cantidad de palas. Analizando la frecuencia del armónico principal de cada configuración podremos calcular cualitativamente cual gira más rápido. La configuración libre es la que tiene un armónico principal, por lo que está será la configuración que otorga mayor potencia al banco, por lo que se ha optado por ésta.



Figura 25: Configuraciones de la aspirador

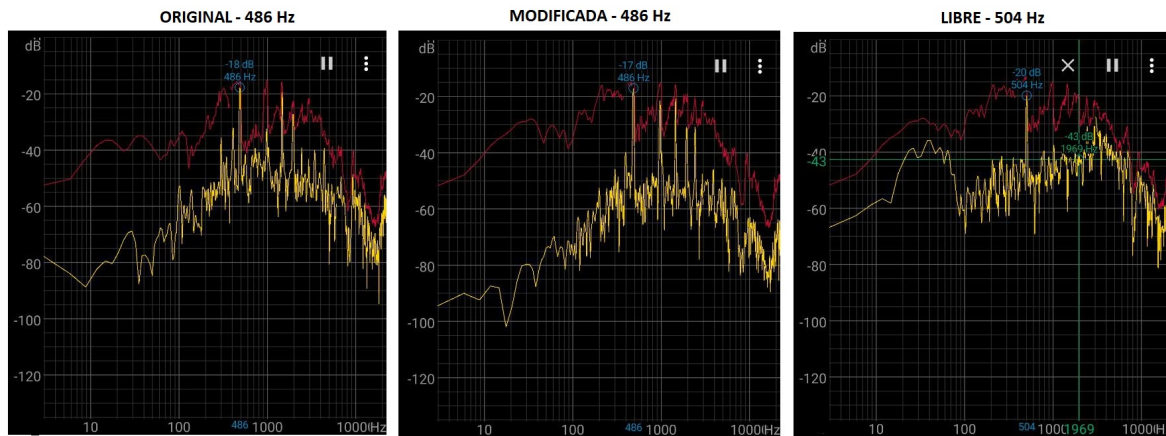


Figura 26: Respuesta en frecuencia de las configuraciones del aspirador

### 3. Diseño Aerodinámico

#### 3.1. Tendencias de Diseño

Para extraer energía del flujo las turbinas utilizan dos partes: el estator, que es fijo y el rotor, que es la parte móvil. De forma simplificada: El estator se encarga de acelerar el flujo en una cavidad que va reduciendo su sección y cambiándole la dirección. De esta forma se aumenta su velocidad a cambio de reducir su presión. El rotor se encarga de extraer esa energía cinética extra que ha añadido el estator y lo devuelve a la velocidad del tubo estándar, manteniendo la presión constante. Esta energía extraída se obtiene de la diferencia entre las velocidades del estator y el rotor.

Dadas las características dimensionales del tubo, se pueden elaborar multitud de turbinas que se pueden especializar en funciones diferentes. Destacan dos enfoques: Extraer la máxima energía del flujo o mejorar el rendimiento en detrimento de la anterior. Para estos propósitos se define el Grado de Reacción de una turbina.

El grado de reacción es un valor que oscila entre 0 y 1. En términos simples, el grado de reacción proporciona información sobre cómo se divide la expansión del fluido entre el estator y el rotor de la turbina. Si  $GR = 0$  todo el salto de entalpías ocurre en el estator. Esta configuración se conoce como turbina de acción. Sin embargo si  $GR = 1$  todo el salto ocurre en el rotor.

La configuración con  $GR = 0,5$  tiende a ser la configuración más eficiente, y la configuración  $GR = 0$  suele ser la más compacta, ya que absorbe la máxima energía del flujo en una sola etapa. De las dos, la que nos interesa es la segunda y el diseño tenderá en esa dirección.

### 3.2. Modelado CAD (Diseño Asistido por Computadora)

Para el diseño se ha utilizado el programa de SolidWorks. El perfil que se ha utilizado es el NACA 65A10 ya se trata de un perfil para flujo subsónico, que es el que tendremos en el banco. El resultado final de las piezas para la turbina se muestra en las figuras 27 y 28.

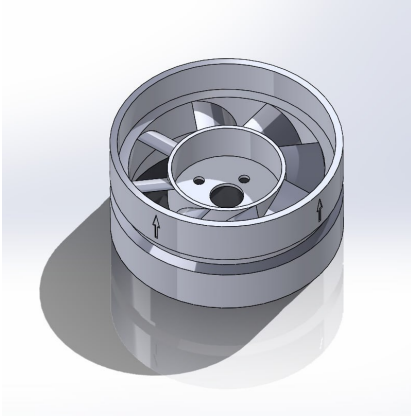


Figura 27: Diseño CAD del estator

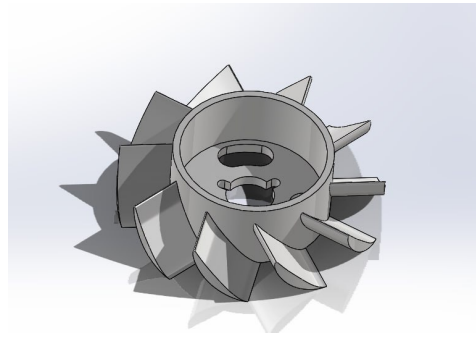


Figura 28: Diseño CAD del rotor

### 3.3. Simulación computacional de la turbina

Para que no suponga un problema tras la impresión, se deben detectar los errores en la pieza antes del ensayo en el banco, ya que una rotura desintegraría la máquina que está trasegando el flujo. Para ello se ha utilizado el SolidWorks para hacer ensayos estáticos definiendo las fuerzas a las que están sometidos estos sólidos. Para llevar a cabo estas simulaciones se ha supuesto una velocidad de rotación de 30000 revoluciones por minuto, lo que es un límite bastante alto, y una diferencia de presión de 0,2 kPa. Estos son valores comunes para este tipo de microturbinas. Luego mallado con la configuración más fina del algoritmo automático del SolidWorks. Se muestra en la figura 29

Las simulaciones hechas a ordenador con las propiedades de los materiales de impresión, sugieren que el desplazamiento máximo se encuentra alrededor 0,05 mm tal y como se ve en la figura 30. Lo que valida nuestro margen de seguridad de 1 mm. Las simulaciones solo evalúan la elongación por las tensiones, no consideran ni vibraciones ni desalineamientos respecto a su eje central, por lo que se decide mantener el margen anteriormente citado.

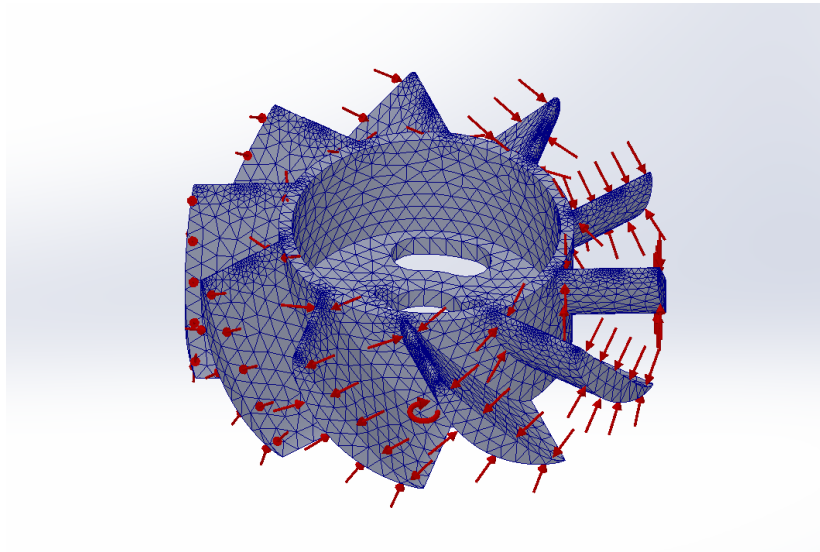


Figura 29: Rotor mallas para la simulación con las fuerzas aplicadas

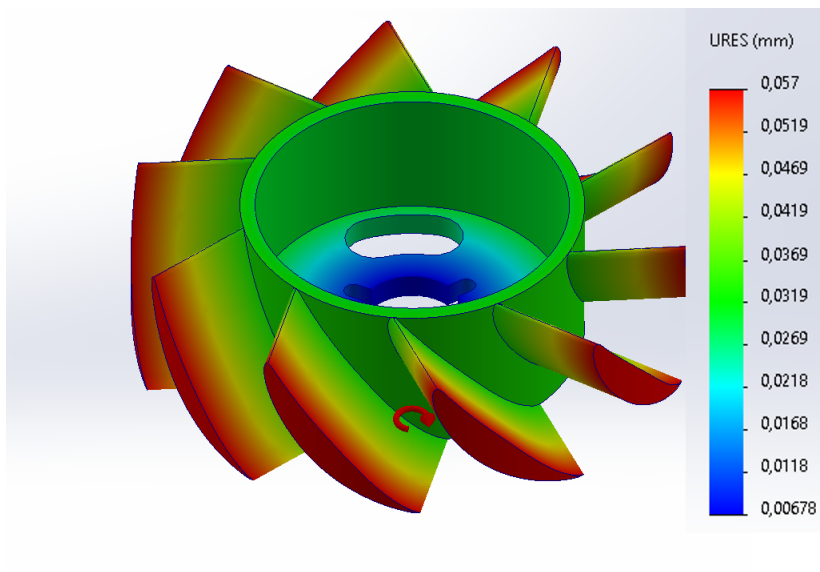


Figura 30: Desplazamientos en milímetros

Adicionalmente, se ha incluido una tobera de la figura 31 a la entrada para optimizar el flujo que entra al tubo y unas piezas para medir las tolerancias del tubo, consiguiendo que el ajuste entre ellos sea hermético.

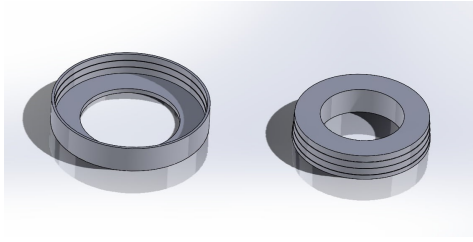


Figura 31: Piezas de tolerancia

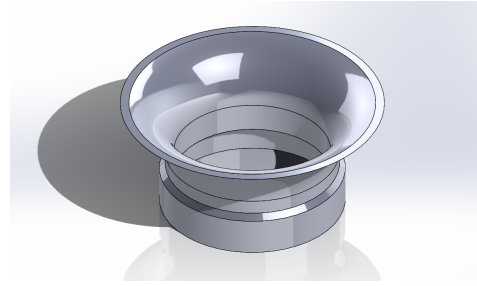


Figura 32: Rotor mallado para la simulación con las fuerzas aplicadas

Como hay que acceder a la turbina para atornillar las piezas al motor, se ha dividido en diferentes piezas que encajan entre sí.

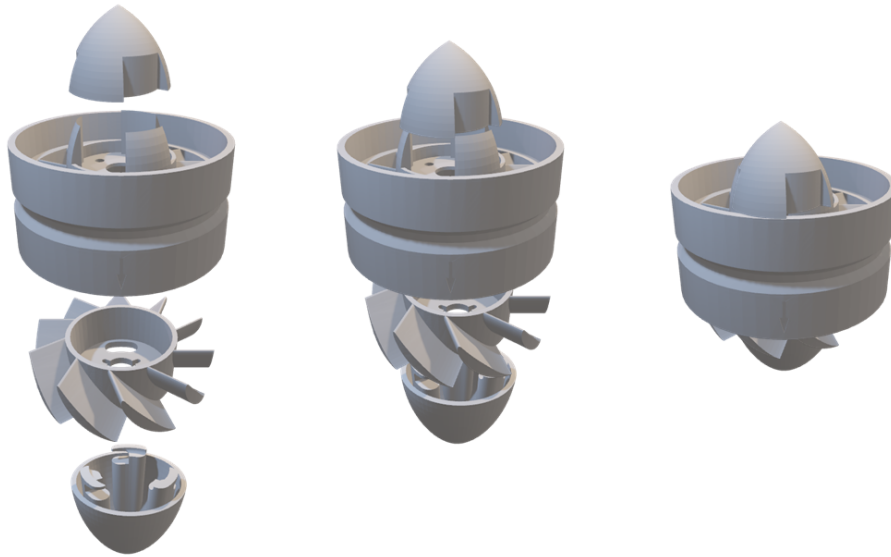


Figura 33: Montaje de la turbina con cuatro piezas independientes

### 3.4. Impresión en 3D de la turbina y ensayos mecánicos

Tras la impresión del prototipo de turbina, se ha ensayado mecánicamente para comprobar su límite de rotura real. Cada álabe, de 0.25 gramos, ha aguantado 3.5 kg como mínimo.

Para calcular el límite de rpm que el álabe puede soportar antes de su rotura, debida a la fuerza centrífuga, seguimos los siguientes pasos:

1. Convertimos la masa del álabe a kilogramos:  $m = 0,25 \text{ gramos} = 0,25 \times 10^{-3} \text{ kg} = 0,0002 \text{ kg}$
2. Calculamos la distancia del centro de gravedad del álabe al eje:  $r = 15,85 + \frac{10,64 \text{ mm}}{2} = 21,17 \text{ mm} = 0,02117 \text{ m}$
3. Determinamos la fuerza centrífuga máxima que puede soportar el álabe:

$$F_{\text{máx}} = 3,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 34,335 \text{ N}$$

4. Calculamos la velocidad angular (en rpm) al límite de la fuerza que soporta el álabe:

$$F_{\text{centrífuga}} = F_{\text{máx}} = m \cdot r \cdot \left( \frac{N \cdot 2\pi}{60} \right)^2$$

$$\left(\frac{N \cdot 2\pi}{60}\right)^2 = \frac{F_{\text{máx}}}{m \cdot r}$$

Obtenemos:

$$N = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{F_{\text{máx}}}{m \cdot r}}$$

Por lo tanto, el límite de rpm para que el álabe se rompa debido a la fuerza centrífuga es aproximadamente **27193 rpm**. Lo que nos da un buen margen para las pruebas con resina.

Hay que tener en cuenta que estos ensayos se han hecho agarrando la pieza con mucha fuerza, lo que puede reducir su resistencia. Por lo que el límite seguramente sea superior.

Además, el modelo final se construirá en nailon sintetizado por láser, lo que aumentará aún más el límite de rotura.

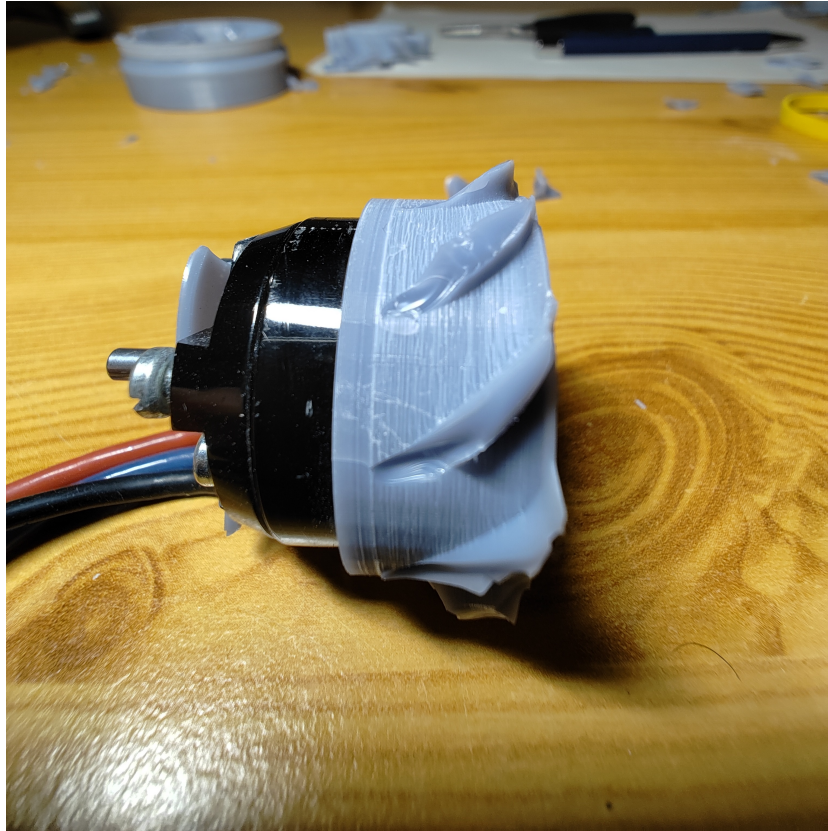


Figura 34: Ensayo de fuerza de rotura de los álabes

## 4. Diseño Eléctrico

### 4.1. Diseño y montaje de la eléctrica

Para la seguridad del operador, se ha unido a tierra toda la estructura metálica del banco. Además se han incluido diferenciales, que cortan el suministro de corriente en caso de desviación. Como se suele hacer en estas instalaciones, el cuadro eléctrico va montado en un carril DIN arriba de la instalación, el cual alimenta y sirve de conector para todos los componentes de potencia.

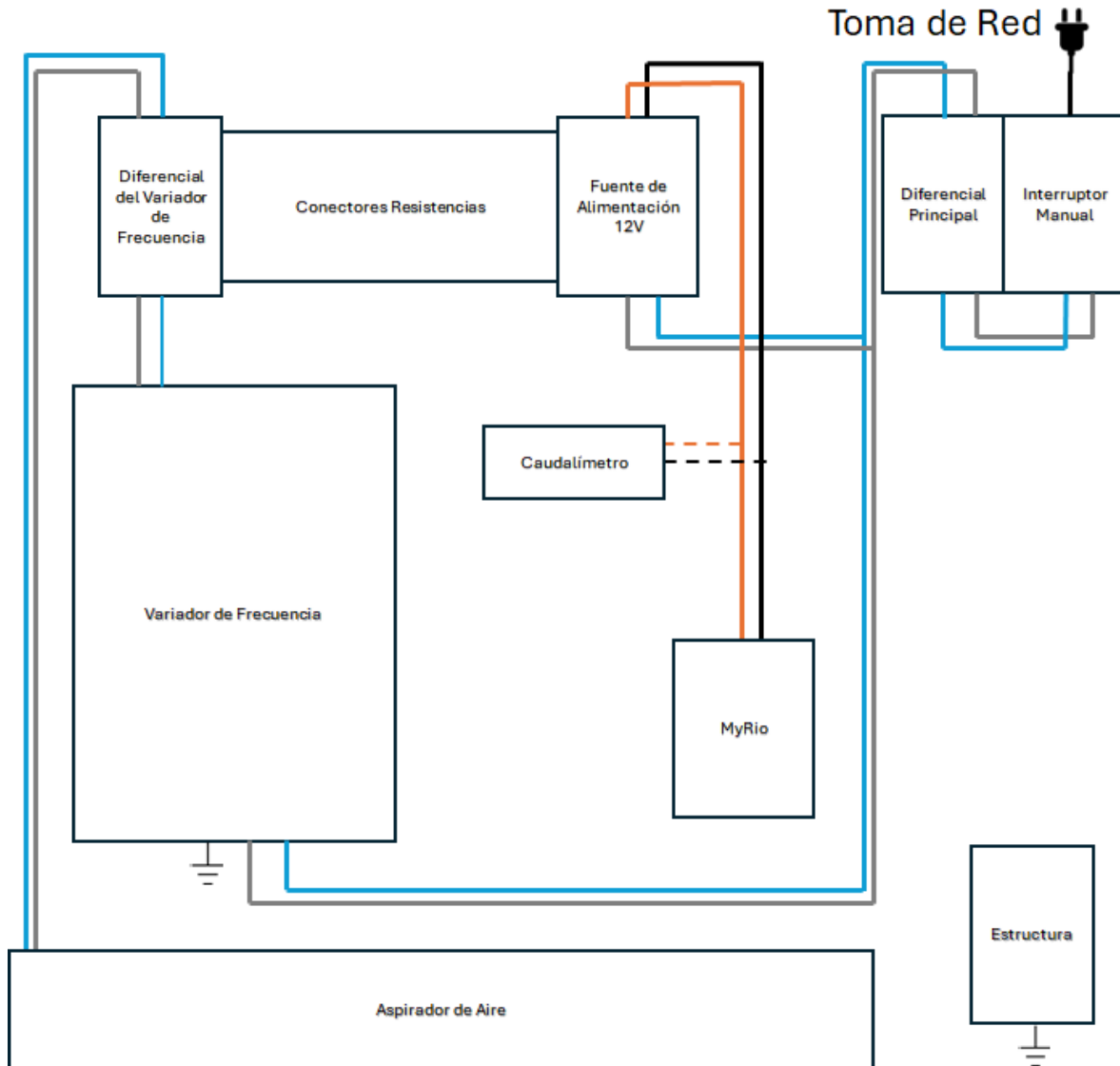


Figura 35: Croquis de la eléctrica del banco

#### 4.2. Elaboración de electrónica de potencia

El objetivo de la etapa de potencia es la disipación de la energía generada por la turbina de forma controlada, para ello usa de una señal del Duty Cycle enviada por el controlador electrónico, el MyRio.

Para evitar cortocircuitos, la electrónica se ha separado físicamente del metal de la placa con unos separadores de nailon.

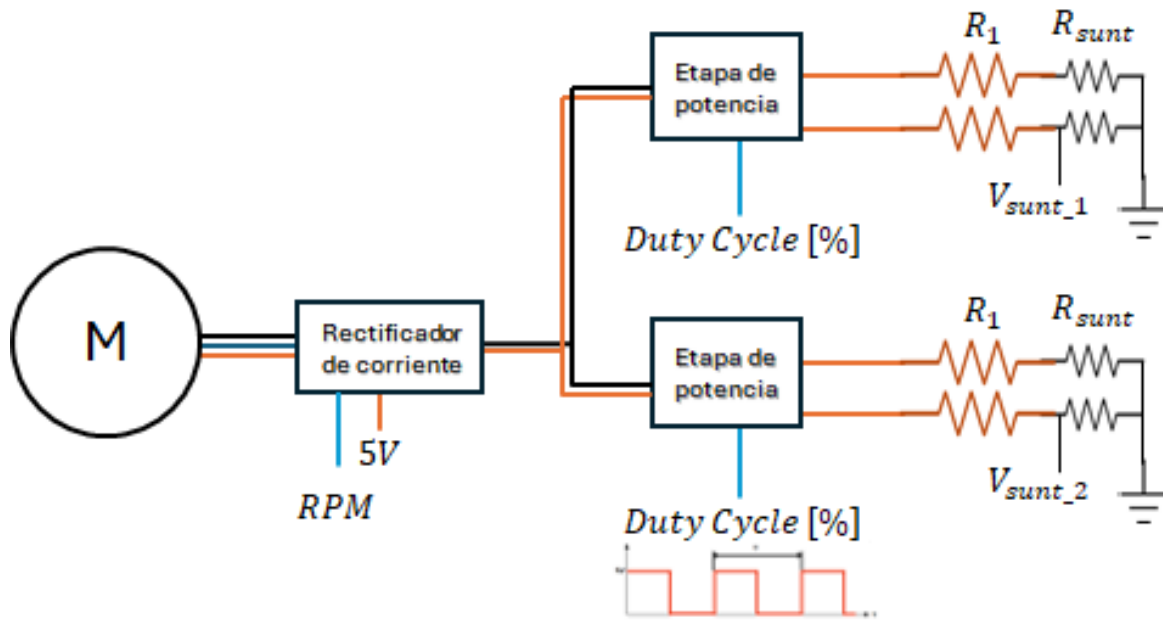
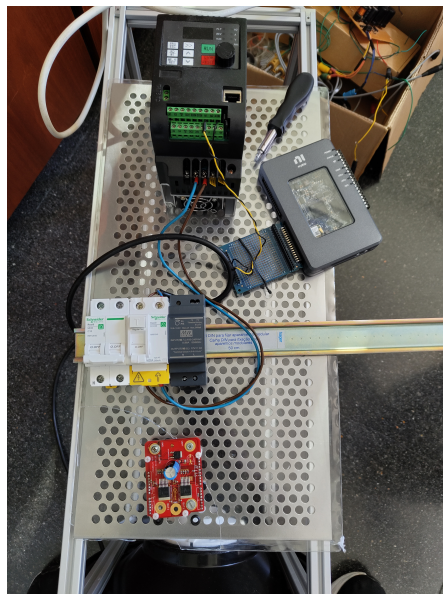


Figura 36: Croquis de la electrónica de potencia del banco



(a) Montaje



(b) Resultado

Figura 37: Montaje y Resultado de la electrónica de potencia del banco

## 5. Diseño Electrónico

### 5.1. Montaje de la parte electrónica

El último montaje que se debe hacer en la instalación es el de la electrónica. Ya que es el más sensible a sobre-tensiones y es el más caro. Para asegurar que todos los voltajes sean correctos, se verifica previamente con un osciloscopio. Los cables de la electrónica han sido cortados y puestos a



medida para su correspondiente sistema de adquisición y sistema de control. El código de cables para la electrónica es el siguiente:

- Blanco: Señal Analógica
- Azul: Señal Digital
- Rojo: Alimentación (5V o 3,3V)
- Negro: Tierra (GND)



Figura 38: MyRIO montado con sus respectivos cables

Port A		Port B	
Pin-34	DIO15 / I2C.SDA	Pin-34 T2	DIO15 / I2C.SDA
Pin-32	DIO14 / I2C.SCL	Pin-32 T1	DIO14 / I2C.SCL
Pin-30 GND PWM	DGND	Pin-30 GND T2	DGND
Pin-28 GND PWM	DGND	Pin-28 GND T1	DGND
Pin-26 Counter	DIO13	Pin-26	DIO13
Pin-24 GND Pressure-1	DGND	Pin-24	DGND
Pin-22	DIO12 / ENCB	Pin-22	DIO12 / ENCB
Pin-20 GND Pressure-2	DGND	Pin-20	DGND
Pin-18	DIO11 / ENCA	Pin-18	DIO11 / ENCA
Pin-16	DGND	Pin-16	DGND
Pin-14	UART.TX	Pin-14	UART.TX
Pin-12	DGND	Pin-12	DGND
Pin-10	UART.RX	Pin-10	UART.RX
Pin-8	DGND	Pin-8	DGND
Pin-6 GND VF	AGND	Pin-6 GND Caudal	AGND
Pin-4 VF	AO1	Pin-4	AO1
Pin-2	AO0	Pin-2	AO0
	+3.3 V		+3.3 V
	DIO10 / PWM2		DIO10 / PWM2
	DIO9 / PWM1		DIO9 / PWM1
	DIO8 / PWM0		DIO8 / PWM0
	DIO7 / SPI.MOSI		DIO7 / SPI.MOSI
	DIO6 / SPI.MISO		DIO6 / SPI.MISO
	DIO5 / SPI.CLK		DIO5 / SPI.CLK
	DIO4		DIO4
	DIO3		DIO3
	DIO2		DIO2
	DIO0		DIO0
	AI3		AI3
	AI2		AI2
	AI1		AI1
	AI0		AI0
	+5V		+5V
	Pin-33		Pin-33 (T1, T2)
	Pin-31		Pin-31
	Pin-29 O-PWM2		Pin-29 O-PWM4
	Pin-27 O-PWM1		Pin-27 O-PWM3
	Pin-25 O-INH2		Pin-25 O-INH2
	Pin-23 O-INH1		Pin-23 O-INH1
	Pin-21		Pin-21
	Pin-19		Pin-19
	Pin-17		Pin-17
	Pin-15		Pin-15
	Pin-13		Pin-13
	Pin-11		Pin-11
	Pin-9		Pin-9 Suint 2
	Pin-7		Pin-7 Suint 1
	Pin-5 Pressure 2		Pin-5 Caudal
	Pin-3 Pressure 1		Pin-3
	Pin-1 ( Pressure 1,2,3 )		Pin-1 ( RPM )

Figura 39: Esquema de las conexiones del MyRIO de los puertos A y B

## 5.2. Programación de la parte electrónica

La programación es de los temas más extensos de este trabajo. La comunicación entre dos tipos de procesadores distintos permite la especialización de éstos a ciertas tareas diferentes, pero también aumenta la complejidad de la programación y supone un reto intelectual.

### 5.2.1. Procesador

El procesador de nuestro aparato puede manejar grandes cantidades de memoria y operar con matrices de tamaño inmenso. Además tiene la capacidad de funcionar a tiempo real para la toma de las medidas a una misma velocidad.

El procesador se encarga de diversas funciones bien diferenciadas:

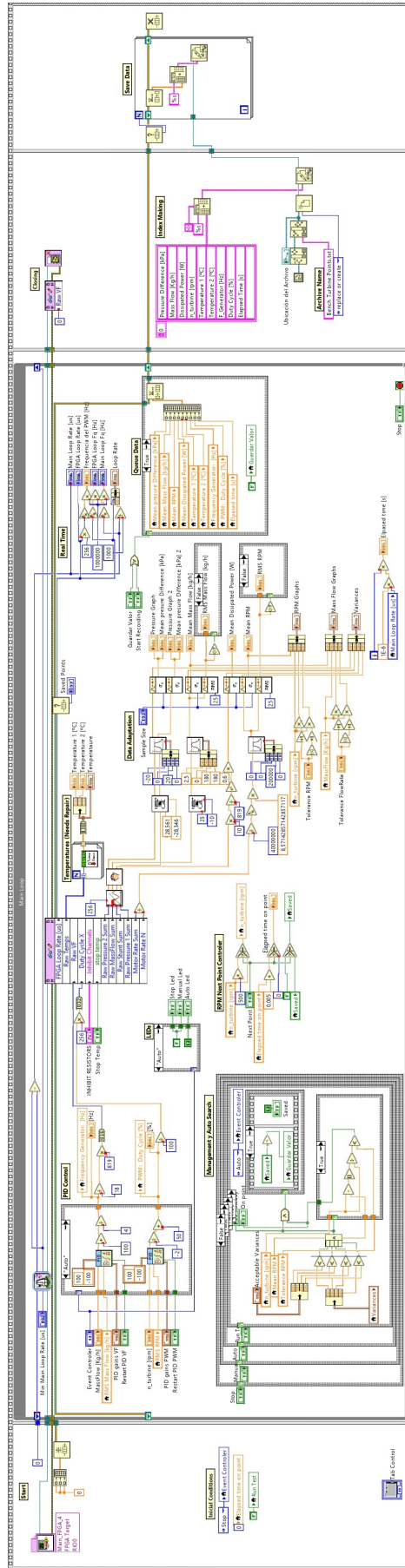


Figura 40: Código del procesador a tiempo real

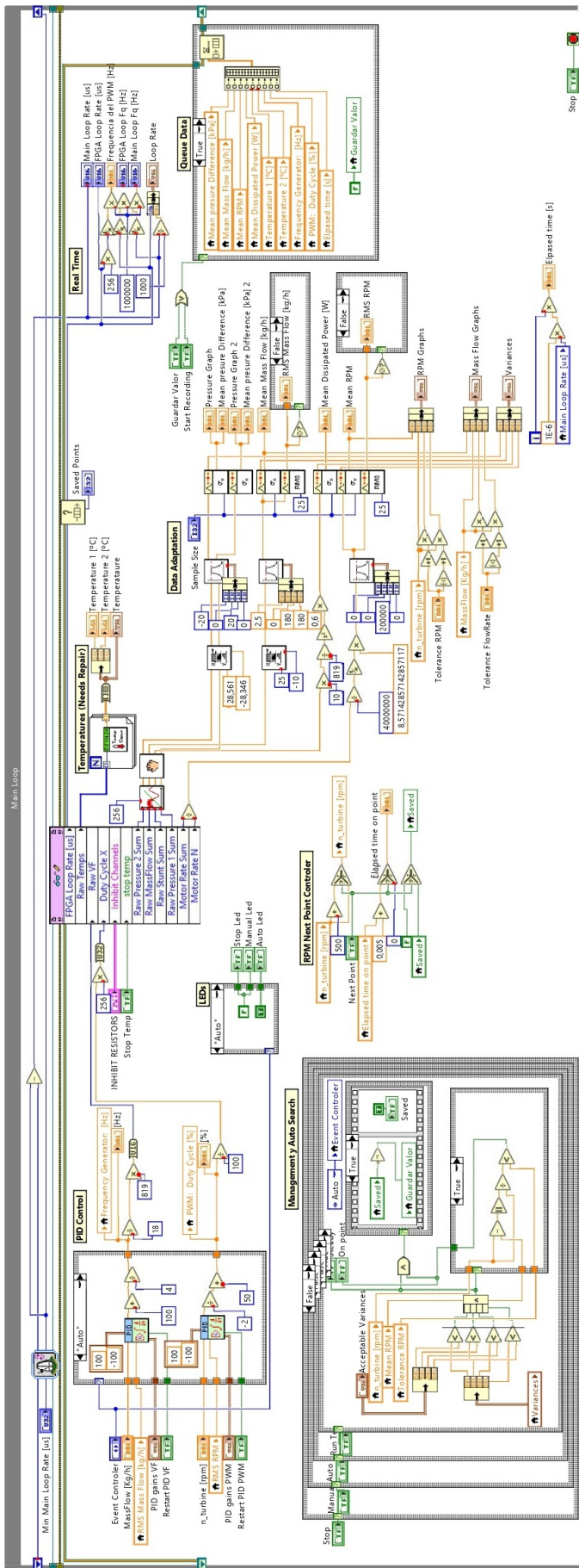


Figura 41: Código del bucle principal

- **Control del tiempo real**  
Asegurar un seguimiento de las variables a un ritmo controlado y sincronizar los datos obtenidos con el tiempo.  
El procesador, con todo el código necesario, ha sido capaz de alcanzar unos 300Hz con algunas caídas puntuales. Para que el procesador tenga margen, se ha configurado a 200Hz de velocidad, lo que nos asegura un ritmo constante. De esta forma podemos asegurar que cada iteración tarda lo mismo, para los cálculos con a tiempo real.
- **Interacción con el usuario**  
El procesador se encarga de enviar a la pantalla los datos requeridos para el usuario. Además, recibe instrucciones a través de botones y controles.
- **Automatización**  
El procesador incorpora el código del PID que es necesario para encontrar los parámetros que define el usuario automáticamente. Además, evalúa si los valores se encuentran dentro de las tolerancias definidas por el usuario como valores aceptables. Si se cumple lo anterior, el procesador permite guardar el punto en el cual opera la turbina.
- **Guardar puntos de funcionamiento**  
El procesador incorpora un código que permite guardar, en un documento de texto, las variables relevantes en el instante en el cual se ha alcanzado la estabilidad. Además, si lo requiere el usuario, tiene la opción de grabar toda la información durante el periodo para ver la evolución temporal.
- **Traducción de los datos de la FPGA**  
La FPGA envía los datos al procesador en formato de 12 bits. El procesador se encarga de traducir esa información a su correspondiente valor de tensión [V].
- **Filtro de errores**  
Para evitar que sistema se descontrola si hay algún fallo, se adopta un filtro de máximos y mínimos que permite no tener valores infinitos. Además, filtra datos que no sean números bloqueando el contagio del error al sistema de control
- **Calculo de valores medios**  
El procesador calcula las medias para guardar la información y mostrarla en pantalla. Asimismo, calcula valores de RMS (Root Mean Square) para los PID.

### 5.2.2. FPGA

En paralelo, la FPGA tiene la capacidad de funcionar a unas velocidades altísimas pero no tiene capacidad para guardar memoria. Además por ser un procesador físico, es decir que usa los transistores internos para adaptarse al código, tiene una limitación respecto al código que puede manejar. Esto la convierte en ideal para un par de funciones en específico. Leer los datos de los sensores y operar con ellos todo lo posible antes de enviarlos al procesador. Para optimizar al máximo su velocidad, se ha dividido su código en tres bucles que trabajan a diferentes velocidades.

- **Loop Lento**  
En este loop se incluye un código preparadas para este sensor [19] que nos proporciona el fabricante para leer la temperatura con un solo cable digital. Este código tiene un componente de espera para garantizar la conexión entre el microcontrolador del sensor de temperatura y el controlador del MyRio. Para no ralentizar el resto del código, tiene su propio bucle.
- **Loop Rápido**  
En este bucle se incluyen las lecturas analógicas, ya que el convertidor analógico digital esta multiplexado. Es decir, que se utiliza el mismo para hacer todas las lecturas. El propio convertidor tiene un tiempo de cálculo, y si a esto se le añade que está multiplexado, se alarga su duración. El bucle rápido alcanza un tiempo mínimo de 14  $\mu s$  que nos garantiza un tiempo de iteración

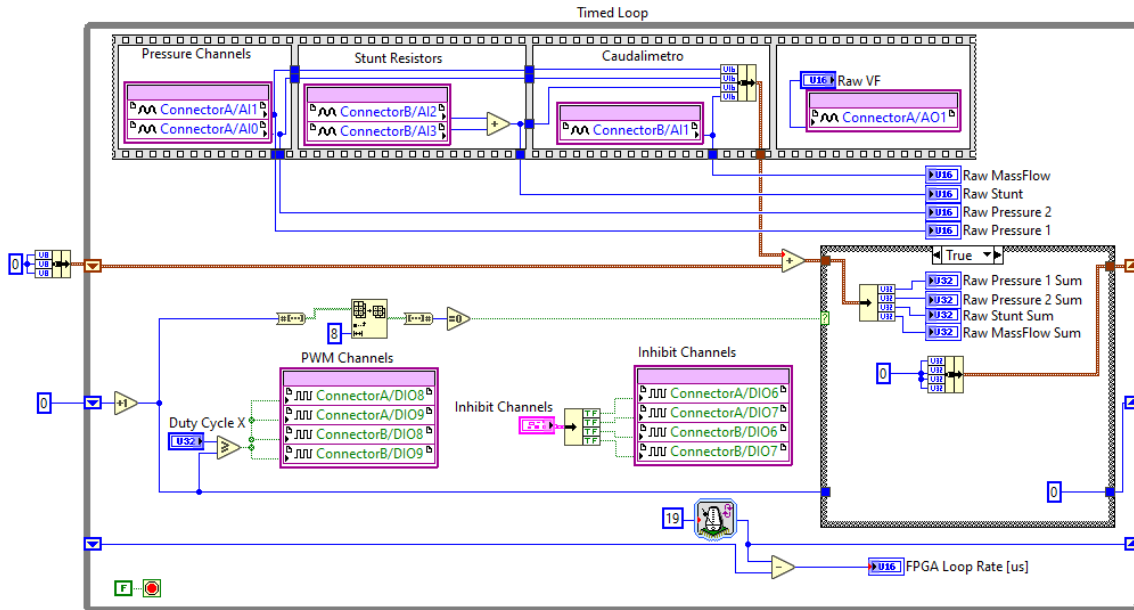


Figura 42: Bucle rápido de la de la FPGA

constante. En este bucle se incluye el código del Duty Cycle. Éste se basa en un contador que a partir de cierto número cambia el valor digital del PWM. Esto nos permite enviar una señal precisa de PWM a la etapa de potencia.

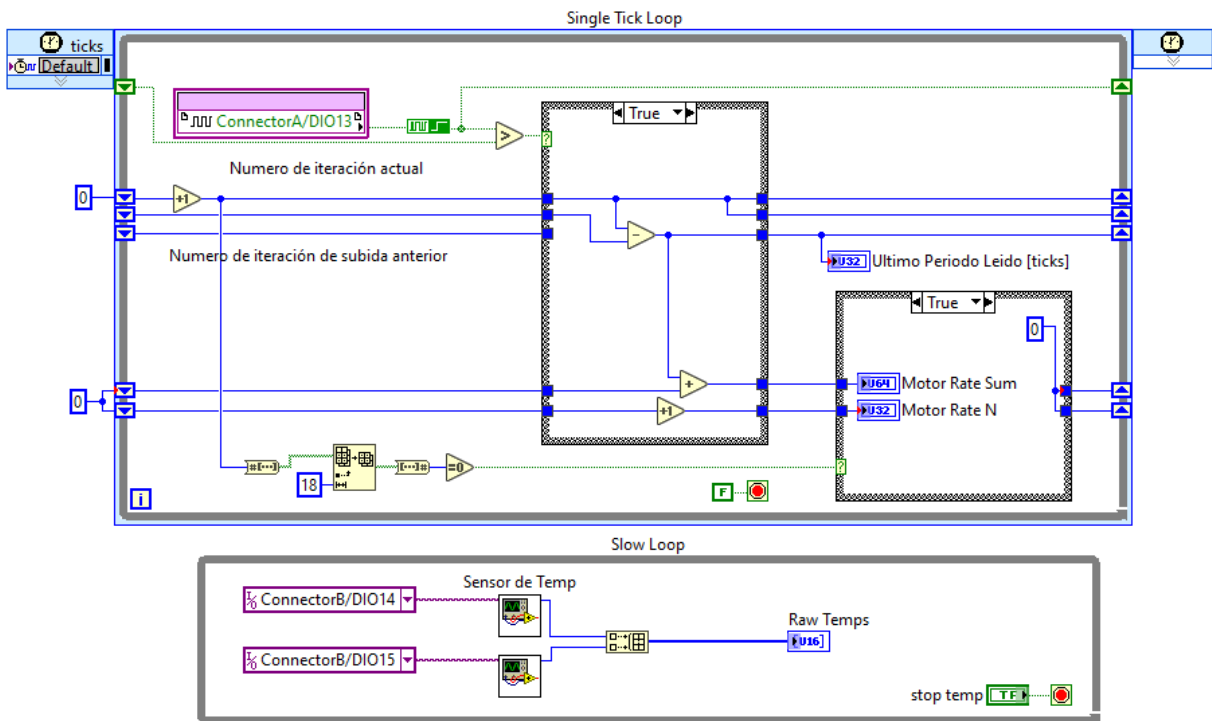


Figura 43: Bucle de la FPGA de un solo tick y debajo el bucle lento

- Single Tick Loop

Para las lecturas y escrituras digitales, se puede usar un Bucle que vaya a la velocidad de reloj de la FPGA. En un solo tick de reloj ejecuta todo el código que tiene dentro del bucle, esto es posible debido a su naturaleza física. Los transistores quedan colocados en función del código que tiene que ejecutar, de tal forma que la información recorre los transistores sin necesidad de procesarla como si se tratase de un procesador habitual. El contador de periodo para las rpm se encuentra en este bucle también, ya que solo hace uso de lecturas digitales. Este es un código que guarda los últimos dos valores en los cuales la señal de rpm sube, y los compara para sacar su diferencia en ticks. Sabiendo que el procesador va a 40MHz se puede sacar el tiempo real entre pulsos de las rpm. Su código se puede ver en la figura 43.

### 5.3. Fuentes de Error

En todo sistema experimental existe un error entre la medida y el valor real. Para mejorar la precisión del banco experimental, se han identificado todas las fuentes.

1. Error de precisión del instrumento

Los sensores analógicos crean una señal en voltios que se puede correlacionar con la variable que se esta intentando medir. Los errores que se originen en la traducción de tensión a la variable real pertenecen a éste. El procesador utiliza un sistema fórmula lineal para hacer la traducción, pero es común ver una falta de linealidad sutil en el componente. Adicionalmente, los sensores tienen una incertidumbre implícita en el propio instrumento. Este tipo de errores son difíciles de solucionar ya que se deben calibrar con instrumentos más precisos. Aunque comprando instrumentación de mayor calidad reduce este error.

2. Error por retraso temporal

La señal que se está midiendo es una señal a tiempo real, por lo que cualquier retraso que haya en la transmisión de la información es un error que debe considerar. Nuestro procesador tiene la capacidad de funcionar de forma estable a 200 iteraciones por segundo, lo que supone un error de retraso despreciable. Respecto al retraso de los componentes, la mayoría son casi-instantáneos a excepción del sensor de temperatura y el caudalímetro, que posee constante de tiempo de 20 ms, por lo que no supone ningún problema. Sin embargo, el retraso de la temperatura es mucho mayor, ya que calentar o enfriar el sensor va a ser lo más lento. Este es un error a mejorar en futuros proyectos.

3. Error de muestreo

Éste es debido a la naturaleza continua de la señal. Cuando se trata de medir una señal continua, se tiene que discretizar, ya que solo puedes medirla en un solo punto cada vez, lo que es una pérdida de información. Aquí es donde entra la función de la FPGA. Mientras que el procesador principal funciona a 200 Hz, este circuito personalizado permite hacer los circuitos de *Single Tick Loop*, pudiendo alcanzar los 40 MHz. Ahora sí, cuando se trata de medidas analógicas no puede llegar a tanto pero se queda cerca de los 60 kHz, lo que sigue superando por mucho al loop principal. De esta forma se consigue minimizar este error de muestro todo lo que nos permite la FPGA.

4. Error del convertidor analógico-digital

El convertidor analógico-digital tiene una resolución de 12 bits. Lo que son 4095 valores analógicos posibles. Lo que significa que de los 0 a 5 voltios que puede leer, estos se dividen en 4095 partes, siendo de 0.00122 V cada uno. En el peor caso, la medida se puede encontrar a la misma distancia de dos escalones separados 0.00122 V, siendo el error de 0.00061 Voltios, la mitad. Esto corresponde a 0.0122%, por lo que se puede despreciar.

5. Error de ruido

El error de ruido puede provenir de fallos eléctricos del propio sensor o controlador, o de interferencias con los campos electro-magnéticos. La medida del periodo para las rpm de la turbina es especialmente susceptible a este tipo de error, ya que en el momento en el que está el valor

digital pasa de 1 a 0 o viceversa, hay una franja de transición donde una mínima fuente de ruido puede hacer que el optoacoplador emita un falso positivo y se detecte un periodo excesivamente corto. Como se muestra en la figura 44 Este tipo de error es conocido como anti-rebote en la programación y se corrige aplicando un filtro en la entrada digital. Se ha utilizado el filtro de la referencia [17] Este filtro desfasa ligeramente la señal para evitar el rebote durante los primeros instantes del cambio de valor digital.

#### 6. Error de turbulencia

En el caso de las medidas aire, suelen estar muy condicionadas por la turbulencia. Ésta puede producir una señal inestable que se puede confundir con ruido eléctrico. Para solucionar esto se puede laminarizar el flujo para reducir su nivel de turbulencia. Además se puede aplicar una media móvil de los últimos elementos leídos. La media tiene un aspecto negativo, mete un pequeño desase en la señal. Cuantas más muestras tenga la media, la señal será más estable, a consta de aumentar la constante de tiempo. la elección del número de muestras de la media móvil es una decisión de compromiso.



Figura 44: Señal a evitar aplicando el Anti-Bounce en la FPGA [17]

### 5.4. Sistema de suma de valores para la FPGA

Se ha ideado un sistema en el código interno de la FPGA para aprovechar su velocidad de lectura y poder enviar más muestras al procesador a tiempo real, para tener una señal final más limpia. De esta forma se pretende reducir el error muestral todo lo que nos permite la FPGA. El bucle rápido de la FPGA, que mide los valores analógicos, funciona a un máximo de aproximadamente 70,000 Hz. Esto significa que la FPGA ejecuta su bucle 350 veces mientras el procesador realiza un solo bucle. Por esto mismo, cuando el procesador a tiempo real lee la información de la FPGA, coge el último de los 350 valores, lo que es un desperdicio de información.

#### 5.4.1. Concepto

El objetivo de este sistema es medir valores medios dentro de la FPGA. Este procesador no permite dividir valores debido a cómo están físicamente organizados los transistores dentro del chip. Para calcular la media, en primera instancia se intentó enviar matrices con los valores medidos al procesador, pero la FPGA no puede soportar ni matrices de 10 números sus limitaciones físicas en el chip. La solución a este problema fue ir sumando los valores de lectura hasta sumar los 350 anteriormente mencionados. Entonces, la FPGA envía este valor al procesador y éste se encarga de hacer la media. Todo esto tiene que estar sincronizado, y para ello se ha reducido la velocidad de la FPGA para tener un valor de bucle constante. Se ha reducido a  $19 \mu\text{s}$  por bucle. Con esta velocidad se puede hacer lo siguiente: La FPGA tarda aproximadamente 5 ms en terminar 256 iteraciones en el bucle rápido, o su equivalente a  $2^8$ . Siendo 5 ms lo que tarda el procesador principal el leer el valor de la suma.

$$256 \text{ iteraciones} \times 19 \mu\text{s} \text{ cada una} = 4864 \mu\text{s} = 4,864 \text{ ms}$$

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{4,864 \text{ ms}} \approx 205,7 \text{ Hz}$$

De esta forma, las 256 lecturas se completan con una frecuencia de 205.7 Hz, lo que es una frecuencia muy parecida a la del bucle principal.

En el mismo bucle hay un integrador que va sumando los valores de las lecturas uno a uno hasta completar 256 iteraciones para que, tras este número de iteraciones, se ejecute otro código que envíe el valor de la suma y lo reinicie. El número decimal 256 se representa en binario como un uno y ocho ceros. Es decir, 100000000.

Para entender esto mejor, veamos la representación en binario de algunos números, comenzando desde el 1:

Decimal	Binario	Potencia de 2
1	0 – 00000001	$2^0$
2	0 – 00000010	$2^1$
4	0 – 00000100	$2^2$
8	0 – 00001000	$2^3$
16	0 – 00010000	$2^4$
32	0 – 00100000	$2^5$
64	0 – 01000000	$2^6$
128	0 – 10000000	$2^7$
256	1 – 00000000	$2^8$

Estos números binarios tienen un solo bit en la posición correspondiente a la potencia de 2, y ceros en todas las demás posiciones. Esto significa que 4 es  $2^2$ , 8 es  $2^3$ , y 16 es  $2^4$ . Así, el número 256 es  $2^8$ . Se puede observar, que para que un número sea múltiplo de 256 debe tener los ocho bits de la derecha con el valor a cero. Gracias a esto, si se representa el número de iteración en binario, se comprueba fácilmente si los ocho bits menos significativos valen cero, determinando si es múltiplo de 256. De esta forma, una de cada 256 iteraciones se envía la suma al procesador y se reinicia.

Con esta misma filosofía, se hace el Duty Cycle. De esta manera, éste estará sincronizado con las medidas, consiguiendo que se mida en el mismo punto en un periodo del Duty Cycle. En la figura 45 se puede ver.

En paralelo, el single tick loop funciona de forma idéntica pero reiniciando la suma cada  $2^{18}$  iteraciones, ya que si la frecuencia de la FPGA es 40MHz, el tiempo total en completar  $2^{18}$  iteraciones será 6.5536 ms. Lo que equivale a una frecuencia de 152 Hz, muy parecida a la del bucle principal.

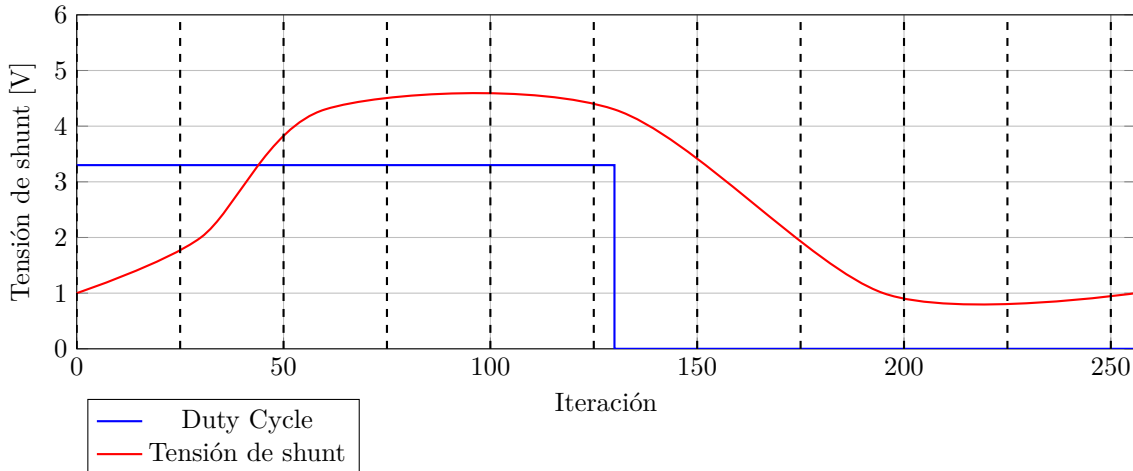


Figura 45: Croquis de la lectura de 256 valores de la FPGA sincronizada con el Duty Cycle.



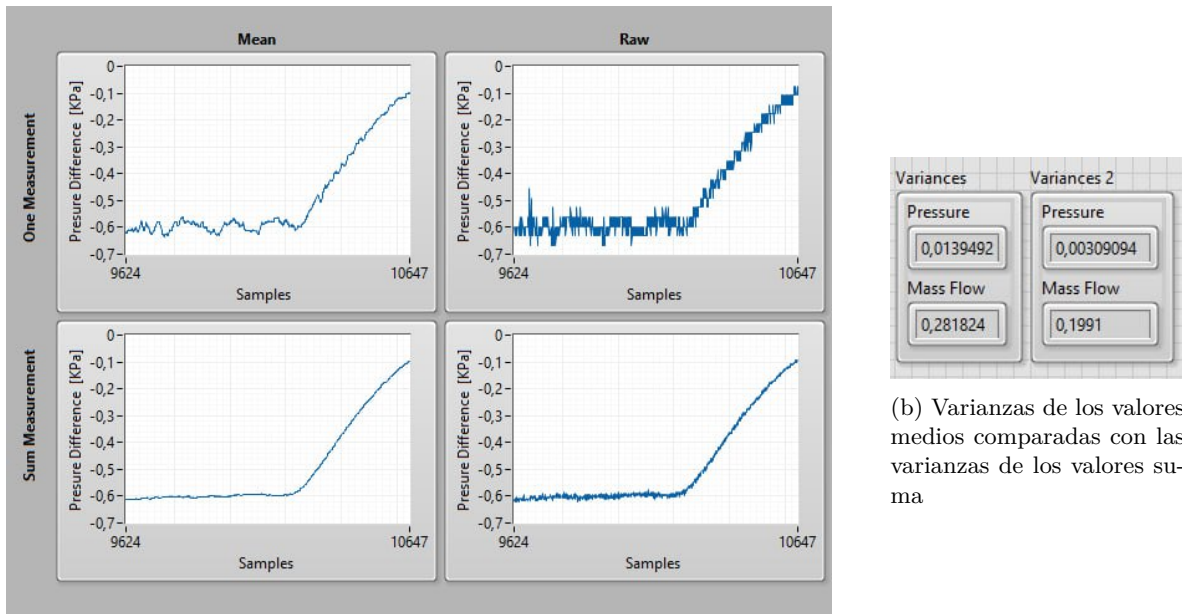
### 5.4.2. Comparación entre los valores individuales y los valores suma

A continuación se evalúan resultados de pruebas con los valores individuales y con los valores suma, siendo los valores individuales el último valor tomado, y los valores suma la división de los 256 valores. En las figuras, los valores individuales se posicionan arriba y los valores suma abajo. Adicionalmente se puede comparar los valores directos, que se representan sin pos-procesamiento a la derecha y los valores medios, que utilizan una media móvil a la izquierda. En la figura 46a se aprecian varias características.

Los valores calculados a partir de la última medida (*One Measurement*) tienen mucho más error que los valores que resultan por la aplicación del sistema de la suma (*Sum Measurement*).

Adicionalmente, se puede observar que aplicar la media de los últimos 10 elementos a una señal prácticamente no introduce retraso, pero sí reduce significativamente el ruido.

De todos estos valores, el que menos tiene error es el de abajo a la izquierda. Y ese es el que se ha utilizado. También es evidente que las varianzas van a ser menores, tal y como se aprecia en la figura 46b.



(a) Diferencia entre valores medios y crudos de presión

Figura 46: Comparación de diferencia entre medidas y varianzas

Al igual que en la anterior, la siguiente figura 47 representa la frecuencia del motor. Además de las gráficas de media y de *Raw*, se ha calculado una con los valores de RMS. Aunque la media son prácticamente iguales. Al igual que en la presión, la medida más precisa es la de la Media de la suma.

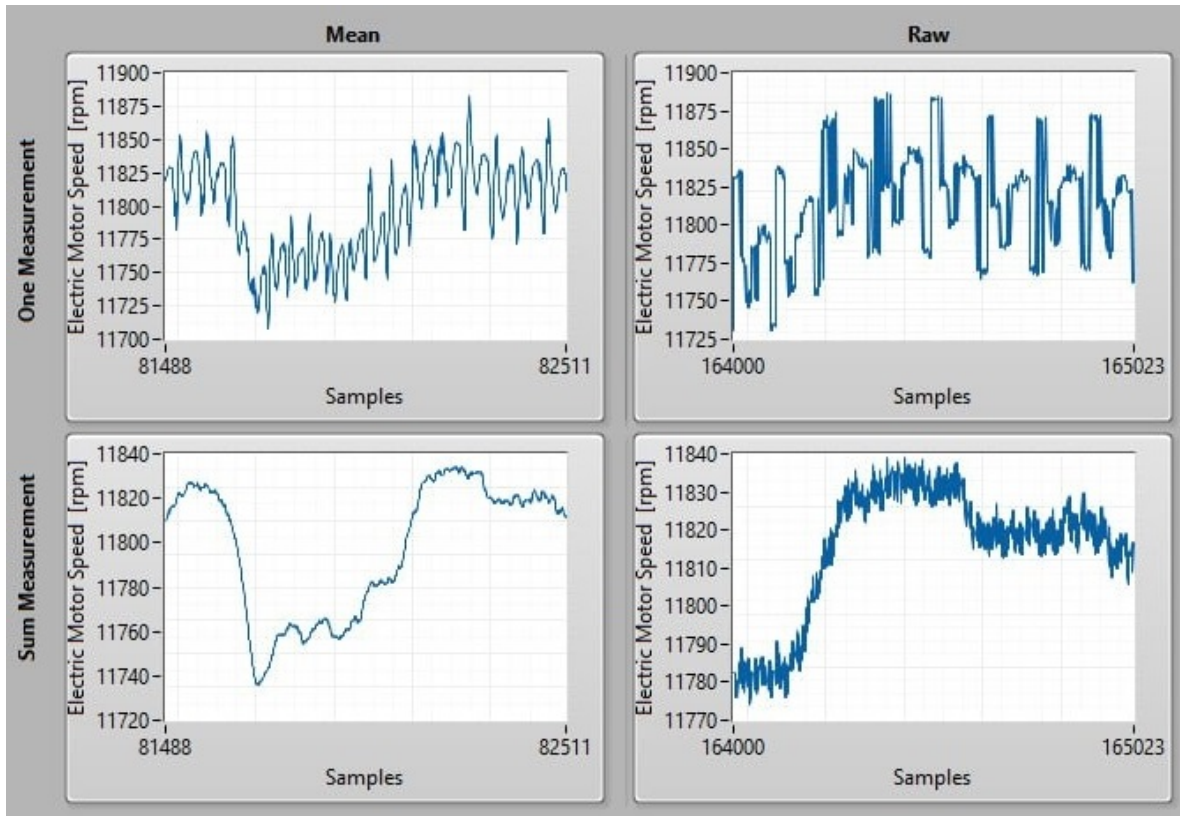
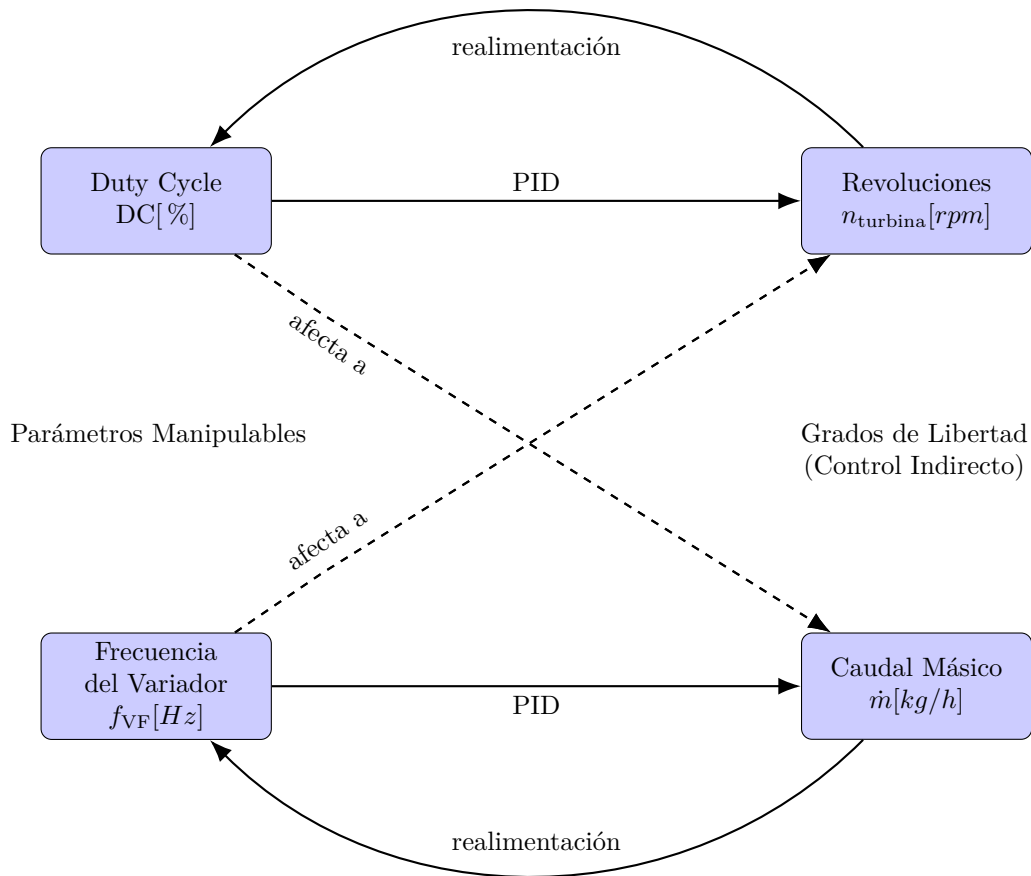


Figura 47: Diferencia entre valores medios y crudos de rpm

## 5.5. Creación del programa de automatización

Para la automatización del banco, es necesario que busque automáticamente los valores de rpm y de caudal másico que se le introduzcan. Para ello se necesita un control en bucle cerrado.

Los parámetros manipulables son el Duty Cycle,  $DC[\%]$  y la frecuencia del variador,  $f_{VF}[Hz]$ . Sin embargo, se requiere controlar los grados de libertad de las revoluciones de la turbina  $n_{turbina}[rpm]$  y el caudal másico  $\dot{m}[kg/h]$ , pero solo se puede hacer de forma indirecta.



Para ello, se implementan bucles cerrados que corrigen las variables manipuladas en función del valor del grado de libertad. Para esta tarea se ha optado por un PID discreto, que es un algoritmo que busca el valor buscado a partir de 3 herramientas matemáticas diferentes: Proporcional, Integral y Derivativa. La combinación de las tres es lo que llamamos PID.

### 1. Proporcional

El valor proporcional se basa en la correlación lineal de los valores de la variable manipulada con los obtenidos en la variable a controlar. Para un mejor entendimiento pongo un ejemplo:

La correlación lineal entre los hercios del variador de frecuencia ( $f$ ) y el caudal másico ( $\dot{m}$ ) está dada por:

$$\dot{m} = K_{p,VF} \cdot f_{VF}$$

donde:  $K_{p,VF}$  es la constante de proporcionalidad para el caudal másico.

La correlación lineal entre el ciclo de trabajo, ( $DC[\%]$ ) y las rpm están dada por:

$$rpm = K_{p,rpm} \cdot DC$$

donde:  $K_{p,rpm}$  es la constante de proporcionalidad para las rpm.

### 2. Integral

Esta se basa en la acumulación del error con el tiempo, es decir, que si la diferencia entre el valor al que se busca y el medido es considerable, pasado un tiempo lo corrige automáticamente. Si este valor es demasiado alto, puede suponer *overshoots*, es decir, que se supere el valor objetivo por unos momentos al responder demasiado rápido. Y lo que es peor, ponerse a oscilar indefinidamente.

### 3. Derivativa

Cuando el valor oscila excesivamente, se suma a la ecuación el derivativo. Este predice donde va a estar el valor y corrige la salida en base a eso.

Para determinar cual son los valores de estas constantes de control se tiene que hacer un modelo del sistema experimental. Para ello se ha utilizado un programa de identificación en Matlab. [20] Matlab puede identificar el sistema analizando como reacciona la variable indirecta a partir de un escalón en la la variable manipulada. Esto permite relaciona el sistema con un modelo matemático, al cual se le modifican los valores del lugar de las raíces para forzar a una respuesta aceptable. Se ha seleccionado un tiempo de 8 segundos para alcanzar un 98 % del resultado, lo cual se considera aceptable. Con esta información, Matlab te proporcionará los valores del PID adecuados para tu sistema.

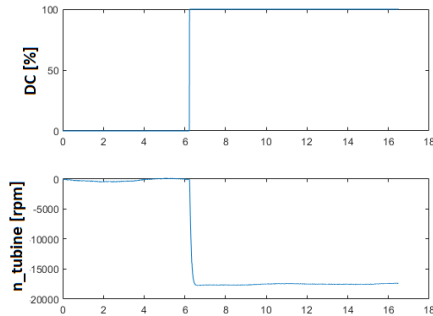


Figura 48: Entrada de escalón y salida del sistema experimental

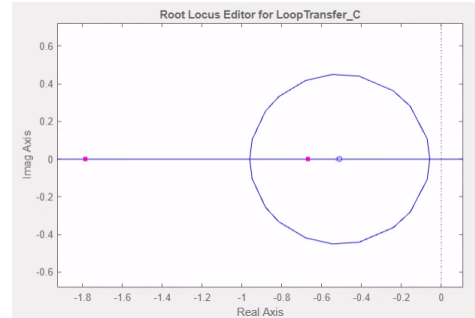


Figura 49: Lugar de las raíces del modelo matemático

## 5.6. Elaboración de una interfaz gráfica para el usuario

Es necesario que el banco se pueda controlar de forma sencilla con una interfaz en la que además, permita al usuario adquirir los datos de funcionamiento, para su análisis. Tal y como se lleva a cabo en la industria, la interfaz incluye un esquema simplificado del banco, para una mayor comprensión del ensayo. En este esquema se muestran los valores de funcionamiento de todos los componentes del banco. Los gráficos más relevantes son los de régimen de giro de la turbina y el del caudal másico. Por esa razón se incluyen en la pantalla principal. La interfaz principal permite hacer distintas funciones:

- **Cambiar del estado de funcionamiento: Stop, Manual o Auto**  
En el estado Stop el banco se encuentra en reposo, en el Manual permite poner valores específicos de las variables manipuladas (Duty Cycle y Variador de frecuencia) y en el Auto permite especificar los valores de los grados de libertad que quiere el usuario (rpm y caudal másico) activando el funcionamiento de los PID.
- **Test**  
El botón de test configura el banco en el estado de Auto pero se activa también el sistema de evaluación de la turbina. Éste se basa en probar todos los puntos en los cuales la turbina puede funcionar y va guardando los datos cuando se cumplen las condiciones de tolerancia y varianzas. La tolerancia se establece alrededor del punto buscado, comúnmente 1 % pero se puede modificar por usuario, y se cumple cuando el valor medido se encuentra dentro de sus límites. Por otro lado las varianzas comprueban que la varianza de las medidas sea menor que una establecida, si se cumple se puede asumir que el valor se encuentra en estado estacionario y se guardan los datos. Estas varianzas máximas se pueden modificar en la pestaña de configuración.
- **Grabación**  
Esta función es para grabar los datos de funcionamiento a lo largo de un tiempo, por si fuera necesario hacer un estudio en transitorio. Además, incluye un indicador de puntos guardados en total.

- Botón de Stop  
Detiene todos los procesos y cierra el programa de forma paulatina, asegurando guardar los datos en el documento de texto.

Adicionalmente, las funciones menos relevantes se incluyen otras pestañas. La pestaña de *PID Gains* permite cambiar las constantes del PID si fuera necesario; la pestaña de *Real Time*, vigilar si los bucles funcionan a la frecuencia establecida; y la de *Configuration*, cambiar parámetros de configuración avanzada como puede ser la cantidad de valores con la cual se hace media, o los valores de la varianza aceptables. La interfaz ha quedado de la siguiente manera. 50

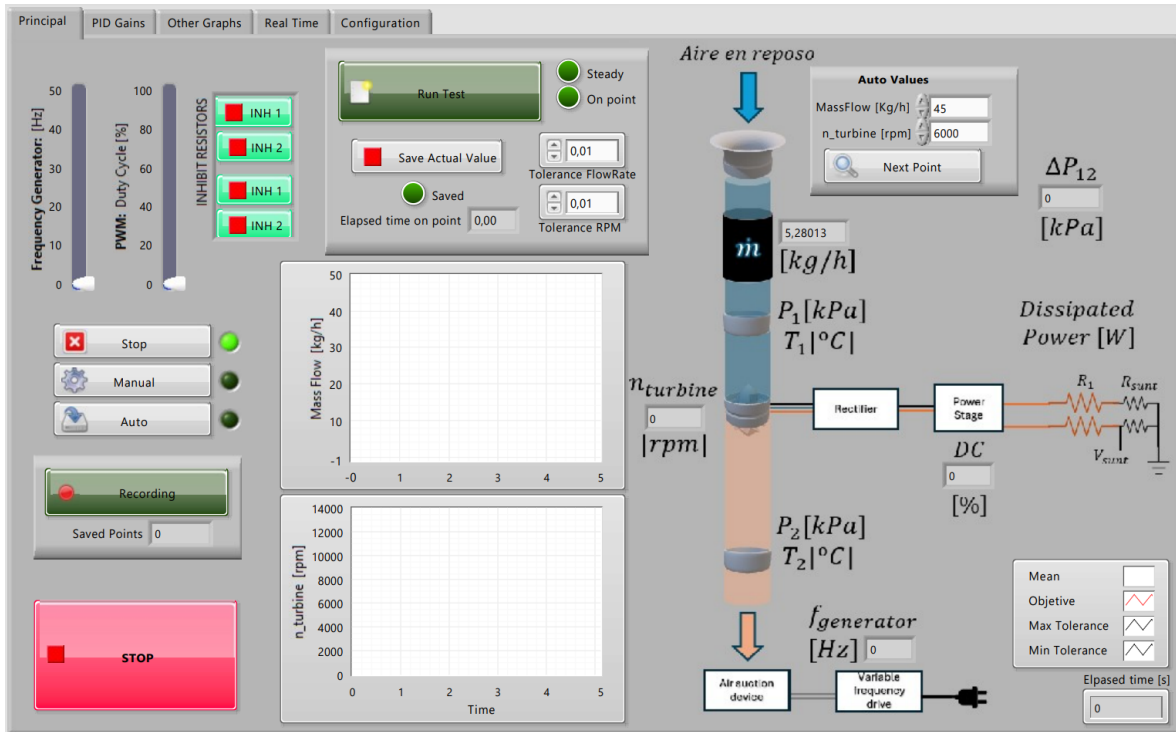


Figura 50: Interfaz gráfica para el usuario del banco

## 6. Resultados

### 6.1. Análisis de resultados obtenidos

Tal y como se ha comentado, para que los datos de funcionamiento sean fiables, se deben cumplir las condiciones de tolerancia y varianzas. De esta forma aseguramos que se mide el punto buscado y que se encuentra en estado estacionario, en la figura 51 se aprecia como se vería tal punto.

Estos puntos de funcionamiento, se han recopilado con el código de *Test* y se posteriormente se han puesto los resultados del en la figura 52. En esta figura se puede ver como el sistema de búsqueda de puntos es muy consistente. Además, se puede observar que el rango de rpm de funcionamiento para caudales máxicos altos es mayor. Esto se debe a que un mayor caudal contiene más energía útil que pueda absorber la turbina.

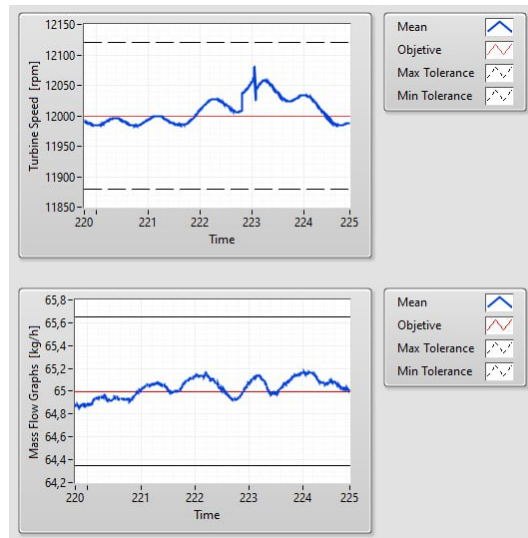


Figura 51: Durante el funcionamiento, el PID se encarga de contener los valores dentro de los límites de las tolerancias

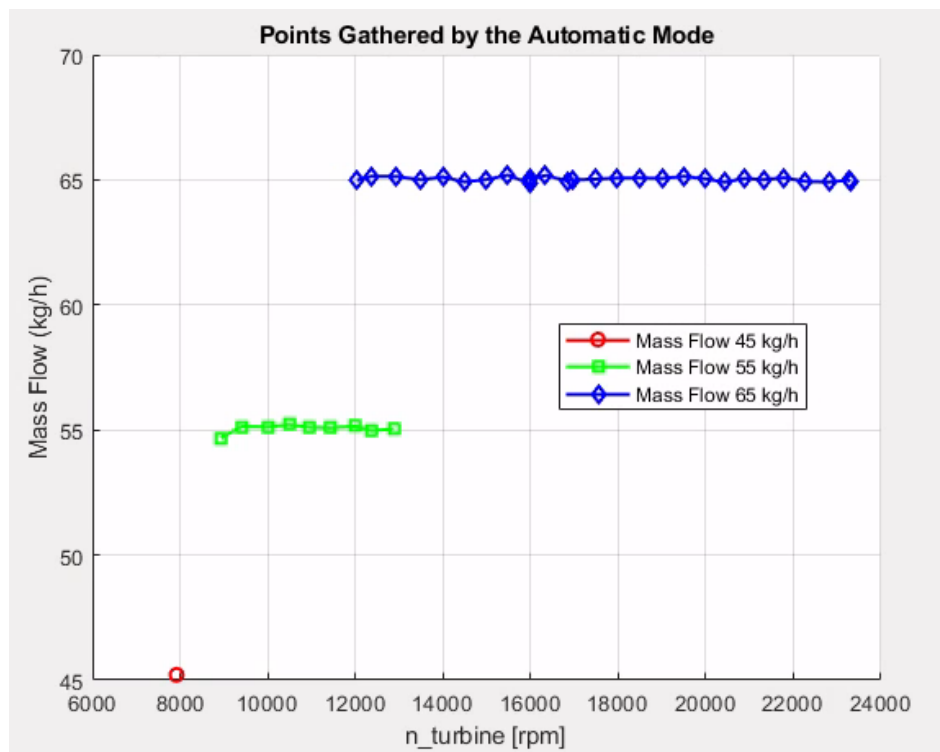
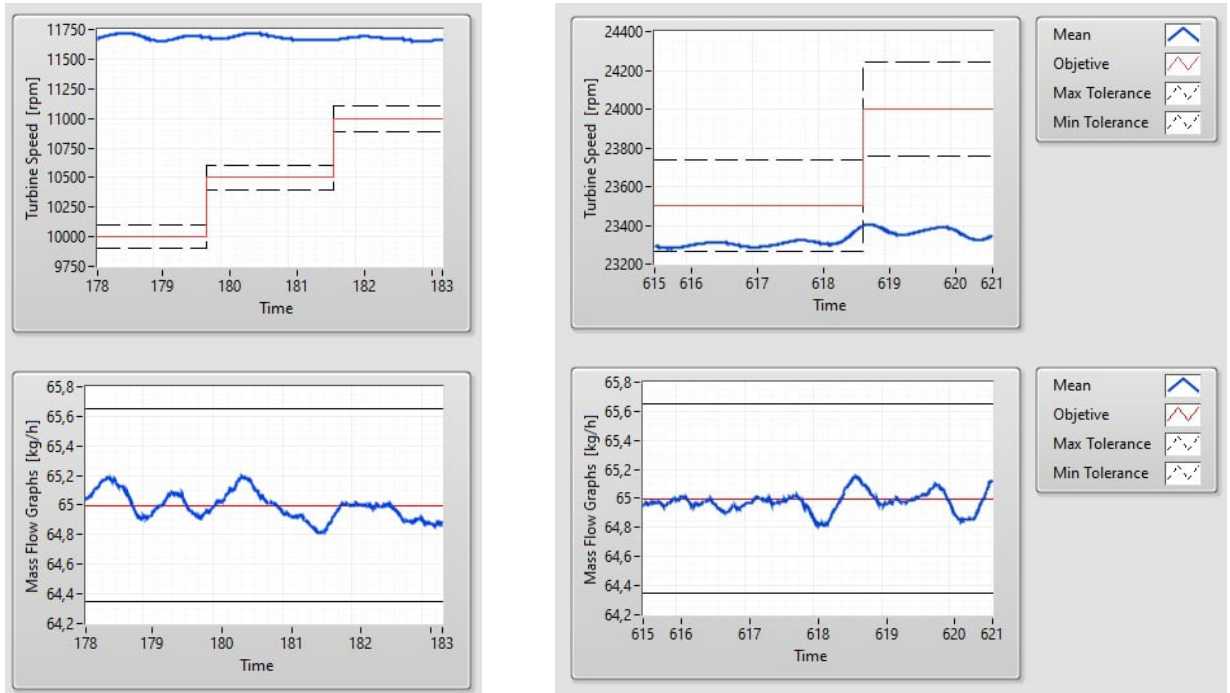


Figura 52: Puntos de funcionamiento estable obtenidos por el sistema automático

Estos límites se pueden ver también en las gráficas de la interfaz, por ejemplo en la figura 53. Manteniendo un caudal constante, si el DC se encuentra en 100 % , no se pueden reducir más las rpm.

Por otro lado, el límite superior en el cual el objetivo de rpm está por encima de la medida ocurre cuando el DC se encuentra llega a 0 %.



(a) Límite inferior, los rpm se encuentran por debajo del rango de funcionamiento (b) Límite superior, los rpm se encuentran por encima del rango de funcionamiento

Figura 53: Capturas de la interfaz cuando se encuentra fuera de los límites

Entre las distintas posibilidades, hay regímenes de giro donde el cambio es instantáneo, otros, con regímenes cercanos al umbral superior, en los cuales el motor tarda en llegar y otros en los que el valor oscila ligeramente cuando llega al resultado para luego estabilizarse. Esto se aprecia en la figura 54

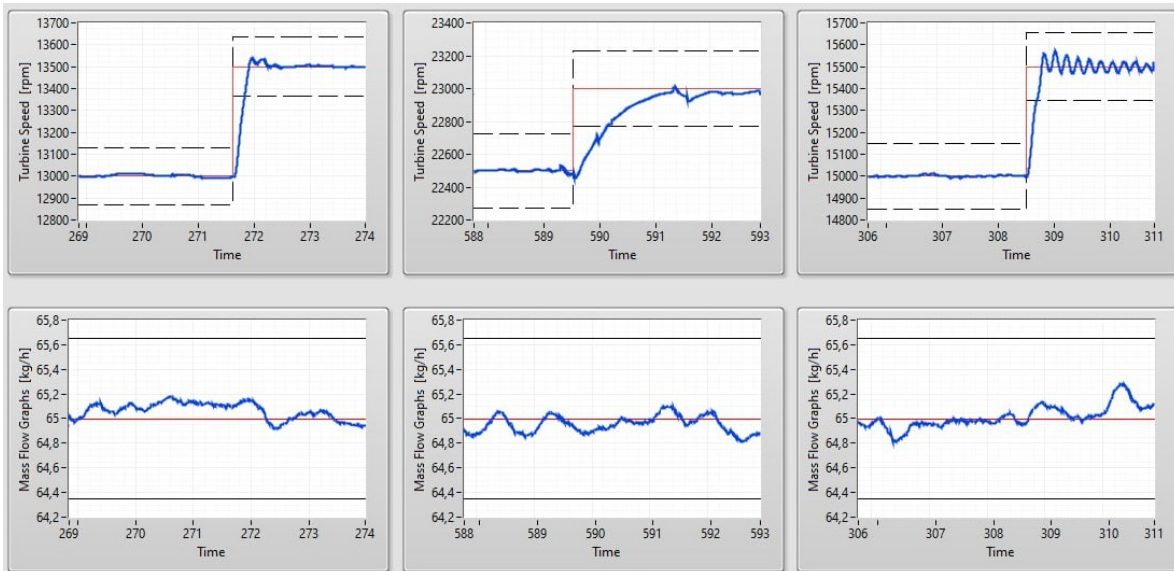


Figura 54: Diferentes tipos de saltos para diferentes regímenes de funcionamiento

En general, cuando el sistema automático está dentro del funcionamiento se pueden hacer saltos con lapsos de tiempos muy cortos, esto puede verse en la figura 55, demostrando que el sistema de

control es muy eficaz.

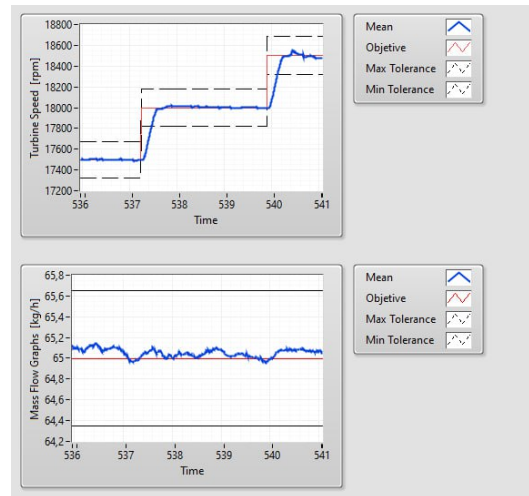


Figura 55: Captura del sistema automático en pleno funcionamiento. Se aprecian dos saltos en un lapso menor a cinco segundos.

## 7. Conclusiones y Trabajos Futuros

Tal y como se ha demostrado, el banco funciona de forma eficaz y automática, permitiendo una recolección rápida y sencilla de datos precisos y consistentes. Este sistema ha mostrado ser capaz de mantener los parámetros operativos dentro de los límites establecidos, facilitando la obtención de resultados estables y repetibles durante las pruebas de microturbinas. El banco automatizado busca los valores de las turbinas y los guarda, operando con una interfaz sencilla, lo que proporciona una herramienta valiosa para la evaluación de microturbinas a cualquier usuario. Esto representa un gran avance para el estudio de las microturbinas.

El primer paso para este proyecto será la evolución de la instrumentación para la obtención del rendimiento de la turbina. La medida de la tensión de shunt y de la temperatura son necesarias para este propósito. Si se implementan estas mejoras, será posible hacer un estudio probando diferentes turbinas para su optimización, de esta forma el diseño de la turbina cobraría mayor importancia.

También se puede comprobar la eficiencia de la transformación de la placa del rectificador, y de la etapa de potencia, ya que si se miden los parámetros eléctricos tras estos componentes, la eficiencia de la turbina se vería mermada.

Aparte de la eficiencia energética, se puede comprobar la eficiencia mecánica de la turbina, ya que el uso de un motor eléctrico como generador no es del todo eficiente y este rendimiento variará con la velocidad de giro y la carga. El montaje de los sensores de temperatura y su optimización quedan pendientes para futuros proyectos.

De todas formas, en la forma en la que está dispuesto el banco, permite ampliaciones tanto mecánicas como eléctricas. Se pueden añadir más turbinas, con sus debidas placas de rectificación. También se podría añadir un compresor el cual haya que alimentar con una corriente trifásica. De esta forma se pueden añadir todos los escalonamientos que se requieran.

## 8. Presupuesto

En esta sección se presenta el presupuesto del proyecto. Se desglosan los costes asociados a cada una de las fases del proyecto y se proporciona una estimación del coste total.



### 8.1. Costes de personal

Los costes de personal incluyen las horas dedicadas por el autor del proyecto, así como las horas de supervisión y asesoramiento por parte del tutor.

Concepto	Horas	Coste (€)
Autor	300	4500
Tutor	10	445
<b>Total</b>		<b>4900</b>

Cuadro 8: Costes de personal

### 8.2. Costes de software

Los costes de software incluyen la adquisición de licencias para el software. Aunque las licencias de estudiante han sido gratuitas, se incluye el coste original.

Concepto	Coste (€)
SolidWorks	1500
Matlab	1200
LabVIEW	1000
<b>Total</b>	<b>3700</b>

Cuadro 9: Costes de software

### 8.3. Costes de material

Los costes de material incluyen la adquisición de componentes y materiales necesarios para la construcción del banco de ensayos y la fabricación de las microturbinas. En la Tabla 10 se muestra el desglose de estos costes.

Concepto	Coste (€)
Material de impresión 3D	50
Personal de impresión 3D	200
Componentes electrónicos	500
MyRio 1900	1500
Materiales de construcción	40
Otros materiales	20
<b>Total</b>	<b>810</b>

Cuadro 10: Costes de material

### 8.4. Presupuesto total

El presupuesto total del proyecto, sumando todos los costes anteriores, se muestra en la Tabla 11.

Concepto	Coste (€)
Costes de personal	4900
Costes de software	3700
Costes de material	810
<b>Total</b>	<b>9410</b>

Cuadro 11: Presupuesto total

## 9. Anexo

### 9.1. Fotos

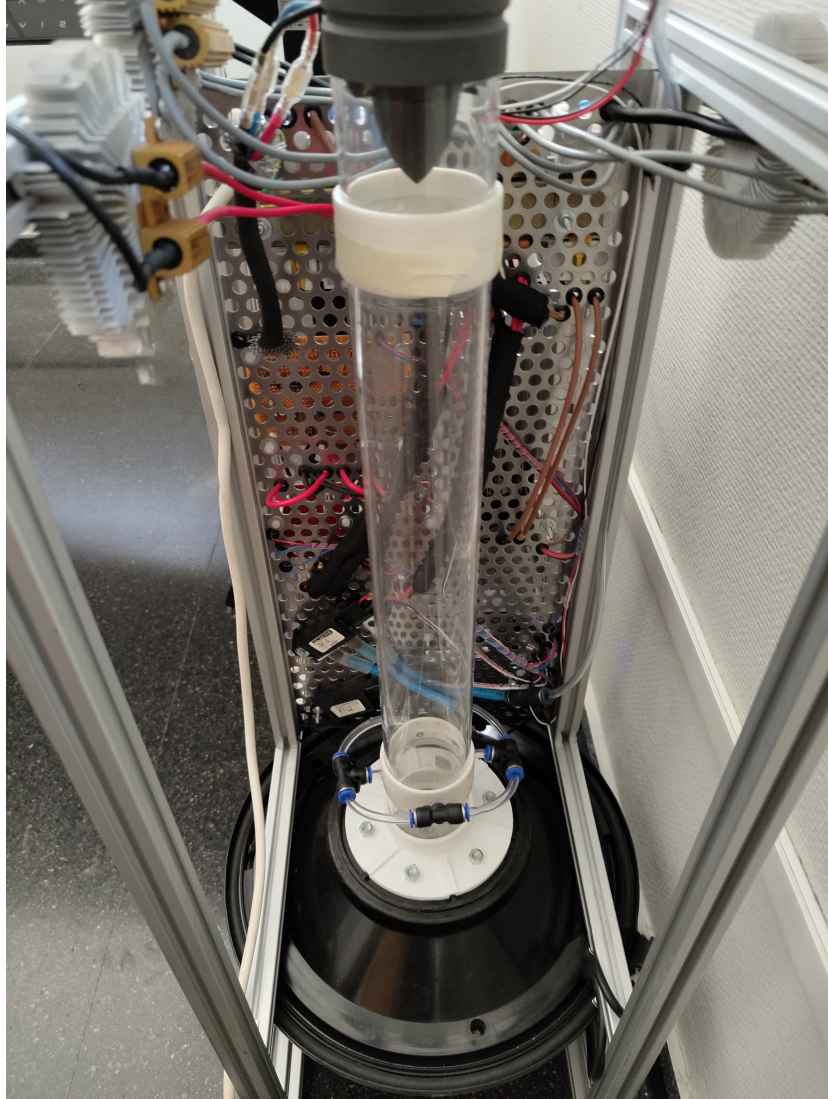
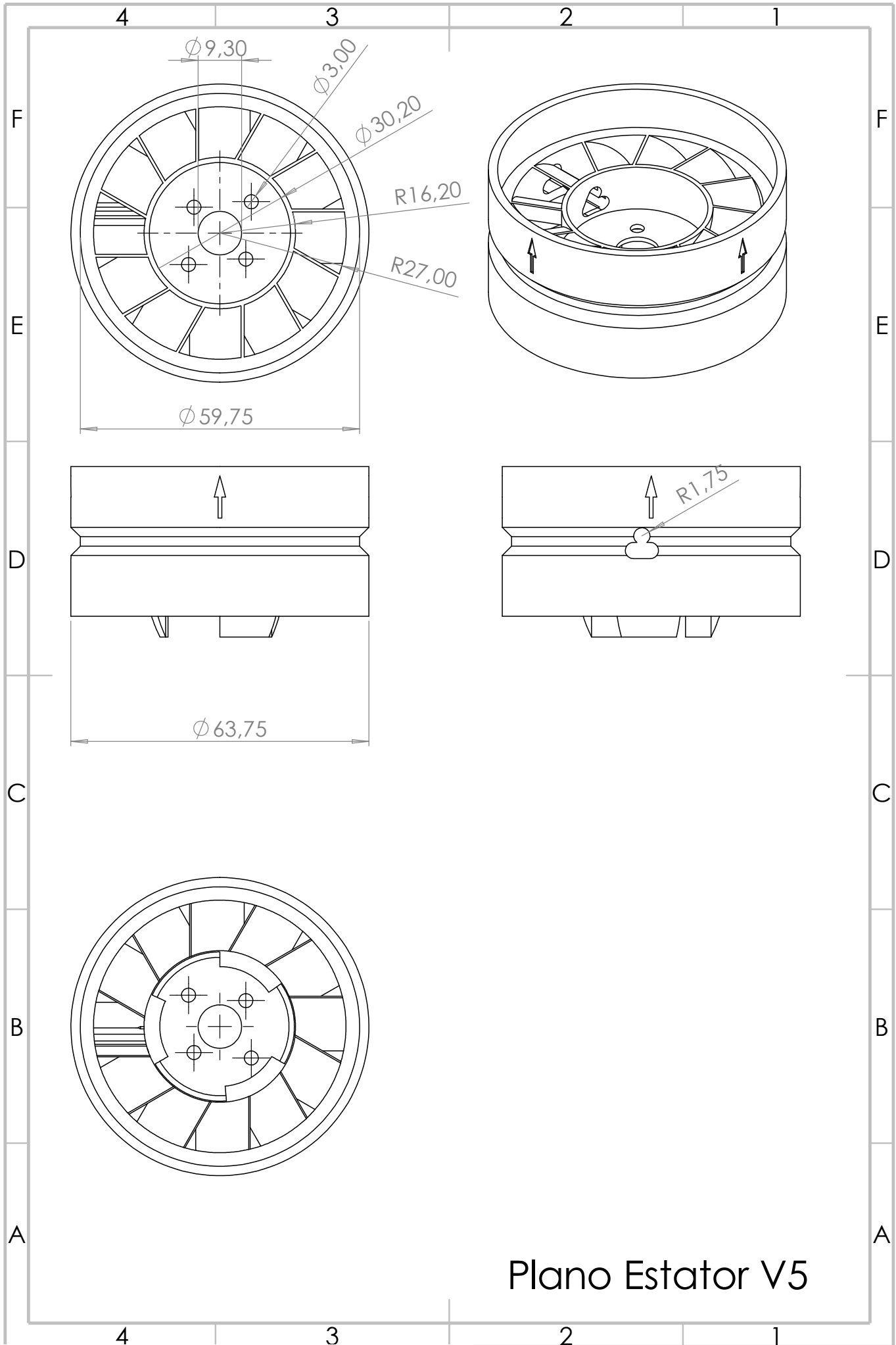


Figura 56: Vista Trasera del banco, se puede observar el cableado por debajo de la placa metálica, la turbina, los sensores de presión y el aspirador que general el flujo

### 9.2. Planos



Plano Estator V5

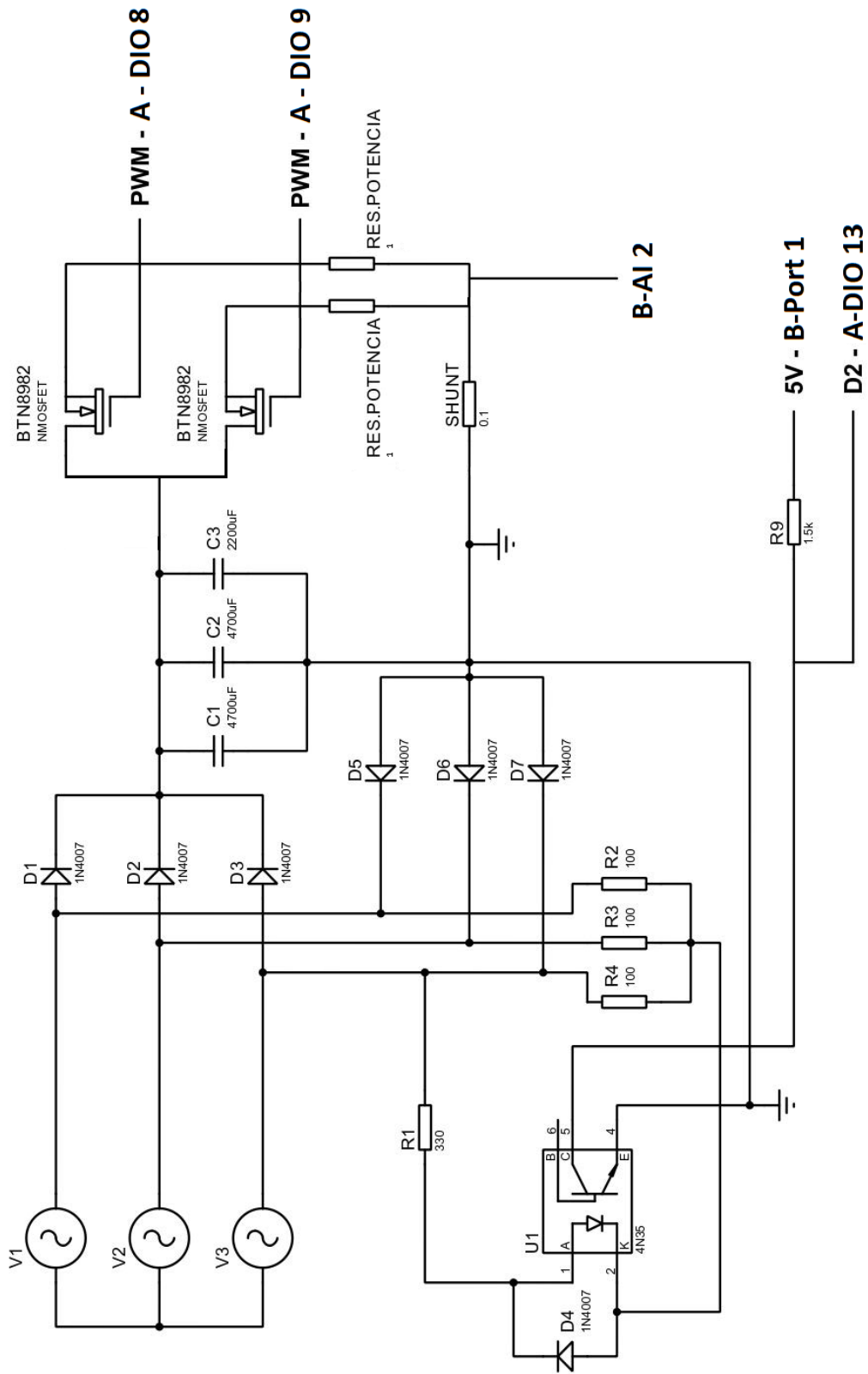
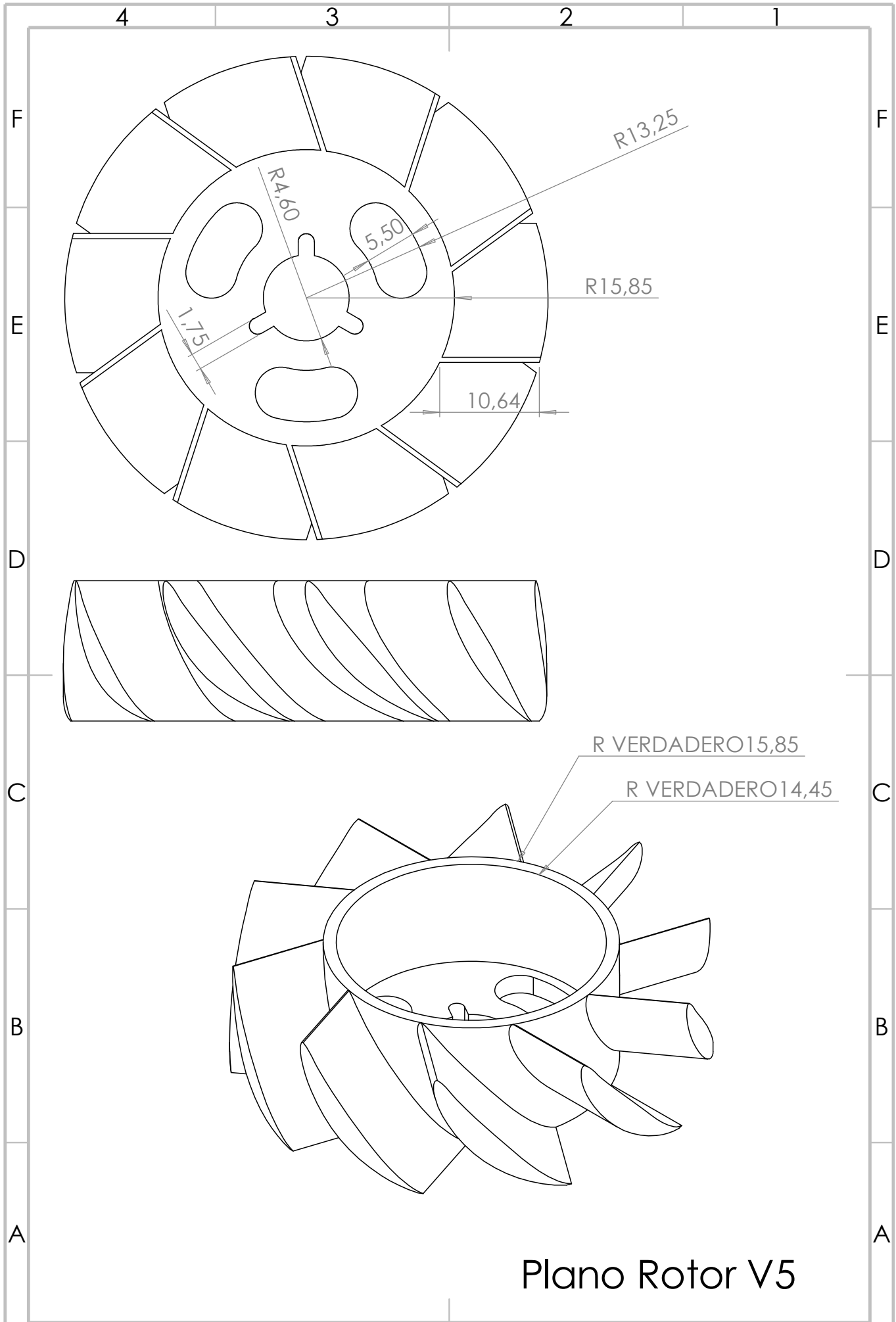


Figura 57: Circuito electrónico del Rectificador



Plano Rotor V5

### 9.3. Código MATLAB

A continuación se presentan los códigos MATLAB utilizados:

#### 9.3.1. Código de la identificación matemática del modelo experimental

```
1 load('CaracterizationTurbine.mat')
2 % Definir el intervalo de tiempo entre iteraciones basado en la frecuencia de
   200 Hz
3 Ts = 1 / 200;
4 % Suponiendo que IterationNumber es una columna en la tabla
   CaracterizationTurbine
5 IterationNumber = CaracterizationTurbine.IterationNumber;
6 % Calcular el tiempo para cada iteracion
7 t = (IterationNumber - IterationNumber(1)) * Ts;
8 t_ini = t (1);
9 t_fin = t (end);
10 % Agregar el tiempo calculado como una nueva columna a la tabla
11 CaracterizationTurbine.Time = t;
12 % Reasignar los valores a las columnas correspondientes de la tabla
13 DutyCycle = CaracterizationTurbine.DutyCycle;
14 RPM = CaracterizationTurbine.RPM;
15 RPMMM = CaracterizationTurbine.RPMMM;
16 MeanRPM = CaracterizationTurbine.MeanRPM;
17 MeanRPMMM = CaracterizationTurbine.MeanRPMMM;
18 RMSRPM = CaracterizationTurbine.RMSRPM;
19 RMSRPMMM = CaracterizationTurbine.RMSRPMMM;
20 %% Visualizar los datos
21 figure;
22 subplot(2, 1, 1);
23 plot(DutyCycle);
24 xlabel('Tiempo');
25 ylabel('Duty_Cycle');
26 subplot(2, 1, 2);
27 plot(RPM);
28 xlabel('Tiempo');
29 ylabel('RPM');
30 % Datos Diferenciales
31 y0 = 0; %inicio del experimento
32 u0 = 29800; %Punto en el equilibrio
33 Y = DutyCycle - y0;
34 U = RPM - u0;
35 figure
36 subplot (2,1,1)
37 plot (t, Y)
38 subplot (2,1,2)
39 plot (t, U)
40 %% Identificacion Manual
41 % ident
42 %% Identificacion Automatica
43 % Crear un objeto de datos de identificacion
44 iddata_obj = iddata(U, Y, Ts);
45 % Estimar un modelo de funcion de transferencia
46 modelo_planta = tfest(iddata_obj, 2);
47 % Mostrar el modelo estimado
48 disp('Modelo_de_planta_estimado:');
49 modelo_planta
50 %% Abrir rltool con el modelo de planta
51 sisotool(modelo_planta);
```

```

52 %% Calculo de valores del PID
53 syms Kp Ki Kd s
54 % Definir la funcion de transferencia del controlador C(s)
55 C = -0.0036785 * s * (1 + 0.018 * s);
56 % Definir variables simbolicas
57 % Definir la funcion de transferencia del PID
58 PID = Kp * (1 + Ki/s + Kd*s);
59 % Resolver la ecuacion simbolica para encontrar Kp, Ki y Kd
60 ecuacion = C - PID;
61 [sol_Kp, sol_Ki, sol_Kd] = solve(ecuacion == 0, Kp, Ki, Kd);
62 % Mostrar los resultados
63 disp(['Kp='], char(sol_Kp));
64 disp(['Ki='], char(sol_Ki));
65 disp(['Kd='], char(sol_Kd));

```

### 9.3.2. Código para graficar los datos de masa y rpm

```

1 % Cargar las tablas si aun no estan en el espacio de trabajo
2 load('BenchTurbinePoints4555kg.mat');
3 load('BenchTurbinePoints65kg.mat');
4
5 % Asumimos que las variables en ambas tablas tienen el mismo nombre
6 PressureDifferencekPa = [BenchTurbinePoints4555kg.PressureDifferencekPa;
7                          BenchTurbinePoints65kg.PressureDifferencekPa];
8
9 MassFlowkgh = [BenchTurbinePoints4555kg.MassFlowkgh;
10               BenchTurbinePoints65kg.MassFlowkgh];
11
12 n_turbinerpm = [BenchTurbinePoints4555kg.n_turbinerpm;
13                BenchTurbinePoints65kg.n_turbinerpm];
14
15 ElapsedTime = [BenchTurbinePoints4555kg.ElapsedTimes;
16                BenchTurbinePoints65kg.ElapsedTimes];
17
18 % Crear una nueva figura
19 figure;
20
21 hold on;
22
23 % Definir colores y etiquetas para las tres series de datos
24 colors = {'r', 'g', 'b'}; % Rojo, Verde, Azul
25 labels = {'MassFlow45kg/h', 'MassFlow55kg/h', 'MassFlow65kg/h'};
26
27 % Indices para las tres series de datos
28 idx_45kg = find(abs(MassFlowkgh - 45) <= 5);
29 idx_55kg = find(abs(MassFlowkgh - 55) <= 5);
30 idx_65kg = find(abs(MassFlowkgh - 65) <= 5);
31
32 % Plotear datos para 45 kg/h
33 plot(n_turbinerpm(idx_45kg), MassFlowkgh(idx_45kg), 'o-', 'Color', colors{1},
34      'DisplayName', labels{1}, 'LineWidth', 1.5);
35
36 % Plotear datos para 55 kg/h
37 plot(n_turbinerpm(idx_55kg), MassFlowkgh(idx_55kg), 's-', 'Color', colors{2},
38      'DisplayName', labels{2}, 'LineWidth', 1.5);
39
40 % Plotear datos para 65 kg/h

```

```

39 plot(n_turbinerpm(idx_65kg), MassFlowkgh(idx_65kg), 'd-', 'Color', colors{3},
      'DisplayName', labels{3}, 'LineWidth', 1.5);
40
41 % Etiquetas y titulo del grafico
42 xlabel('n\_turbine\_rpm');
43 ylabel('Mass\_Flow\_kg/h');
44 title('Points\_Gathered\_by\_the\_Automatic\_Mode');
45
46 % Configurar el eje X para mostrar valores enteros y evitar notacion
      cientifica
47 ax = gca;
48 ax.XAxis.TickLabelFormat = '%.0f'; % Muestra valores enteros en el eje X
49 ax.XAxis.Exponent = 0; % Evita notacion cientifica
50
51 % Mostrar leyenda y activar la cuadrícula
52 legend('Location', 'Best');
53 grid on;
54
55 hold off;

```



## Referencias

- [1] TFG de Sergio Grasa Martinez <https://riunet.upv.es/handle/10251/169662>
- [2] ISO - International Organization for Standardization. 5167-1:2022 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full <https://www.iso.org/standard/79179.html>
- [3] ASME - The American Society of Mechanical Engineers. Flow Measurement PTC 19.5 - 2022 <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/flow-measurement/2022/pdf>
- [4] Caudalímetro - HFM 2 - 0 280 217 102 - Bosch. Hot-film air-mass meter <https://www.farnell.com/datasheets/69647.pdf>
- [5] Sistema de adquisición y control - MyRio <https://download.ni.com/support/manuals/376047c.pdf>
- [6] Formlabs - Data Sheet of 3D Materials <https://formlabs.com/>
- [7] Gisowatt. Technical specifications - TechnoCleaner 20 P [https://www.gisowatt.it/en\\_S\\_TC20P.html](https://www.gisowatt.it/en_S_TC20P.html)
- [8] Aspirador industrial 20 l GISOWATT Technocleaner 20P [https://www.manomano.es/catalogue/p/aspirador-industrial-20-l-gisowatt-technocleaner-20p-16875505?model\\_id=16875322](https://www.manomano.es/catalogue/p/aspirador-industrial-20-l-gisowatt-technocleaner-20p-16875505?model_id=16875322)
- [9] Motor Brushless Graupner COMPACT 260Z R7004 <https://vueloverde.com/es/motores-brushless-outrunner-avion/1653-motor-brushless-graupner-compact-260z-r7004-48g-108w-1100kv-8809370390276.html>
- [10] Graupner. «Neuheiten '06. GRAUPNER-COMPACT-BRUSHLESS-Motoren». En: 2006, págs. 172-173.
- [11] Vishay Diode 1N4007 Data sheet <https://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>
- [12] Vishay. 4N35 Optocoupler, Phototransistor Output. <https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>
- [13] Infineon. BTN8982TA High Current PN Half Bridge. Data sheet [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTN8982TA-DS-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30433fa9412f013fbc32289b7c17](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTN8982TA-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433fa9412f013fbc32289b7c17)
- [14] Sensor de presión. <https://es.aliexpress.com/item/32621559908.html?gatewayAdapt=glo2esp#nav-specification>
- [15] Resistencia de shunt <https://es.farnell.com/arcol/hs25-r1-f/resistencia-bobinada-r1-1-leng/dp/2678672>
- [16] Aliexpress. Variador de frecuencia 2,2kW 220V. [https://es.aliexpress.com/item/1005006172052050.html?srcSns=sns\\_Copy&spreadType=socialShare&bizType=ProductDetail&social\\_params=60438499379&aff\\_fcid=cbe24c78cec34bb493c1e9f884bc0f74-1721244137971-02388-\\_ExB5901&tt=MG&aff\\_fsk=\\_ExB5901&aff\\_platform=default&sk=\\_ExB5901&aff\\_trace\\_key=cbe24c78cec34bb493c1e9f884bc0f74-1721244137971-02388-\\_ExB5901&shareId=60438499379&businessType=ProductDetail&platform=AE&terminal\\_id=d04a408d872a46739abd567c8a310b01&afSmartRedirect=y&gatewayAdapt=glo2esp](https://es.aliexpress.com/item/1005006172052050.html?srcSns=sns_Copy&spreadType=socialShare&bizType=ProductDetail&social_params=60438499379&aff_fcid=cbe24c78cec34bb493c1e9f884bc0f74-1721244137971-02388-_ExB5901&tt=MG&aff_fsk=_ExB5901&aff_platform=default&sk=_ExB5901&aff_trace_key=cbe24c78cec34bb493c1e9f884bc0f74-1721244137971-02388-_ExB5901&shareId=60438499379&businessType=ProductDetail&platform=AE&terminal_id=d04a408d872a46739abd567c8a310b01&afSmartRedirect=y&gatewayAdapt=glo2esp)

- [17] NI Community. *FPGA Digital Debounce Filter Reference Example*  
<https://forums.ni.com/t5/Example-Code/FPGA-Digital-Debounce-Filter-Reference-Example/ta-p/3996138>.
- [18] Cierres herméticos para tubos de presión  
[https://es.aliexpress.com/item/1005005936325131.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.446226edW5nSxo&algo\\_pvid=a6228e05-cb6c-4662-b25d-823238fd2dcf&algo\\_exp\\_id=a6228e05-cb6c-4662-b25d-823238fd2dcf-0&pdp\\_npi=4%40dis%21EUR%211.50%210.78%21%21%2111.39%215.92%21%402103956a17197396650113297e59f9%2112000034925114019%21sea%21ES%21774849720%21&curPageLogUId=IOP0J2lsuCiu&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery\\_from%3A](https://es.aliexpress.com/item/1005005936325131.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.446226edW5nSxo&algo_pvid=a6228e05-cb6c-4662-b25d-823238fd2dcf&algo_exp_id=a6228e05-cb6c-4662-b25d-823238fd2dcf-0&pdp_npi=4%40dis%21EUR%211.50%210.78%21%21%2111.39%215.92%21%402103956a17197396650113297e59f9%2112000034925114019%21sea%21ES%21774849720%21&curPageLogUId=IOP0J2lsuCiu&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A)
- [19] National Instruments: OneWire Utilities  
<https://www.ni.com/es/support/downloads/tools-network/download.onewire-utilities.html#372386>
- [20] Matlab: System Identification Toolbox <https://es.mathworks.com/help/ident/>  
<https://es.mathworks.com/help/ident/>