

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA
TURBINA DE GAS A PARTIR DE UN
TURBOCOMPRESOR AUTOMOVILISTICO
(Parte II)

Informe Proyecto Final de Carrera
Dpto. Ingeniería Mecánica

ALUMNOS:

Brozzi, Dario Leg. 51196

Von Scheidt, Christian Leg. 51333

TUTOR:

Ing. José Pablo Cebreiro

Indice

1.	Resumen.....	3
2.	Antecedentes.....	4
3.	Alcances y objetivos del Proyecto	5
4.	Instrumentación y medición en el equipo.....	6
4.1.	Medición de la temperatura de gases a la salida de la turbina.....	8
4.2.	Medición del número de RPM	10
4.2.1.	Principio de Funcionamiento del Sensor de RPM	11
4.3.	Medición de caudal de agua inyectada en la cámara de combustión	13
4.3.1.	Principio de Funcionamiento de los Caudalímetros	14
4.3.2.	Conexión de los Caudalímetros	15
4.3.3.	Calibración de los Caudalímetros.....	15
4.4.	Medición de caudal de aire a la entrada del compresor.....	17
4.5.	Medición de la temperatura de agua inyectada en la cámara de combustión	20
4.6.	Comentarios sobre el código utilizado.....	20
5.	Mejora del sistema de inyección de agua en cámara de combustión	22
6.	Sistemas de recuperación de energía.....	26
6.1.	Precalentador de agua	27
6.2.	Calentador de garrafa de GLP	29
6.3.	Energía Recuperada	31
7.	Rediseño de inyector de combustible y evaluación del diseño de cámara de combustión	33
7.1.	Rediseño inyector de combustible	33
7.2.	Evaluación de rediseño cámara de combustión	36
8.	Diseño de la tobera de empuje	39
8.1.	Cálculo de diseño:	41
9.	Esquemas de la máquina	433
10.	Accesorios	455
11.	Puesta en marcha.....	500
12.	Conclusiones.....	533
13.	Anexo A: Caudalímetros.....	544
14.	Anexo B: Programa Final	555
15.	Anexo C: Programa RPM	588
16.	Anexo D: Planos.....	600

1. Resumen

En el presente informe se describen las tareas realizadas a una turbina de gas, las cuales consistieron en gran parte en poder obtener información adecuada para entender su ciclo termodinámico y en qué condiciones trabaja el turbocompresor. Otras tareas que se llevaron a cabo durante el proyecto fueron en relación a buscar una mejor estabilidad en su funcionamiento y a la mejora de diversos sistemas auxiliares de la máquina.

Para obtener información de la máquina se utilizaron diversos dispositivos electrónicos especialmente pensados para relevar los datos más pertinentes, como las revoluciones por minuto del turbocompresor, la masa de aire entrante al compresor y la temperatura a la salida de la turbina entre otros.

También se buscó la forma de recuperar la energía liberada al ambiente en forma de gases calientes, para lo cual fue necesario un sistema de escape con los accesorios necesarios para dicha tarea.

En la sección 11 del informe se detallan resultados obtenidos en pruebas realizadas.

2. Antecedentes

El presente proyecto es la continuación de una primera fase inicial, en la cual se diseñaron y construyeron piezas relevantes para el funcionamiento de la turbina. En el proyecto anterior se diseñó la cámara de combustión, el sistema de lubricación, de una estructura de soporte y de un circuito de inyección de agua a la cámara de combustión. También instalaron diversos sensores, como manómetros y termocuplas que brindan mediciones en zonas críticas de la máquina.

Con lo que respecta al funcionamiento de la misma, nuestros compañeros han logrado encender de forma satisfactoria la máquina, logrando elevados valores de temperatura a la entrada de la turbina. Sin embargo, por la naturaleza misma del turbocompresor, la estabilidad de la misma dura pocos segundos a causa de factores como la variación de presión de la garrafa de GLP, caudal de agua muy elevado que podía llegar a detener la máquina debido a que no lograba evaporarse en su totalidad, entre otros.

Cabe destacar también que durante las pruebas pertinentes se detectó una longitud de llama superior al largo de la cámara de combustión, si bien nuestros compañeros modificaron el inyector con la idea de mejorar la mezcla de aire-combustible, la llama continuaba siendo suficientemente larga como para alcanzar al rodete de la turbina. A causa de esta situación crítica es que nosotros a lo largo de este informe presentaremos entre las tareas realizadas, un nuevo inyector diseñado para lograr una llama más estable y corta.

3. Alcances y objetivos del Proyecto

El principal objetivo del presente proyecto fue el desarrollo de una adecuada instrumentación de la máquina con el fin de poder realizar mediciones de presión, temperatura y caudal másico en los puntos pertinentes para graficar el ciclo termodinámico de la turbina, el ciclo Brayton. Este objetivo de instrumentar la máquina nace de la idea de crear una práctica de laboratorio para estudiantes de la Universidad en la cual puedan realizar cálculos básicos de termodinámica o también para prácticas del curso de “Turbomáquinas”.

También se tuvo como objetivo lograr una mejor estabilidad en el funcionamiento, mediante una mejora en la regulación del sistema de inyección de agua y de combustible. Con la misma finalidad se agregan accesorios a la máquina para lograr una manipulación más sencilla (debido a la robustez de la maquina) y para tener un mayor control directamente desde el tablero de control.

En concordancia con los objetivos anteriores, se diseñó y construyó una tobera de empuje a la salida de la turbina, con el objetivo de poder obtener empuje y esperando tener una mejor performance de la turbina al aumentar la presión de la cámara de combustión.

4. Instrumentación y medición en el equipo

En total se instalaron y pusieron en funcionamiento 6 nuevos sensores, con los cuales se pueden medir variables fundamentales del ciclo termodinámico:

- Termocupla (temperatura de gases de escape turbina)
- Sensor de velocidad de giro de turbocompresor (RPM)
- Caudalímetros de agua (entrada y bypass)
- Caudalímetro de aire tipo MAF
- Un sensor de temperatura de agua

Como se ha dicho antes, algunos de estos sensores no brindan información sobre variables que estén directamente relacionadas con el funcionamiento de la turbina (Ciclo termodinámico por ejemplo), pero que al variar sus valores de lectura afectan indirectamente el análisis que se puede hacer del comportamiento de la turbina, por ejemplo la temperatura del agua.

Para todos los sensores, se creó una placa con un circuito que permitiese la unificación de todos los circuitos sobre la misma, a excepción del circuito de RPM el cual posee su propia placa dada su complejidad. El esquema de ese circuito se muestra a continuación en la Imagen 1, y los detalles en las imágenes subsiguientes (Imagen 2 y 3), y se pondrá en evidencia el porqué de cada una de sus partes a medida que se vayan explicando los circuitos individuales.

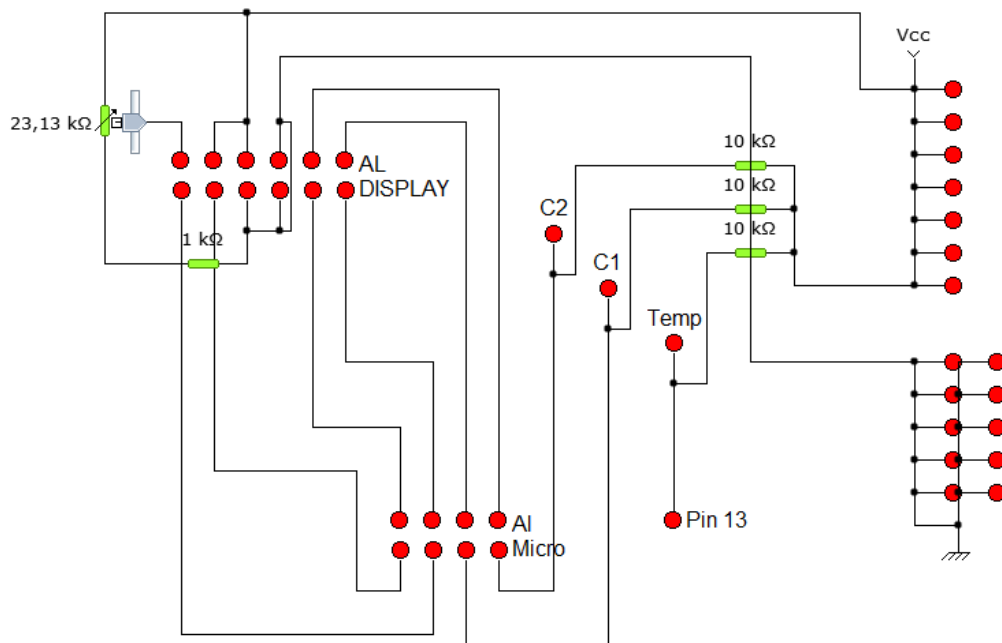


Imagen 1: Circuito completo de sensores

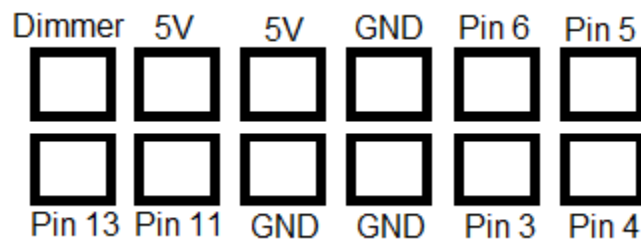


Imagen 2: Salida a Display (numeración Display)

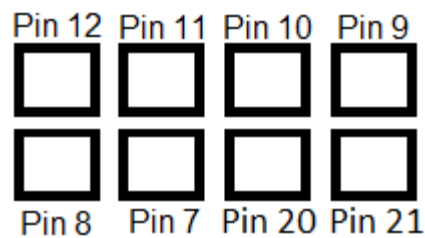


Imagen 3: Salida al Microprocesador (Arduino)

Para resguardar todos los instrumentos de medición y lograr una presentación más conveniente de los mismos se decidió armar una caja que englobase todos los elementos junto con la alimentación de 12v y 5v. Se utilizó una caja estanca de electricidad y se conectó con el

exterior por medio de pines de rápido acceso con un único sentido posible de conexión. Esta caja se muestra a continuación en la Imagen 4:



Imagen 4: Caja de sensores y micro

4.1. Medición de la temperatura de gases a la salida de la turbina

Para medir la temperatura de los gases de salida de la turbina, se utilizó una termocupla de tipo K (cromel - Alumen) con vaina cerámica, como se observa en la Imagen 5. La misma puede aguantar hasta una temperatura de 1700°C, la cual supera ampliamente las temperaturas estimadas de los gases de escape. Su rango recomendado de funcionamiento es entre 300°C y 1250°C, y cuenta con una sensibilidad de hasta 41 mV/°C.

Especificaciones de termocupla tipo K:

- Vaina de cerámica de 15 mm de diámetro y de 200 mm de largo
- Cabezal Din B
- Rosca BSP $\frac{3}{4}$ "

La misma fue instalada mediante una cupla roscada $\frac{3}{4}$ " dentro del sistema de escape a la salida de la turbina.



Imagen 5: Termocupla tipo K

4.2. Medición del número de RPM

Para conocer el punto de funcionamiento de la máquina, es necesario conocer la velocidad de giro del turbocompresor. Esta información también es importante a nivel práctico durante el arranque, para saber a partir de qué valor de revoluciones por minuto la máquina puede funcionar sin la necesidad de aire externo forzado y se estabiliza.

Para realizar la medición de la rpm se rediseñó y construyó un circuito electrónico el cual entregara una señal digital al microcontrolador. El circuito sugerido por el trabajo anterior, sobre el que se basó el rediseño, es el que se muestra en la imagen 6:

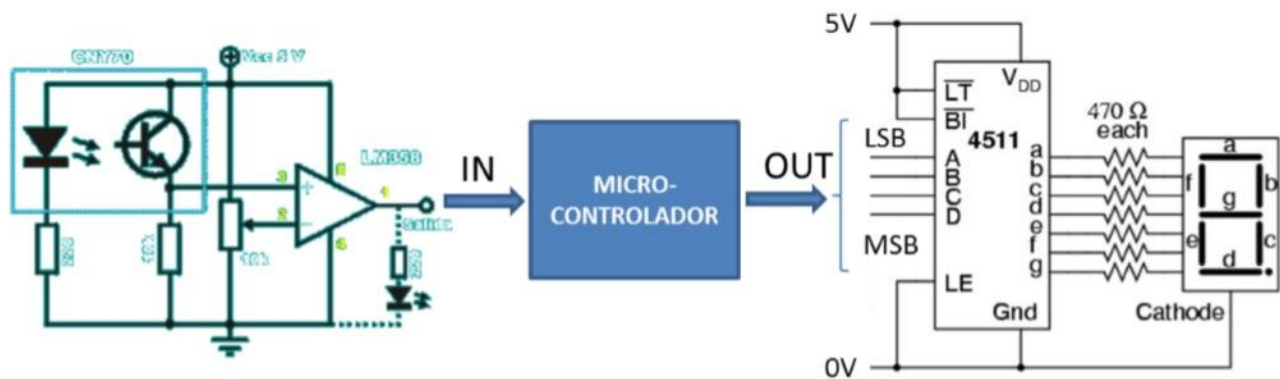


Imagen 6: Circuito electrónico RPM

El circuito consta de:

- Un optoacoplador reflectivo CNY70, que consta de un emisor infrarrojo y un fototransistor empaquetados de manera de que se restrinja la entrada de luz exterior
- Un comparador, similar al LM358.
- 2 Potenciómetros de 10 kΩ. En el diseño original, solo el voltaje de comparación poseía un potenciómetro. En el rediseño, se utilizaron 2 potenciómetros, uno semejante al del diseño original y otro a la salida del fototransistor, de manera que regule la resistividad entre la pata positiva del comparador y la salida del fototransistor.
- Una resistencia de 220 Ω en serie con el led emisor infrarrojo.

4.2.1. Principio de Funcionamiento del Sensor de RPM

Una vez conectado a una fuente de 5 Volts, el sensor CNY70 comienza a emitir luz infrarroja de manera continua. La luz es reflejada por la superficie más cercana y entra al fototransistor que permite el paso de corriente proporcional a la intensidad de luz que recibe.

Dependiendo de la resistencia ejercida por el fototransistor, el valor de voltaje en la pata positiva del comparador (3) será diferente, de manera que este voltaje variará dependiendo de qué tan cerca esté la superficie en la que se refleja la luz.

Esta última frase refleja el sentido de este sensor de RPM. Al elegir un valor de voltaje ante el cual comparar, con el potenciómetro de la pata negativa, la salida del comparador tendrá un 1 o 0 digital dependiendo de si el voltaje en la pata positiva (3) supera o no al de la pata negativa (2), respectivamente. De esta manera, si existe algún objeto frente al emisor, el valor de voltaje en la pata positiva (3) superará al de la pata negativa (2) y generará un 1 en la salida del comparador, y un 0 si se da el caso inverso en que la positiva no supere a la negativa.

Al ubicar este sistema sobre el eje del compresor (Imagen 7), como se detallará más adelante, se logra tener una seguidilla de pulsos intermitentes pero no necesariamente equiespaciados en el tiempo. Estos pulsos son digitales así que se pueden captar mediante interrupciones en el microcontrolador. Dado que los pulsos no están equiespaciados en el tiempo, se requiere que el programa del microcontrolador realice un promedio temporal entre los pulsos de las interrupciones. Todas estas condiciones están tomadas en cuenta y se pueden ver en el programa del microcontrolador que se adjunta en el anexo.



Imagen 7: Posicionamiento CNY70

Un punto de importancia que cabe aclarar es el posicionamiento que se decidió para el sensor CNY70. Se aprovechó una ranura que se le había fabricado al eje del turbocompresor

cuando se lo balanceó para lograr reducir el número de pulsos por minuto que debía leer el microcontrolador de 7 por vuelta a 1 por vuelta, reduciendo de esta manera la capacidad de procesamiento de manera considerable.

Como última aclaración, es de carácter de importancia la distancia del CNY70 a la ranura del eje. Cada vez que el sensor resulte movido por un desarme de la sección, es necesario revisar que se cumpla con la base de funcionamiento del circuito y que en la parte en la que el sensor esté sobre la ranura, el circuito marque un 1 digital y que en la parte en la que el sensor esté por fuera de la ranura, el circuito marque un 0 digital de manera que al dar una vuelta completa el programa vea un cambio en el sensor y por ende identifique la vuelta completa. El programa para realizar este test se incluye como anexo y se debe utilizar conectado a una computadora ya que no muestra los resultados en el display.

Una de las cosas que se descubrió a medida que se progresaba con el proyecto, fue la importancia de la resistencia de salida a tierra del transistor (del optoacoplador). En un principio, la misma se estableció como 56 k Ω pero esto limitaba su funcionamiento a un poco más de 20000 rpm o 350Hz como se puede ver en la Imagen 8. Utilizando el mismo gráfico como referencia, se decidió cambiar la resistencia a 1k Ω lo cual nos deja alcanzar una frecuencia máxima (teórica) de casi 10000 Hz.

En posteriores pruebas, se comprobó que la resistencia de 1k Ω permite medir las rpm que alcanza la turbina en funcionamiento estable.

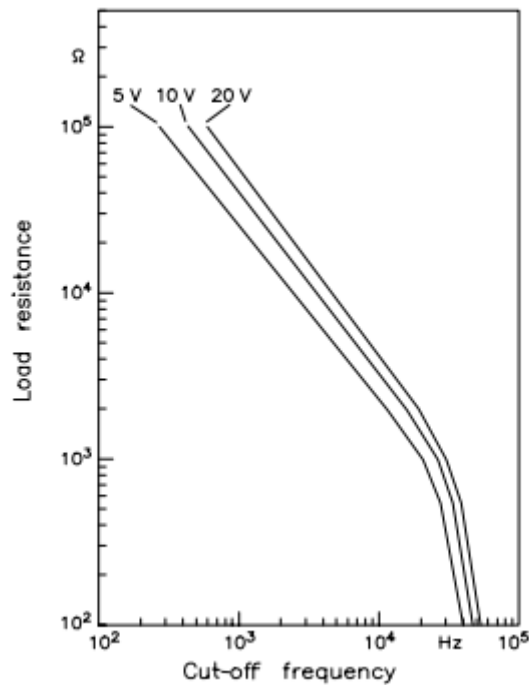


Imagen 8: Gráfico frecuencia de corte CNY70

4.3. Medición de caudal de agua inyectada en la cámara de combustión

Durante el presente trabajo se decidió medir la cantidad de agua inyectada a la cámara de combustión para tener información sobre el caudal que ingresa a la misma y por consiguiente poder determinar el aumento de caudal másico que pasa a través de la turbina.

Se utilizaron 2 caudalímetros para medir el caudal de entrada a la cámara de combustión. Uno de ellos se ubicó previo a la bomba, mientras que el otro se posicionó posterior a la válvula del Bypass de agua de manera que mide el caudal que se dirige nuevamente al tanque y no hacia la cámara. Esta disposición de los elementos de medición permite que los mismos no estén sometidos a las altas presiones generadas por la bomba y no se dañen. La ubicación de estos caudalímetros se puede ver en la siguiente imagen:

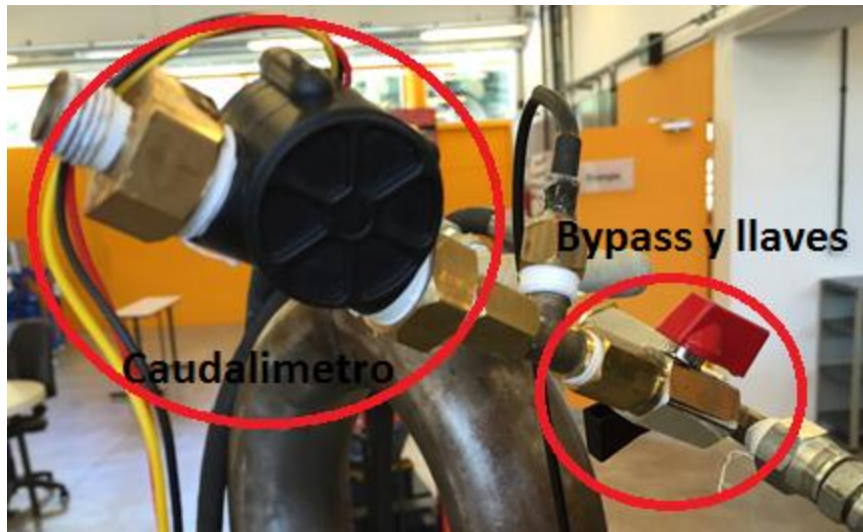


Imagen 9: Caudalímetro "2" y Bypass

Las especificaciones por las que se eligieron estos caudalímetros fueron:

- Rango de medición: 1 a 30 litros / minuto
- Rango de tensiones de alimentación: 5 a 24 VCC
- Máxima presión de agua: 2 MPa (20 bar)

Además de estas especificaciones, el resto se adjuntan como anexo.

4.3.1. Principio de Funcionamiento de los Caudalímetros

El caudalímetro tiene un sensor de efecto Hall que emite un pulso con cada revolución de las paletas internas al dispositivo. El sensor en sí, el dispositivo lector del pulso magnético, está encapsulado y no tiene contacto con el agua.

Cada pulso representa, de manera aproximada, unos 2.25 mL de fluido que pasa por dentro del dispositivo, aunque en este tipo de dispositivos el valor exacto del caudal por pulso tiende a variar hasta un 10% del valor estándar brindado por el fabricante. Dado esto, se dispuso calibrar ambos por medio de pruebas propias, como se detalla más adelante.

4.3.2. Conexión de los Caudalímetros

Los caudalímetros se conectaron con una resistencia “Pull up” tal como indica el fabricante, dentro de la “Placa Principal”. La conexión en particular de cada caudalímetro es la siguiente:

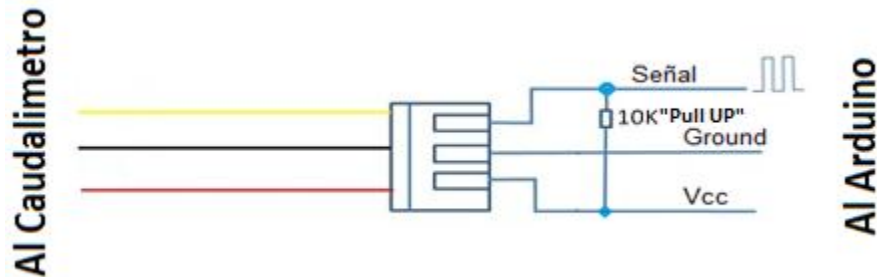


Imagen 10: Conexión de los caudalímetros

4.3.3. Calibración de los Caudalímetros

Para la calibración, los caudalímetros se conectaron en serie y a la vez a un medidor volumétrico. Para lograr la calibración se dispuso calcular la constante correcta para cada caudalímetro por medio de 15 mediciones consecutivas con diferentes volúmenes. Dado el volumen final y el número de pulsos obtenidos del sensor en el tiempo de dispensado, se puede obtener el factor (o constante) de conversión de ‘pulsos por segundo’ a caudal. La Tabla 1 muestra los datos concernientes al experimento realizado:

Tabla 1

Prueba De Calibración de Caudalímetros Conjunta					
Volumen	Volumen L	Pulsos 1	AVG 1	Pulsos 2	AVG 2
500	0.5	195	390	237	474
500	0.5	193	386	233	466
500	0.5	196	392	240	480
500	0.5	197	394	252	504
1000	1	406	406	598	598
1000	1	398	398	599	599
1000	1	396	396	604	604
1000	1	401	401	509	509
1000	1	387	387	483	483
1000	1	403	403	609	609
1500	1.5	591	394	739	492.66667
1500	1.5	601	400.6667	826	550.66667
2000	2	837	418.5	982	491
2000	2	809	404.5	952	476
2000	2	808	404	1207	603.5
	Promedio		398.3111		529.32222
	Total		6.6385185		8.8220370
	Valores Corregidos con Caudal Más Estable				

De estos valores se decidió tomar como constantes de trabajo: 6,64 para el caudalímetro marcado físicamente como 1; y 8,82 para el marcado físicamente como 2.

4.4. Medición de caudal de aire a la entrada del compresor

Otro de los sensores que se incluyó en este proyecto fue un sensor de caudal de masa de aire (MAF). Este sensor convierte el caudal de aire que ingresa al compresor en una señal analógica variable entre 0 y 5 volts.

De los diversos tipos de MAF que se encuentran en el mercado, se decidió comprar un sensor de “alambre caliente”, dado que es el que representa una buena relación entre precio y calidad.

Básicamente el sensor se compone de 3 partes: un termistor, un “hilo caliente” de platino y un circuito electrónico conectado a este hilo caliente.

El termistor mide la temperatura del aire entrante. El circuito de control mantiene el hilo caliente a una temperatura constante en relación con la temperatura medida por el termistor. En la medida que aumente el flujo, el hilo comenzará a perder calor más rápidamente lo que su conductividad se verá incrementada. Con este incremento en conductividad, se ve representado un pasaje de corriente mayor por el hilo caliente. El circuito mide este flujo de corriente y emite un voltaje proporcional.

En lo que respecta a este sensor MAF en particular, se utilizó un “Hot-film air-mass meter, type HFM 5” de Bosch. A este equipo se lo modificó para mover la curva característica del equipo, de manera que disminuyera la resolución a bajos caudales pero que mejorase dentro del rango de caudales con los que trabaja la turbina.

De acuerdo a la información suministrada por la empresa que realizó la modificación, se obtuvieron los siguientes datos de las pruebas sobre el MAF modificado:

Tabla 2: Datos Suministrados por el fabricante del sensor tipo MAF

Datos Suministrados

Medición	Tensión	Kg/Hr
1	0	0
2	0	8
3	0	10
4	1.23	15
5	1.47	30
6	1.83	60
7	2.81	120
8	2.92	250
9	3.29	370
10	3.55	480
11	3.84	640
12	4.15	850
13	4.33	1000

A partir de la Tabla2 se llegó a una función aproximada, caracterizada por un polinomio de orden 4 ya que tiene menor error comparada con funciones polinómicas de órdenes más bajos (2 y 3). A continuación se incluye la comparación entre las posibles funciones polinómicas de diferentes órdenes y el porqué de la decisión de utilizar una función de orden 4 como aproximación:

- Polinomio Orden 4:

$$4.64945 x^4 - 20.4563 x^3 + 66.4146 x^2 - 52.0121 x + 6.00107$$

- Polinomio Orden 3:

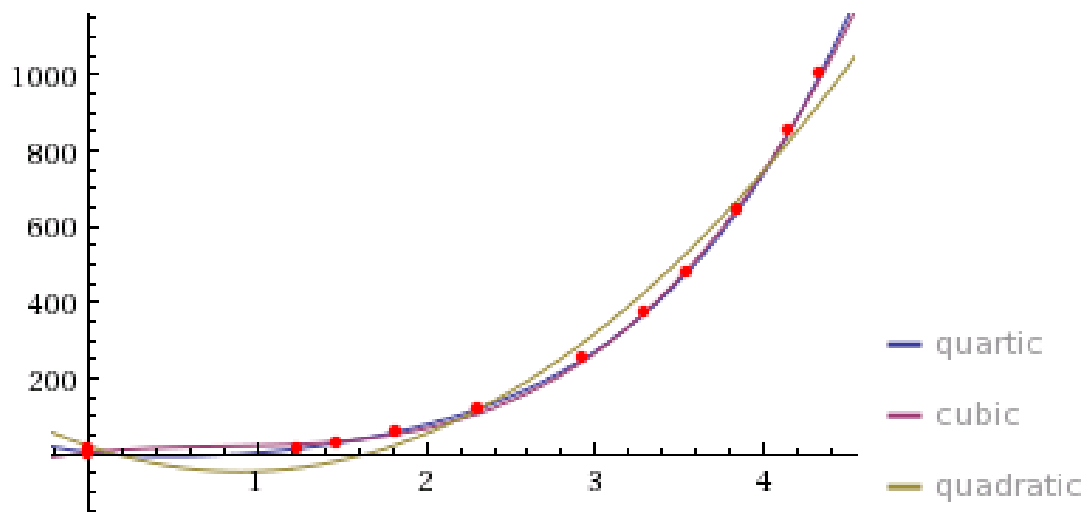
$$21.2107 x^3 - 50.2837 x^2 + 47.5936 x + 5.02839$$

- Polinomio Orden 2:

$$82.5801 x^2 - 148.796 x + 22.2069$$

	AIC	BIC	R^2	adjusted R^2
quartic	69.5728	72.9625	0.999956	0.999934
cubic	98.4863	101.311	0.999526	0.999368
quadratic	141.292	143.552	0.985116	0.98214

x : Tensión de salida MAF



Con la función seleccionada se programó el arduino para leer la señal analógica de entrada y devolver el caudal de aire que corre por el sensor.

4.5. Medición de la temperatura de agua inyectada en la cámara de combustión

Este último sensor tiene un sentido de carácter académico más que de utilidad para el control de la estabilidad de la turbina. Esto refiere a que es útil para evaluar la eficiencia energética recuperada por el intercambiador a la salida de la turbina y no tanto para el control de la temperatura del agua de inyección a la cámara.

El sistema para transmitir desde el sensor al microprocesador es sencillo y equivalente al de los caudalímetros. Existe únicamente una diferencia en la forma digital de comunicación que existe entre el microcontrolador y el sensor pero no en el conexionado.

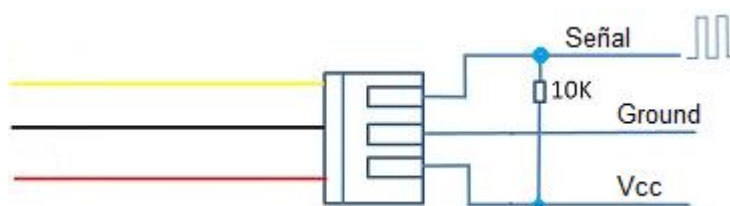


Imagen 11: Conexionado de sensor de temperatura

Todos los sensores del tipo "One Wire" (Este sensor de temperatura es uno de ellos) se comunican por un protocolo el cual le permite al microcontrolador pedirle al sensor que envíe o reciba información en un momento determinado pero que se mantenga apagado el resto del tiempo (esperando la señal de largada).

4.6. Comentarios sobre el código utilizado

Es importante realizar algunos comentarios finales sobre el código utilizado para evitar inconvenientes en futuras actualizaciones.

Se incluye el código como anexo ("Anexo: Programa Final") para que se pueda cargar en nuevos dispositivos.

Durante el desarrollo del código destinado a este programa se encontraron varios inconvenientes con la cantidad de interrupciones que se generan por segundo. Esto causó que se modificara el código para que solo pudiera recibir interrupciones desde los periféricos en los momentos previos a que al cálculo correspondiente.

A partir de esto, se decidió que el programa trabaje como una máquina de estados. Cada 500 a 2000 milisegundos se cambia de estado (dependiendo en qué estado se encuentre), bloqueando todas las acciones de los otros estados y así evitando que se crucen las interrupciones desde los diversos periféricos.

Más allá de esta breve explicación sobre el ciclo principal de funcionamiento del programa, el resto de las funciones del programa se explican en las diferentes secciones correspondientes a los diferentes periféricos.

En la imagen 12 se incluye un esquema del Arduino Mega 2560 utilizado como microprocesador:

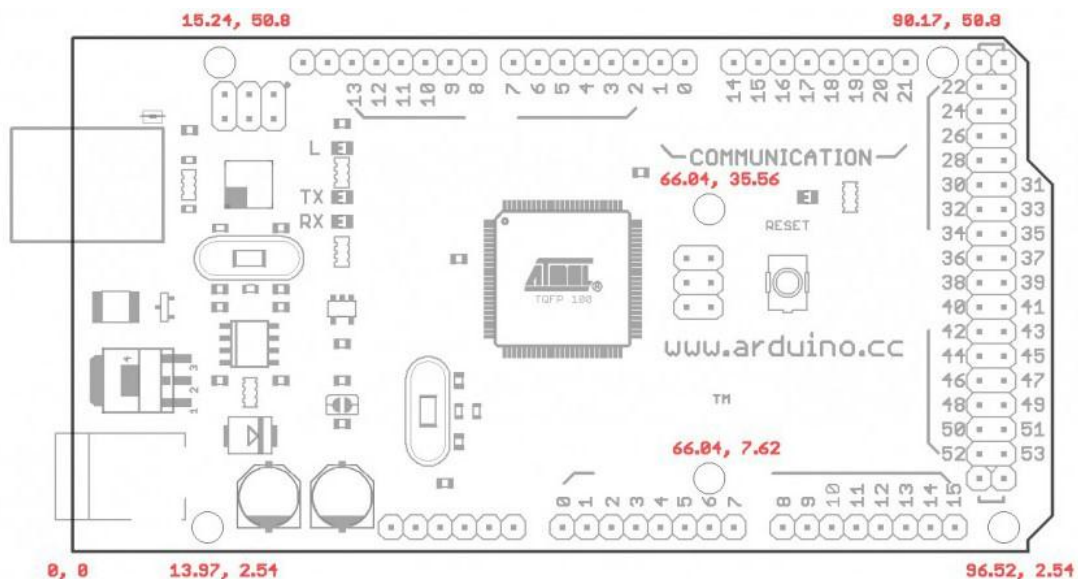


Imagen 12: Esquema Arduino Mega 2560

5. Mejora del sistema de inyección de agua en cámara de combustión

Una de las tareas más relevantes para la mejora del funcionamiento de la máquina, fue el de mejorar el sistema de inyección de agua dentro de la cámara de combustión. En el proyecto anterior no se lograba una adecuada pulverización del agua, lo cual provocaba la “inundación” de la cámara de combustión y el apagado de la combustión. Los motivos principales de este efecto indeseado son la mala pulverización del agua entrante y el alto caudal de agua debido a que no se contaba con un sistema de control sobre la bomba (regulación de caudal entregado) y tampoco con un circuito de bypass adecuado.

A raíz de estos problemas se fijó como objetivo mejorar la pulverización y lograr una regulación del caudal de agua entrante con la finalidad de que se pueda lograr un enfriamiento de los gases de escape sin comprometer el funcionamiento de la turbina. Si bien el grupo predecesor contaba con una bomba de agua de pistones (hidrolavadora propiedad de uno de los alumnos), el proyecto en sí no contaba con ninguna bomba para el sistema de inyección de agua, por lo que se analizaron las distintas variables en las cuales se tuvo en cuenta la necesidad de tener altas presiones para la pulverización y al mismo tiempo tener un control del caudal de agua.

Se evaluó utilizar como bomba de agua una bomba de aceite (típica de motores de auto) accionada por un motor eléctrico. La ventaja que tiene este sistema es que se puede buscar la forma de controlar los caudales de agua y presión mediante el control del motor eléctrico. El inconveniente de este sistema es su costo y complejidad.

Debido a esto se optó nuevamente por una hidrolavadora, en este caso una Kommmberg de 1400 W de potencia (bomba axial), capaz de alcanzar presiones de hasta 110 bar y manejar caudales de 6 Lts/min, los cuales se adecuan a las necesidades de la máquina. Con lo que respecta al control de caudal inyectado dentro de la cámara de combustión, se realizó un sistema de bypass para desviar parte del caudal que entrega la bomba de agua mediante una válvula esférica y de esta forma controlar el caudal que se desea inyectar.

Se debe tener en cuenta que la bomba de agua levanta presión según las resistencias al flujo que tenga el caudal entregado (aguas abajo) por lo que al disminuir el caudal que se desvía por el bypass mediante la válvula esférica, aumenta el caudal inyectado dentro de la cámara y por lo tanto también aumenta la presión.

Este comportamiento trae ventajas a nuestro sistema enfriador de gases de combustión ya que al enviar un mayor caudal dentro de la cámara de combustión aumenta la presión y mejora la pulverización del agua inyectada. Por lo tanto se evapora con mayor facilidad. Por otro lado, la capacidad de pulverización no parecía la adecuada, dado que en varias pruebas la cámara de combustión se “inundó” y se apagó la llama. Debido a esta situación se buscaron distintas soluciones, todas destinadas a modificar los inyectores instalados previamente. Estos inyectores eran 3 con agujeros de 1mm de diámetro, los cuales estaban equiespaciados cada 120 grados y apuntando en la misma dirección en la cual fluye el aire secundario por la cámara de combustión, lo cual es muy razonable ya que además de cumplir con la tarea de enfriar los gases de combustión, permite una refrigeración de las paredes del tubo de llama. Por esta razón es que entre las posibles soluciones, nunca se optó por modificar su posicionamiento o dirección de flujo.

Un objetivo para mejorar la pulverización era el de encontrar la forma para que aumente la presión, entonces se pensó la forma de reducir la sección de salida con la que contaba el flujo. Una opción era la de tapar un agujero, pero si bien podía llegar a funcionar (al igual que tapar dos), afectaba a la homogeneidad angular del flujo de agua y su distribución a lo largo de la cámara de combustión, por lo que se descartó. La siguiente opción era la de reducir los agujeros de 1mm.

Mediante las pruebas pertinentes se estableció que sería ideal para la pulverización que los agujeros fuesen aproximadamente de 0,4mm de diámetro. Mediante puntos de soldadura se sellaron los agujeros existentes, para luego intentar realizar agujeros nuevos de



Imagen 13: Inyector tapado por punto de soldadura

0,4mm de diámetro. Si bien se consiguieron las mechas con las dimensiones deseadas, constructivamente era imposible realizar tales agujeros, en cada intento se rompían las mechas antes de poder atravesar siquiera un inyector suponemos que se debía a la dureza del punto de soldadura y del mismo acero inoxidable del inyector. Por este motivo fue descartada esta solución.

Consecuentemente se buscó en el mercado piezas mecánicas estándar que tuviesen orificios con dimensiones acordes a lo que se buscaba. Investigando en la industria del automóvil se encontró el “chicler” (Jet Main), el cual es un componente mecánico que utilizan los carburadores para regular el paso de aire o combustible. Dicho componente se puede encontrar en diferentes medidas, para nuestras necesidades se tuvo que recurrir a chicler de carburadores de moto, ya que los orificios estándares con más pequeños. Hemos obtenido chiclers marca AMAL con orificios de 0.25 mm, 0.30 mm y 0.35mm. En la imagen 14 se puede ver un chicler con orificio de 0,25 mm.



Imagen 14: Jet Main AMAL 25

Dado que este componente tiene una rosca de $\frac{1}{4}$ bsp, se tuvo que agujerear los inyectores con una mecha de 5,5 mm y realizar una rosca interna de $\frac{1}{4}$ bsp, tal cual muestra la imagen 15. De esta manera se puede instalar el chicler. En la imagen 16 se pueden observar los chiclers roscados e instalados. La ventaja de este nuevo inyector de agua, es la facilidad de cambio en el caso de que sea necesario. Solamente debe enroscarse o desenroscarse el componente.



Imagen 15: Fabricación rosca interna inyector



Imagen 16: “Chiclers” instalados

Si bien estos componentes mecánicos no están diseñados para pulverizar, al utilizar elevadas presiones se logra una perfecta pulverización del agua. Cabe remarcar que al variar la cantidad de caudal que se desvía por el bypass la presión del sistema varia, por lo tanto no siempre está en condiciones de alta presión. Sin embargo, aún en condiciones de presiones moderadas, el chorro de agua tiene la fuerza suficiente como para pulverizar el agua si el mismo impacta contra algún objeto. Esto se puede apreciar en la imagen 17.



Imagen 17: Pulverización agua

En el caso puntual de la máquina, el chorro de agua impacta contra la superficie del cono superior del tubo de llama de la cámara de combustión, logrando una excelente pulverización también a presiones moderadas en la inyección de agua.

6. Sistemas de recuperación de energía

Con el fin de mejorar la eficiencia térmica de la máquina, se evaluaron varias posibilidades de recuperar la energía entregada al ambiente por los gases de escape. En el mercado del PowerGeneration mediante turbinas de gas existen diversas tecnologías aplicadas a la recuperación de la energía y mejora de eficiencia térmica de los ciclos termodinámicos, ya que los gases de escape calientes de la turbina representan una fuente de energía considerable (que es desaprovechada si es tirada al ambiente). Ciclos conocidos son por ejemplo el Ciclo Regenerativo (Imagen 18), en el cual los gases de escape se aprovechan para precalentar el aire a la entrada de la cámara de combustión disminuyendo la cantidad de combustible necesario.

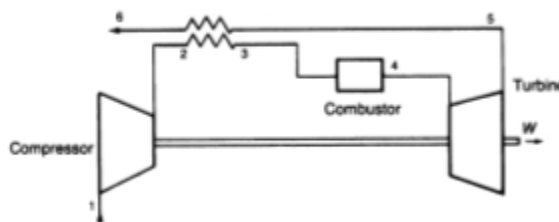


Imagen 18: Ciclo Regenerativo

Otro ciclo aplicado es el Ciclo de Inyección de Vapor (Imagen 19), aquí se utilizan los gases de escape para producir vapor e inyectarlo antes de la cámara de combustión. La ventaja principal de este ciclo es que aumenta el flujo de masa que atraviesa la turbina, aumentando el trabajo de la turbina sin comprometer el trabajo del compresor. Esta solución trae además ventajas ambientales, dado que disminuye la temperatura en la zona de combustión y por lo tanto limita también la producción de NOx.

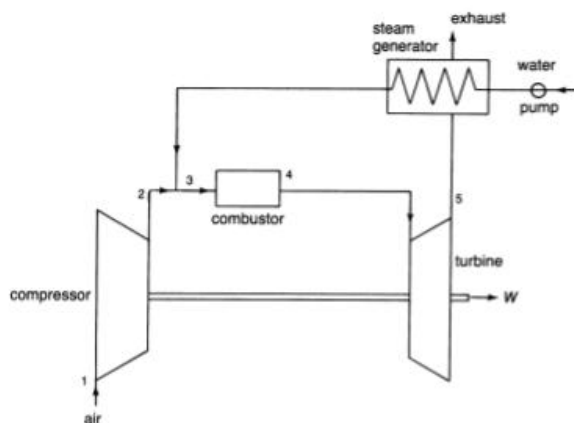


Imagen 19: Ciclo con Inyección de Vapor

Con estos ciclos como referencia, se desarrolló un sistema de recuperación precalentando el agua del sistema de inyección de agua. Al ser difícil desviar los gases calientes hacia un intercambiador de calor externo donde se recupere la energía, se realizó un intercambiador de calor mediante una serpentina de cobre en el sistema de escape de la turbina con la idea de recuperar el calor con el agua, para luego

poder desviar su caudal con facilidad hacia donde se quiera utilizar el calor absorbido. Si bien este método trae pérdidas de eficiencia térmica debido a que se realiza un intercambio de calor en al menos dos etapas en lugar de una, tiene la ventaja constructiva enorme al evitar la necesidad de hacer un desvío de gases calientes.

6.1. Precalentador de agua

En una primera instancia se intentó colocar una serpentina de cobre en el exterior del escape, por la cual circula agua. Si bien este sistema es fácil de construir, no se lograba obtener un contacto perfecto a lo largo de toda la serpentina, y en este tipo de intercambiador de calor es un factor clave que haya un excelente contacto. Este contacto se podría haber optimizado si se realizaban puntos de soldadura en varios puntos de la serpentina, pero debido a la dificultad de soldar cobre con acero (material del escape) no se llevó a cabo.



Imagen 20: Serpentina de cobre

Para resolver el problema del contacto, se avanzó sobre el desarrollo de una serpentina interna co-axial al sistema de escape. Con esta nueva disposición, los gases de escape están en contacto directo con la serpentina, lo cual favorece considerablemente la transmisión de calor. Una consideración que se tuvo en cuenta en el desarrollo de este sistema, fue que la serpentina tuviese el mismo diámetro interno que el tubo de escape de turbina para no provocar pérdidas de carga aguas abajo.

La serpentina se realizó con caño de cobre de $\frac{1}{4}$ ", y consiste en 21 espiras con un diámetro interno libre de 101,6 mm (se debe a que se utilizó para su fabricación un caño de 4", con diámetro externo 101,6 mm). La misma se introdujo dentro de un caño de acero de 5" (tipo estructural de 2 mm de espesor), y se selló con bridas soldadas para acoplarlo al sistema de escape.

En la construcción de este “economizador” (Imagen 21), se tuvo el problema de soldar cobre con acero ya que estos materiales tienen una gran diferencia en sus temperaturas de fusión, 1086 °C para el cobre y 1375 °C para el acero. Por ello es que se realizó una soldadura autógena de Plata, la cual adhirió perfectamente a ambos materiales. Este tipo de soldadura se caracteriza por no producir la fusión de los materiales base y por ser una soldadura “blanda”, lo cual no afecta al funcionamiento de nuestro artefacto ya que el cordón de soldadura no tiene una gran sollicitación mecánica.



Imagen 21: Sistema recuperador de energía en fabricación



Imagen 22: Precalentador de agua terminado

La primera aplicación de este sistema de recuperación de energía fue la de que el agua precalentada sea la misma que luego se inyecte dentro de la cámara de combustión. La ventaja de precalentar el agua inyectada es que facilita la evaporación de la misma dentro de la cámara de combustión, lo cual es importante para cuando la presión con la cual se la inyecta no es tan elevada como para lograr una mejor pulverización. Esto trae como inconveniente la disminución del poder enfriador que tiene el agua pero carece de importancia termodinámica. Sin embargo como el calentamiento del agua no llega a formar vapor dentro del economizador, este problema se resuelve aumentando el caudal de agua inyectada.

6.2. Calentador de garrafa de GLP

Del caudal total de agua que se precalienta, el caudal que se inyecta en la cámara de combustión representa alrededor un 20% (valores obtenidos en pruebas). El restante caudal es una fuente de energía extra que se utilizó para resolver un problema que había en el sistema de inyección de combustible. El problema consistía en la pérdida de presión de la garrafa debido al enfriamiento del gas por su expansión, si bien este problema puede ser resuelto invirtiendo la posición de la garrafa asegurándose que salga el combustible en estado líquido, en la etapa de encendido es más sencillo que el combustible se inyecte en estado gaseoso por lo que el efecto de pérdida de presión está presente. Por lo tanto se pensó en utilizar el agua precalentada para calentar el gas e intentar que la presión del combustible no caiga tanto. Una de las ideas era construir un pequeño intercambiador de calor en el cual una serpentina con gas sea bañada por el agua caliente. Teniendo como objetivo un artefacto de bajo costo se pensó realizarlo con chapa galvanizada pero este material presentaba dos inconvenientes. El primero es la dificultad para soldar los accesorios pertinentes para las conexiones de gas y agua, y el segundo es que investigando se encontró que en una sistema de cañerías en la cual se use caños de cobre y algún material galvanizado aguas abajo, los iones de cobre arrastrados desde los caños de Cobre se cementan en el Zinc del galvanizando, oxidando al mismo debido a que se forma una

pila bimetálica Cu/Zn sobre el galvanizado. Esta información esta detallada en las normas UNE 12502.3, UNE 112076, UNE 112081, sobre tuberías de acero galvanizado. El segundo inconveniente es que si la temperatura del agua supera los 60 °C, la polaridad del Zinc se invierte respecto al acero del tubo y se corroe. Por estas razones, se descartó esta opción y, como la opción de utilizar acero inoxidable era muy costosa, se inclinó por la opción de utilizar un recipiente de plástico al cual se vierte el agua caliente y allí se sumerge la serpentina de gas.

Otra opción era la de enviar todo el caudal de agua directo contra el cuerpo de la garrafa, la cual es una opción válida.

Mediante pruebas de funcionamiento, se comprobó que esta última opción solucionó el problema del enfriamiento y caída de presión de la garrafa, logrando mantener una presión de inyección constante, la cual se midió con un manómetro dispuesto como se puede apreciar en la Imagen 32(Esquema circuito combustible). Obviamente es una solución temporal efectiva, la cual en futuros desarrollos del proyecto se podría modificar para mejorar su eficiencia.

6.3. Energía Recuperada

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del precalentador de agua se realizaron mediciones pertinentes para saber qué cantidad de energía se recupera en el ciclo. Promediando los distintos valores de caudal y temperatura del agua, se pudo calcular la entalpia recuperada de los gases de escape. Se consideró como temperatura del agua a la entrada del intercambiador a 21 °C y la temperatura a la salida del intercambiador se midió en 45 °C, por otro lado el caudal de agua que pasaba por la serpentina de cobre se midió por los caudalímetros en 5 Lts/min.

$$\dot{q} = \dot{m} \times C_p \times (T_f - T_i)$$

$$\dot{q} = 5 \left[\frac{Kg}{min} \right] \times 4.1813 \left[\frac{J}{g * K} \right] \times (24^{\circ}K)$$

$$\dot{q} = 1000 \times 0.0833 \left[\frac{Kg}{s} \right] \times 4.1813 \left[\frac{J}{g * K} \right] \times (24^{\circ}K)$$

$$\dot{q} = 8.35 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

Este calor recuperado se puede clasificar de dos formas distintas por la naturaleza en la que vuelve a entrar al sistema. Por un lado hay un calor que ingresa al sistema de forma directa, agua pre-calentada inyectada en la cámara de combustión, y por el otro lado el restante calor que vuelve al sistema de forma indirecta mediante el calor que le brinda el agua pre-calentada remanente a la garrafa.

Gracias a la recolección de datos de los caudalímetros, se obtuvo (en promedio de las distintas pruebas) que el caudal de agua inyectada es de 1 Lt/min, por ende el caudal de agua que impacta al contenedor de combustible es de 4 Lts/min.

$$\dot{q}_{dir} = 1 \left[\frac{Kg}{min} \right] \times 4.1813 \left[\frac{J}{g * K} \right] \times (24^{\circ}K)$$

$$\dot{q}_{dir} = 1.67 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

$$\dot{q}_{ind} = \dot{q}_{Tot} - \dot{q}_{dir} = 6.68 \left[\frac{KJ}{s} \right]$$

En el caso particular del calor recuperado indirectamente, hay que tener en cuenta de que la eficiencia con la cual este calor vuelve a entrar al sistema no es del 100%, porque se tienen distintas pérdidas de eficiencia debido a la forma en la cual se transmite el calor.

7. Rediseño de inyector de combustible y evaluación del diseño de cámara de combustión

7.1. Rediseño inyector de combustible

Otra de las reformas que se le hizo a la máquina fue el inyector de combustible, ya que contaba con algunas desventajas de diseño. El inyector original estaba construido con un tubo de latón de 5 mm de diámetro exterior, el cual contaba con 5 agujeros de 1,5 mm que direccionaban al combustible de forma axial a la cámara de combustión y levemente apuntando hacia el centro, con la finalidad de que el gas entre decididamente en contacto con la chispa de la bujía. Esta disposición traía como consecuencia directa que no exista una buena mezcla entre aire y combustible ya que ambos se dirigen en el mismo sentido, teniendo como consecuencia una combustión incompleta. También afecta a la estabilidad de la llama, ya que con velocidades de aire tan elevadas, sin una ignición constante (bujía permanentemente encendida) la llama es arrastrada aguas abajo y se apaga.

Otro inconveniente grande era que la llama formada era excesivamente larga, tal es así que en las pruebas se podía apreciar que la llama llegaba hasta la turbina. Esto no es deseado ya que predispone a un calentamiento excesivo a los alabes de la turbina.

Con los objetivos de lograr una mejor mezcla entre aire-combustible, una buena estabilidad de llama que sea independiente de la bujía y que no sea una llama tan larga (Imagen 23), se diseñó un inyector con un tubo de cobre, el cual consta con 3 agujeros de 0,75 mm de diámetro y 4 agujeros de 1 mm de diámetro. Lo destacable de este diseño es que los agujeros del inyector no apuntan en dirección axial al tubo de llama, sino que lo hacen con un ángulo de 60 grados respecto al eje de la cámara de combustión. La idea de esta disposición era poder lograr una llama más corta, una mejor mezcla de aire-combustible y una mejor estabilidad de llama. Otra característica del diseño es que los agujeros no son radiales al

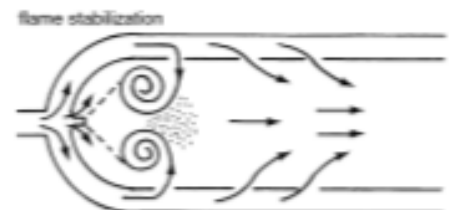


Imagen 23: Esquema cámara de combustión

anillo del inyector, son más bien tangenciales. La razón de esto es que al no poder contar con un torbellinador para el combustible debido a razones de espacio dentro de la cámara, se intenta mediante la dirección de inyección de gas lograr al menos un pequeño efecto de torbellino el cual ayude a mejorar la mezcla aire-combustible (Imagen 24).



Imagen 24: Inyector de combustible

Para comprobar el funcionamiento del inyector se hicieron pruebas de utilizando únicamente la cámara de combustión y mediante un ventilador se simulaba el aire comprimido (Imagen 25). Las pruebas resultaron exitosas en el sentido de que se logró una llama estable que no era dependiente de la ignición constante de la bujía, por lo que se puede intuir que el frente de llama no era largo e inestable. También se verificó a máximo caudal de gas y de aire (otorgado por el ventilador) que las llamas no sobresalían de la cámara de combustión y se

destaca el sencillo encendido de la llama.



**SALIDA CAMARA
DE COMBUSTION**

Imagen 25: Prueba de llama

Con el objetivo de que el operador de la máquina tenga algún dato de referencia que le indique si hay combustible siendo inyectado de forma constante y que el circuito del mismo no está perdiendo presión (por ende caudal), se instaló un manómetro a la entrada del inyector de combustible, pudiendo leer así la presión de inyección (Imagen 26). Este es un simple manómetro analógico con un rango entre 0 – 6 bar, el cual es más que suficiente ya que la garrafa contenedora de combustible tiene una presión de 3 bar, por lo que el rango también podría funcionar por si en un futuro se decide utilizar una garrafa de mayor presión.

En las pruebas de funcionamiento la presión de inyección estaba dentro de un rango de 0.7 – 1.3 bar.



Imagen 26: Manómetro presión de inyección de combustible

7.2. Evaluación de rediseño cámara de combustión

Respecto al rediseño de la cámara de combustión se debe hacer un análisis de CFD completo de la cámara. La necesidad de analizar posibles cambios en la misma se origina por el nuevo diseño del inyector de combustible, el cual tiene una nueva distribución del combustible dentro de la cámara. Una idea que se considera útil para no exponer al tubo de llama a tan grandes temperaturas, ya que el inyector de gas esta direccionado casi radialmente al tubo de llama y, si bien este efecto es contrarrestado por el gran flujo de aire que se mueve en dirección axial al mismo, se podrían realizar pequeños agujeros sobre el cono superior del tubo de llama logrando que se genere una capa de aire frio sobre la superficie interna de mismo.

El desarrollo del rediseño de la cámara se deja para futuros proyectos donde se pueda hacer el análisis correcto de CFD, para verificar que existe una ventaja significativa antes de realizar un mecanizado irreversible. Dado el caso que se apruebe dicha modificación, se puede aprovechar para utilizar dichos agujeros como direccionadores del flujo de aire secundario de tal forma que genere un torbellino al entrar dentro de la cámara, mejorando la combustión y facilidad de encendido de la misma. Un ejemplo se muestra en la Imagen 27.

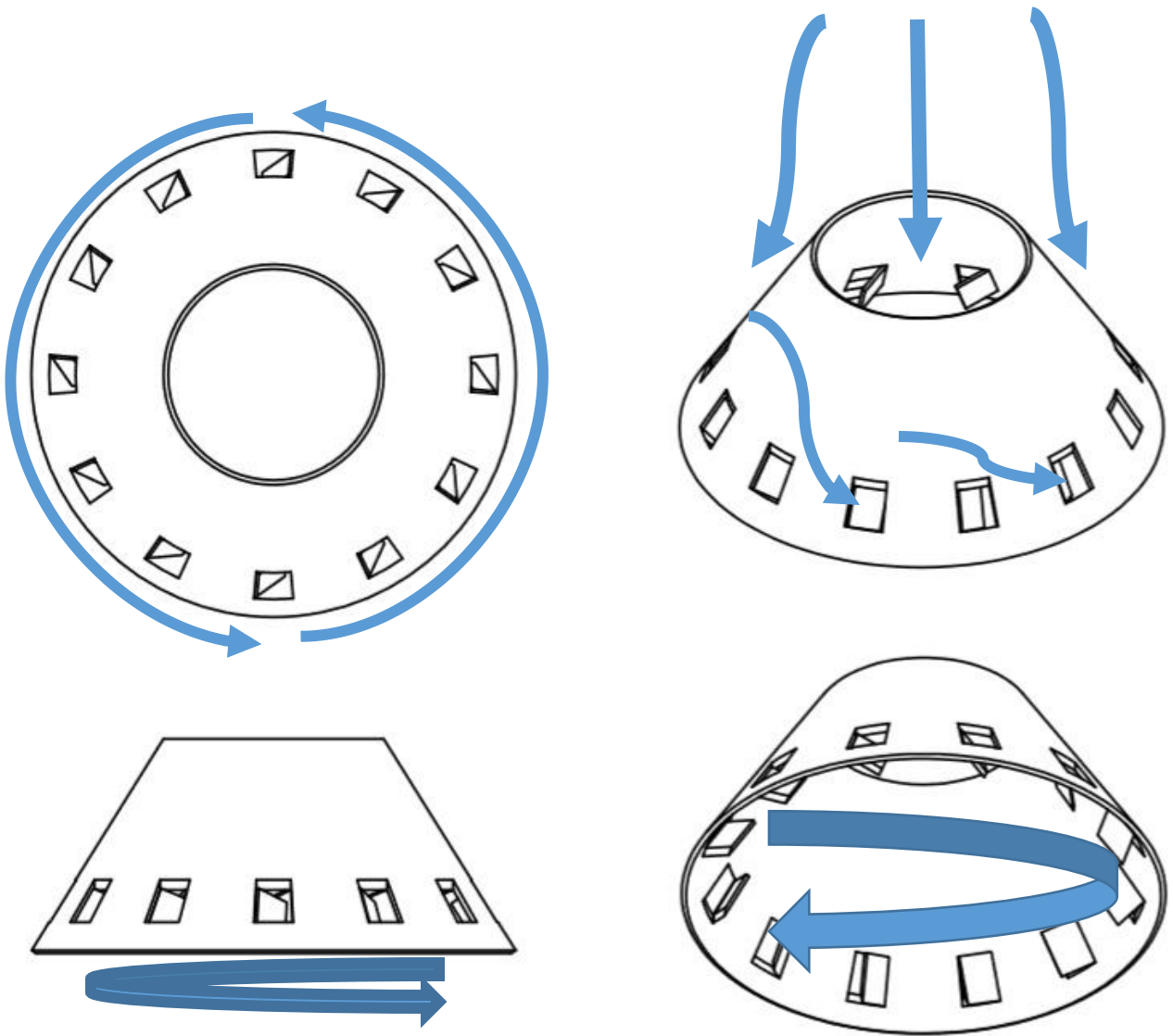


Imagen 27: Ejemplo torbellinador a partir de modificación en tapa de tubo de llama

Otra posibilidad con la que pueden contar quienes continúen con el presente proyecto, es la de realizar un accesorio para el tubo de llama, evitando mecanizar el actual y como ventaja relevante de esta idea es que se podrían probar con distintos modelos de accesorios a partir de estudios de CFD y escoger el que mejores prestaciones de a la máquina. A continuación se muestra un modelo aproximado de cómo podría ser dicho accesorio (Imagen 28) y donde debería estar ubicado. Cabe destacar que en la imagen no se visualizan soportes de ningún tipo debido a que deben ser bien diseñados para evitar que alguna pieza mecánica se desprenda e impacte con la turbina ocasionando severos daños.

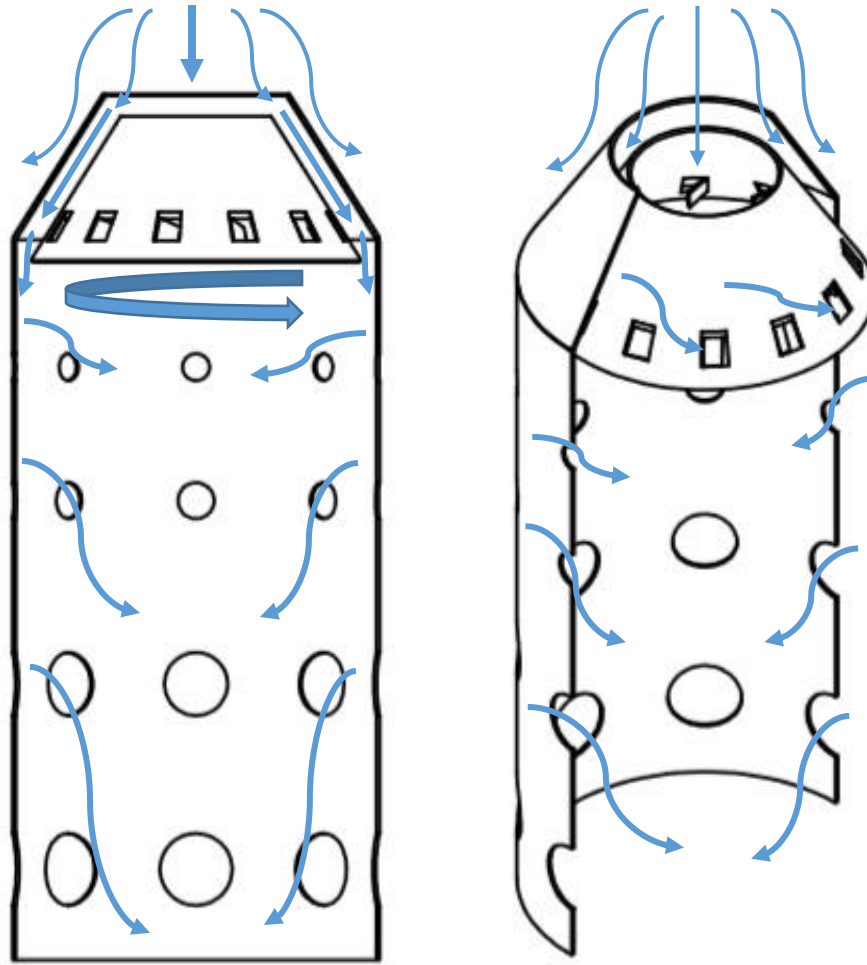


Imagen 28: Ejemplo accesorio para tubo de llama en cámara de combustión

8. Diseño de la tobera de empuje

Con el fin de aprovechar la energía de los gases de escape de la turbina, se diseñó una tobera de empuje para el sistema de escape. Desde un punto de vista funcional a la máquina, utilizar una tobera tiene como ventaja que produce una contrapresión que aumenta la presión de la cámara de combustión, lo cual favorece el encendido de la llama y estabilización de la misma. Por otro lado la tobera limita la expansión de la turbina por lo tanto entrega menos trabajo.



Imagen 29: Tobera en fase de construcción

Con estos factores como referencia y buscando un equilibrio entre ambos, se desarrolló una tobera con una reducción de sección del 30%, con lo que se tendrá un aumento de presión en el sistema y la disminución de expansión no será crítica.

La misma se construyó con un tubo (estructural) de acero de 4" de diámetro externo y 98 mm de diámetro interno. A la salida el diámetro interior es de 68,8 mm, con lo que se obtiene la reducción de sección estimada. A la misma se le soldó una brida diseñada para poder tener un fácil ensamblado en el sistema de escape.



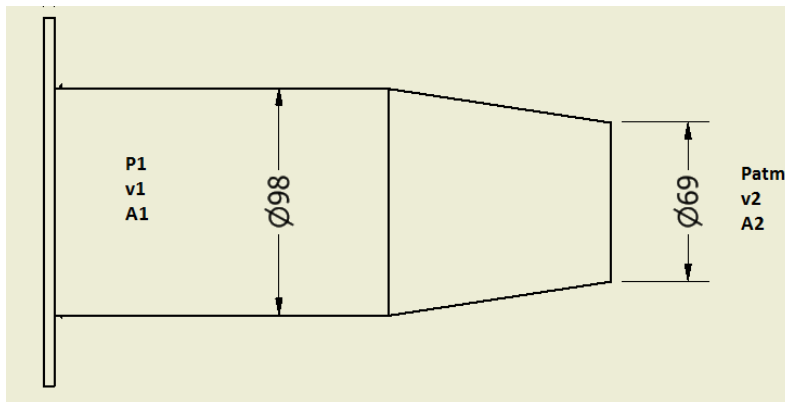
Imagen 30: Tobera terminada

8.1. Cálculo de diseño:

Se realiza un cálculo aproximado de la caída de presión los gases de escape a través de la tobera, con el fin de conocer si la misma reduce de forma sensible o no, la expansión de los gases en la turbina y el empuje que produce.

Se considera que la temperatura de salida de los gases es aproximadamente de 500 °C y un caudal de aire de 0.9 [m³/s], y en este cálculo no se considera el caudal de vapor y combustible.

- $Q = 0.9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ (valor medio dentro de las curvas del compresor)
- $\rho = 0.4565 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (Densidad del aire a 500 °C)
- $m = Q * \rho = 0.41 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$ (Caudal másico)



- $A1 = \pi * \frac{d^2}{4} = 7542,9 \text{ mm}^2$
- $v1 = \frac{Q}{A1} = 119 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $A2 = 70\% A1 = 5280 \text{ mm}^2$
- $v2 = 170 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $Patm \cong 1 \text{ bar}$

Por la ecuación de los fluidos de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho * g} + \frac{v_1^2}{2} + h_1 = \frac{P_{atm}}{\rho * g} + \frac{v_2^2}{2} + h_2$$

$$P_1 = P_2 + \rho * \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

$$P_1 = 3364 \text{ Pa}$$

Tomando como volumen de control la sección en la figura anterior se estima que la fuerza de empuje entregada por la tobera es:

$$F_e = P_1 * A_1 - m * (v_2 - v_1)$$

$$F_e = 4,5 \text{ N}$$

De la siguiente forma se verifica el régimen subsónico de los gases de escape en la tobera:

$$C_{son} = \sqrt{kRT}$$

$$C_{son} = \sqrt{(1.4) * \left(287 \left[\frac{J}{Kkg}\right]\right) * (273 + 450)}$$

$$C_{son} = 539 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$M = \frac{170}{539} = 0.315$$

9. Esquemas de la máquina

En la imagen 31 se muestra un esquema de la máquina luego de haber realizado los cambios descritos en el presente informe. También se detallan los puntos donde se censaron los diversos valores de temperatura, presión y caudales.

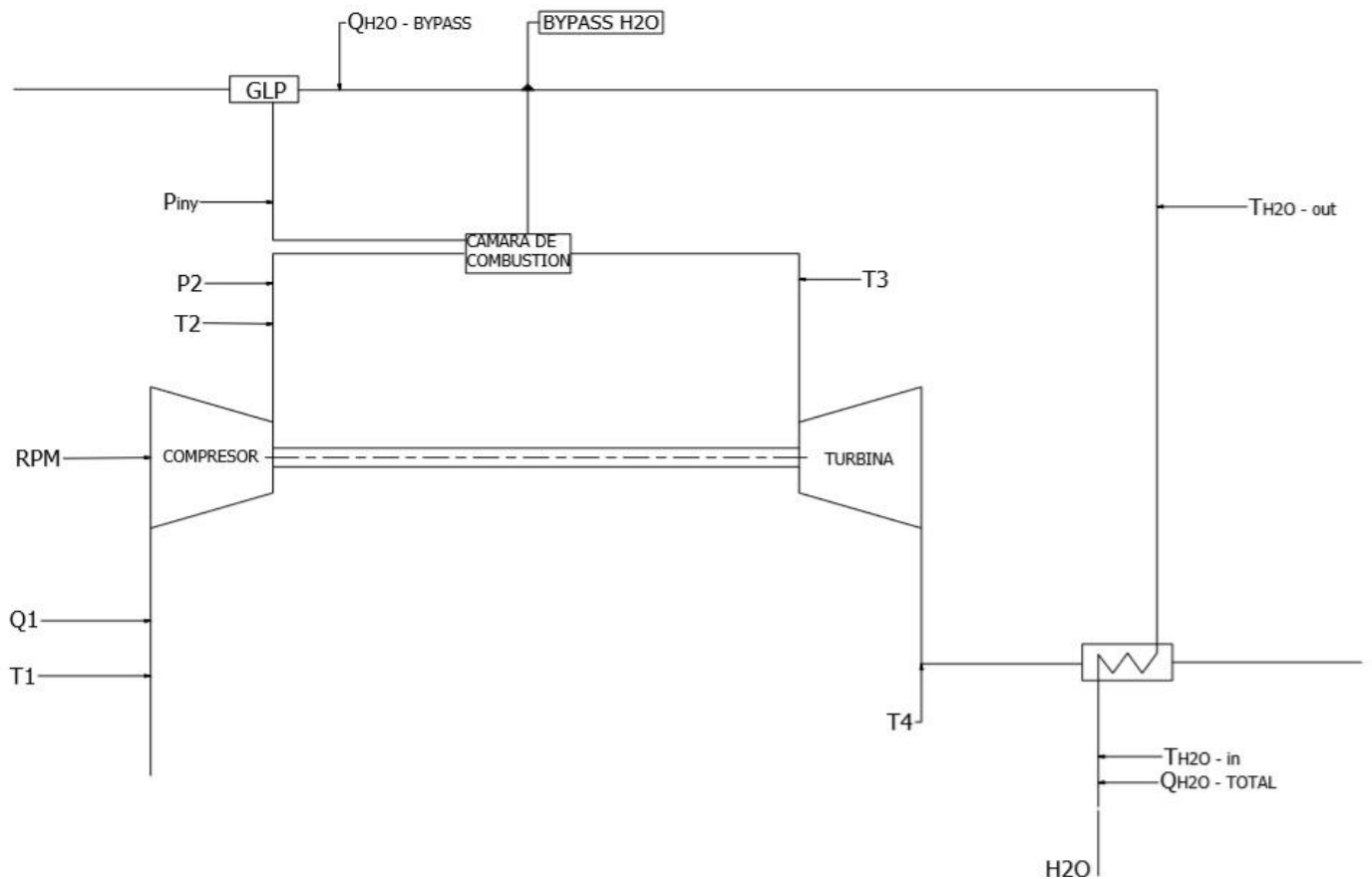


Imagen 31: Esquema turbina

En la imagen 32 se detalla un esquema del circuito del combustible:

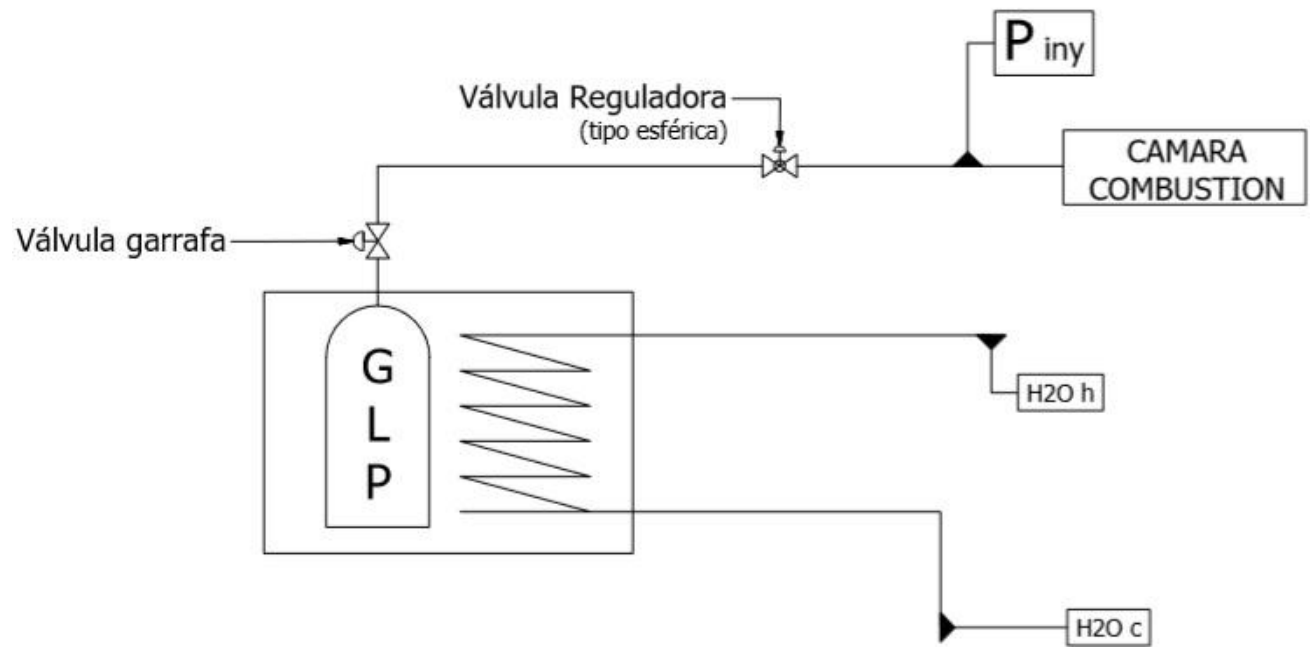


Imagen 32: Circuito combustible

10. Accesorios

A lo largo del desarrollo del proyecto y teniendo en cuenta de que la maquina tiene como objetivo un fin didáctico se realizaron y adicionaron diversos accesorios.

Entre ellos está la instalación de 6 ruedas giratorias de goma gris con un diámetro de 75 mm, levantando en total a la maquina unos 100mm. De las 6 ruedas, hay 3 que tienen freno para evitar cualquier posible deslizamiento de la máquina mientras esté en funcionamiento. Cada rueda puede soportar 40 kg, por lo que en realidad con 4 ruedas habría sido más que suficiente pero luego de realizar diversas maniobras para mover la máquina (pasar escalones dentro del taller, por ejemplo) se decidió agregarle dos más en un punto medio.

Otra mejora fue la pintura de la estructura donde se está ubicada la maquina con una pintura convertidor de óxido y con capa protectora al oxido. Más allá de que tenía un fin estético, también sirvió para evitar la oxidación de la estructura.



Imagen 33: Estructura pintada y ruedas instaladas

Luego de haber analizado la viabilidad de construir el intercambiador de calor con los gases de escapes y la tobera, se tuvo que fabricar un escape que se conecte al turbocompresor. Este debía contar con una brida en uno de sus extremos donde se conecte el intercambiador, una conexión para el ingreso de la termocupla que censa la temperatura de gases de escape y del otro extremo una pestaña para que la abrazadera que se utiliza en este tipo de turbocompresores pueda sostenerlo. Se realizó con un caño de 4" de acero gris de 2 mm de espesor. Por la dificultad de manufacturar la pestaña se envió a un taller especializado en escapes de autos, quienes nos lo devolvieron como se observa en la imagen 34:



Imagen 34: Primera etapa construcción escape

Luego se continuó con la colocación de la termocupla de gases de escape, para ello se realizó un agujero radial al tubo de escape de 20 mm y se soldó allí un caño de 16 mm de diámetro interno (suficiente para introducir la vaina de la termocupla, Imagen 35). Al extremo de ese caño se colocó una cupla de rosca hembra de $\frac{3}{4}$ " para evitar posibles fugas de gases y una buena fijación de la termocupla (Imagen 36). Luego se procedió a soldar la brida (la cual previamente fue frentada para lograr coaxialidad entre ambas piezas).



Imagen 35: Escape con brida y caño termocupla



Imagen 37: Escape terminado y pintado

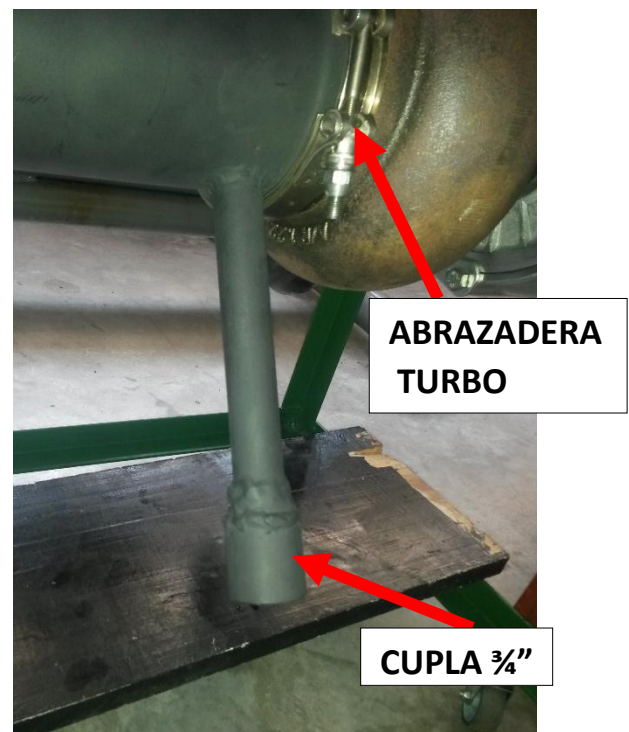


Imagen 36: Cupla 3/4"

Al igual que los otros componentes mecánicos del sistema de escape, se pintó con una pintura para elevadas temperaturas (“Rust Oleum High Heat” hasta 1090 °C), con el fin de darle una protección contra la corrosión.

Otro accesorio diseñado fue un soporte para el caudalímetro de aire a la entrada del compresor (MAF). Este tipo de sensores generalmente están pensados para conectarse entre mangueras de un diámetro determinado y con sujeciones adecuadas, este no era el caso actual de nuestro proyecto, por lo que se diseñaron piezas de plástico, las cuales se fabricaron mediante impresión 3D, para poder sujetarlo a la manguera de entrada del compresor (Imagen 38).

El diámetro exterior de la superficie cilíndrica que generan ambas piezas es de 100mm, coincidente con el diámetro interior de la manguera de entrada al compresor.



Imagen 38: Adaptador MAF

Para el sistema de escape, al contar con varias etapas (escape primario, intercambiador y tobera), se diseñaron bridas de acero negro con el fin de ensamblar las etapas. Las bridas se realizaron a partir de una chapa de acero de 6,35 mm (1/4”), cuentan con un diámetro interior característico de 98 mm (respetando la sección de pasaje de gases en el sistema de escape) y con un diámetro exterior de 165 mm. Si bien en el sistema de escape cuenta con tubos de distintas dimensiones (caso intercambiador), se buscó diseñar dichas bridas para que sea útiles para ambas dimensiones, por ello es que los agujeros para los bulones están en una circunferencia de 145mm. Las bridas debieron ser mecanizadas para lograr tener coaxialidad entre la brida y el tubo al momento de la soldadura. Se les realizó un frentado en el torno con los diámetros adecuados según para qué tubo serían utilizadas.



Imagen 39: Brida (sin mecanizar)

La ventaja principal del sistema de conexión por bridas, en lugar de construirlo en una única pieza, es la posibilidad de poder realizar modificaciones sin tener que construir todos los módulos nuevamente. Por ejemplo fácilmente se puede sacar el intercambiador de calor y dejar la tobera o viceversa. Si se quiere cambiar por ejemplo la tobera, se puede hacerlo fácilmente sin tener que cambiar el intercambiador de calor.

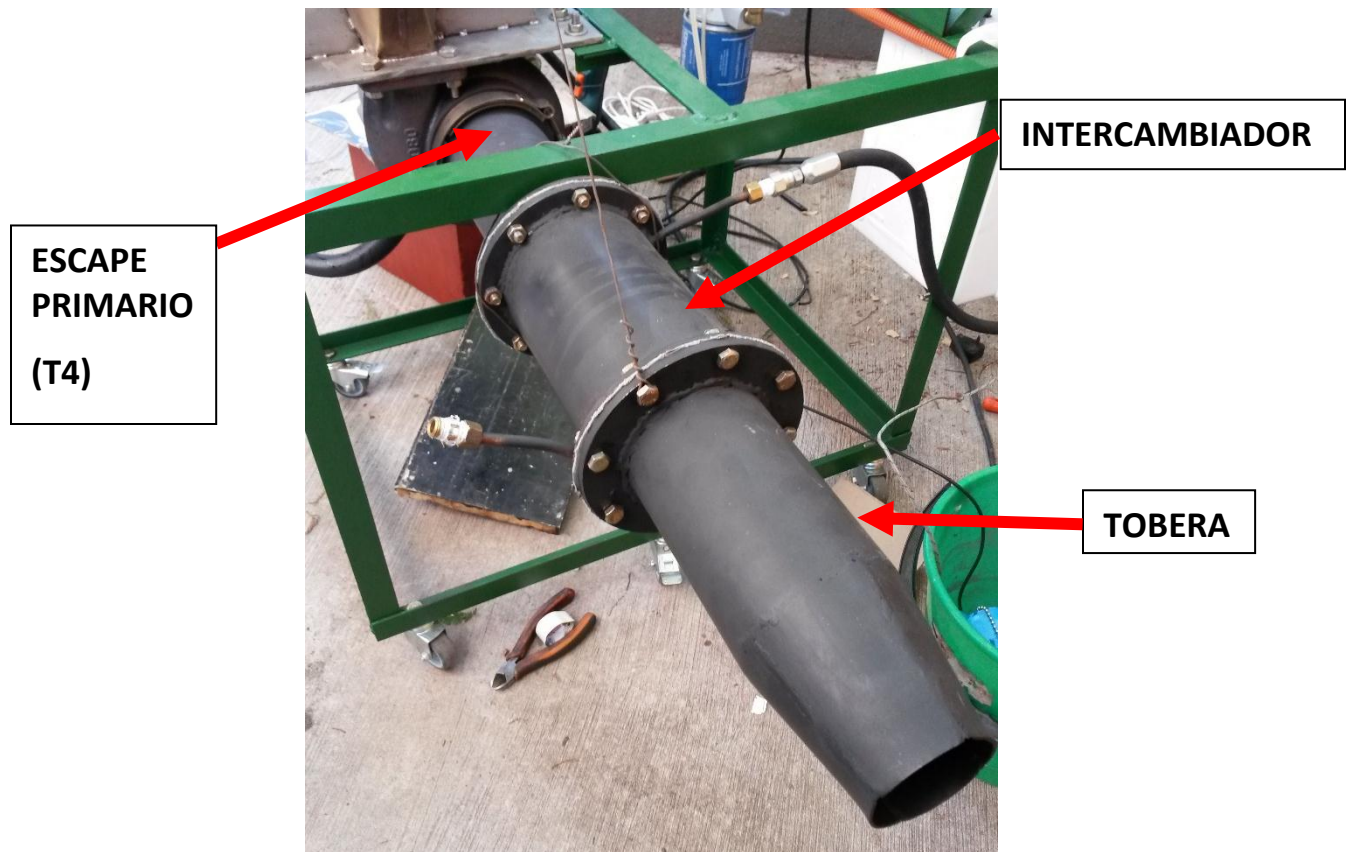


Imagen 40: Sistema de escape (Modular)

11. Puesta en marcha

En la práctica, se tuvieron que realizar diversas pruebas para corregir errores de diseño (caso inyector), poner a punto sensores, interpretar el funcionamiento de la máquina mediante una inspección ocular (verificamos existencia de pérdidas, estado del aceite durante el funcionamiento, etc.) y lograr obtener distintos valores para así graficar los puntos del ciclo Brayton de la máquina.

En las primeras pruebas se priorizó lograr un funcionamiento estable de la máquina y en las pruebas finales (ya con la máquina funcionando de manera estable) poner a punto los sensores de medición.

En la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos en las distintas pruebas:

Tabla 3

	PRUEBA N°1	PRUEBA N°2	PRUEBA N°3	PRUEBA N°4	PRUEBA N°5	PRUEBA N°6
T1 (°C)	28	28	28	25	25	18
T2 (°C)	40	42	53	60	61	44
T3 (°C)	670	745	830	690	710	745
T4 (°C)	490	355	480	470	-	409
Th20 in (°C)	23	20	20	21	21	20
Th20 out (°C)	48	44	46	45	44	42
RPM	>20000	>20000	>20000	>20000	>20000	35000
Qh2o total (Lts/min)	5	5	5	5	5	5
Qh2o – iny. (Lts/min)	1	1	1	1	1	1
P1 (bar)	1	1	1	1	1	1
P2 (bar)	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.35
Piny - Comb. (bar-man)	-	-	-	1.1	1	0.9
Q1 (aire entrada comp)	-	-	-	-	-	350 Kg/hr (3.11 Volts)

De la tabla se puede observar que durante las primeras pruebas había una limitación en la puesta a punto del sensor de RPM, el cual tenía una limitación de lectura de hasta 20000 rpm. También se destaca el faltante de las mediciones de presión de inyección de combustible debido a que el manómetro fue instalado posteriormente a dichas pruebas.

Con los resultados obtenidos de la prueba más completa, se evaluó el rendimiento de la turbina simplificado al considerar los gases como ideales con calor específico a presión constante e igual al del aire:

$$\Delta h_{real} = C_p \times (T_3 - T_4) = 1,004 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \times (1018 \text{ } ^\circ K - 682 \text{ } ^\circ K) = 337,3 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\Delta h_{ideal} = C_p \times (T_3 - T_{4s})$$

$$T_{4s} = T_3 \times \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{-\frac{k-1}{k}} = 1018 \text{ } ^\circ K \times \left(\frac{1,35}{1} \right)^{-\frac{1,4-1}{1,4}} = 934,3 \text{ } ^\circ K$$

$$\Delta h_{ideal} = C_p \times (T_3 - T_{4s}) = 84,3 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\eta_{turb} = \frac{\Delta h_{real}}{\Delta h_{ideal}} = \frac{337,3}{84,3} = INCOHERENTE!$$

Con estos primeros cálculos se encontró un error en las mediciones obtenidas, ya que arroja un valor de eficiencia superior a 1 en la turbina. Debido a la discrepancia se procedió a verificar el funcionamiento de las termocupas de cámara de combustión y de salida de turbina. Luego de realizar diversas pruebas, se encontró que la termocupa que censa la temperatura de los gases que entran a la turbina arroja valores superiores a los reales y que estos no evolucionan de forma lineal, mientras que la termocupa que censa la temperatura de los gases de escape medía de forma correcta.

Si bien el error de lectura de la termocupa se debe a una falla técnica de la misma, los valores tan elevados medidos en la cámara de combustión pueden haber sido influenciados por el contacto directo de la llama y la vaina de la termocupa (debido a su posición dentro de la cámara). Se aconseja en una futura continuación del proyecto, evaluar la posibilidad de colocar

la termocupla en una posición más cercana a la entrada de la turbina (aquí la medición será más fiable ya que los gases de combustión y el vapor del agua inyectada serán una mezcla más homogénea), y de esta forma evitar la exposición de la termocupla a las llamas de la combustión.

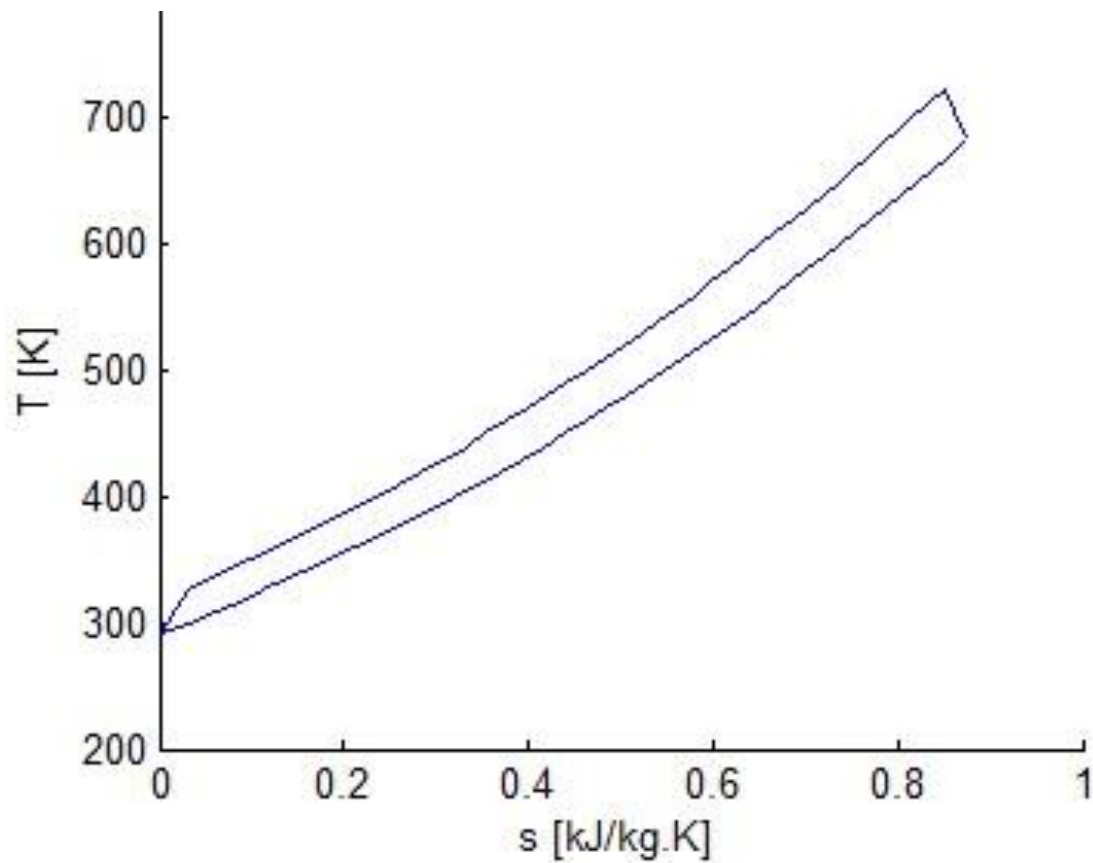


Imagen 41

12. Conclusiones

A partir de los ensayos realizados con la máquina se destaca la estabilidad de la máquina en funcionamiento, la cual fue alcanzada por lograr mantener la fuente de combustible a una presión constante, y el rediseño del inyector que permitió una combustión más estable y homogénea dentro de la cámara.

A lo largo de las pruebas se puede subrayar también el poder enfriador del agua inyectada, ya que en todas las pruebas se apreciaba la disminución de la temperatura en la cámara de combustión (a caudal de combustible constante), tampoco hay indicios de inundación de la misma (la combustión es constante y no se registran rastros de agua líquida a la salida de la turbina).

Por el lado de los sensores que posee la máquina se destaca la coherencia como por ejemplo, que la temperatura de los gases de escape es proporcional a la presión de inyección de combustible, la presión dentro de la cámara de combustión proporcional a las temperaturas registradas en los gases de combustión, la temperatura del agua precalentada proporcional a la temperatura de gases de escape.

14. Anexo A: Caudalímetros

Especificaciones de los caudalímetros. El error de 5% de en la frecuencia es el porqué de los ensayos para averiguar la constante del caudalímetro.

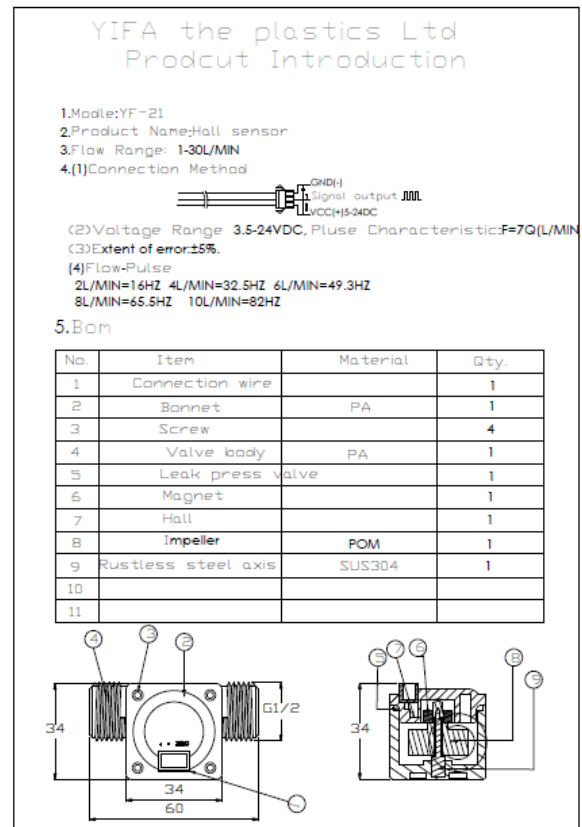
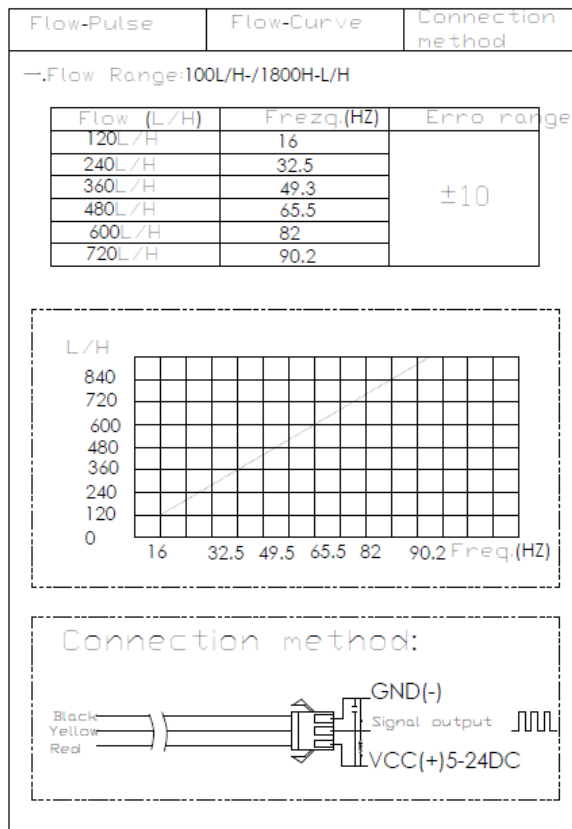


Imagen 42: Datasheet caudalímetro

15. Anexo B: Programa Final

```
//PROGRAMA Y PINES EJECUTADOS EN ARDUINO MEGA 256

//PINS DE LCD 7,8,9,10,11,12

//PIN DE CAUDALIMETRO 20 y 21. Caudalimetro Marcado 2 va al
PIN 20. Caudalimetro Marcado 1 va al PIN 21.

//PIN DE RPM 2 y A0

//PIN DE TEMPERATURA 13. OJO Q ESTE ESTA HARDCODEADO NO
TIENE UN DEFINE!

//PIN DE MAF A4


#include "LiquidCrystal.h"

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#define rpmPin 2

#define caudalimetroPinA 21;

#define caudalimetroPinB 20;


//Inicio El display

LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);


// Constantes de Uso en el ciclo Loop

long int cCounter = 0;


//Seteo las variables de conteo de interrupciones

unsigned int flancos0 = 0;

unsigned int flancos1 = 0;

unsigned int flancos2 = 0;


//Seteo verificacion de 1 ciclo completo

boolean fullCycle = false;


//Inicializo contadores de tiempo para funciones de RPM y
Caudalimetros

int timerMillis = 0;
```

```
int timerMillisAux = 0;


// Constantes de Calculo y Funcion del CaudalimetroA

float constante1 = 6.63;

unsigned long c1;

float caudalA = 0;


// Constantes de Calculo del CaudalimetroB

float constante2 = 8.82;

unsigned long c2;

float caudalB = 0;


// Constantes de Calculo de RPM

int pinReceptor = A0;

int sensorVal;

int inPin = 2;

int val = 0;

unsigned int rpm = 0;

unsigned long t_old;

int pinLectura = 0;


// Constantes de Calculo y Funcion del MAF

//int pinMAF = A4;

int valorMAF = 0;

int constanteAD = 1023/5;

float valorConvertido = 0;


// Constantes de Calculo de la Temperatura del Agua

float currentTemp0;

float displayTemp = 0;


OneWire oneWire(13);

DallasTemperature sensors(&oneWire);


void setup() {

    Serial.begin(9600);
```

```

Serial.print("Inicio de Programa Final");

lcd.begin(20, 4);

fullCycle = false;

// Fijo valores base para constantes de RPM y CAUDALIMETROS
rpm = 0;
c1 = 0;
c2 = 0;

pinMode(2, INPUT); // Pin 2 is input to which a switch is
connected = INTO

pinMode(20, INPUT); // Pin 2 is input to which a
switch is connected = INTO

pinMode(21, INPUT); // Pin 3 is input to which a
switch is connected = INT

attachInterrupt(2, CaudalimetroA_COUNT, RISING);
attachInterrupt(3, CaudalimetroB_COUNT, RISING);

sensors.begin();
}

void loop() {
  lcd.setCursor(0, 0);
  cCounter++;

  if ((cCounter%5) == 1)
  {
    attachInterrupt(0, RPM_COUNT, RISING);
    useRPM();
    detachInterrupt(0);
  }
  else if ((cCounter%5) == 2)
  {
    useCaudalimetroB();
  }

  else if ((cCounter%5) == 3)
  {
    useCaudalimetroA();
  }
  else if ((cCounter%5) == 4)
  {
    useMAF();
  }
  else if ((cCounter%5) == 0)
  {
    useTemperature();
    fullCycle = true;
  }

  screenPrint();
}

// Constantes de Calculo y Funcion del CaudalimetroA
//float constante1 = 6.63;
//unsigned long c1;
//float caudalA = 0;
unsigned long a1;

void useCaudalimetroA(void){
  timerMillisAux = millis();

  timerMillis = (millis()-timerMillisAux);

  flancos1 = 0;

  t_old = millis();

  while(timerMillis<500)
  {if (flancos1 >= 15) { //ver si se puede sacar por el delay
    a1 = 1000*flancos1/(millis() - t_old);
    c1 = a1/constante1;
  }
}

```



```

    t_old = millis();

    flancos1 = 0;
}

timerMillis = (millis()-timerMillisAux);
}

caudalA = c1;
}

// Constantes de Calculo y Funcion del CaudalimetroB
//float constante2 = 8.82;
//unsigned long c2;
//float caudalB = 0;
unsigned long a2;

void useCaudalimetroB(void){
    timerMillisAux = millis();

    timerMillis = (millis()-timerMillisAux);

    flancos2 = 0;

    t_old = millis();

    while(timerMillis<500)
    {if (flancos2 >= 15) { //ver si se puede sacar por el delay
        a2 = 1000*flancos2/(millis() - t_old);
        c2 = a2/constante2;
        t_old = millis();
        flancos2 = 0;
    }

    timerMillis = (millis()-timerMillisAux);
}

caudalB = c2;
}

// Constantes de Calculo y Funcion de RPM
//int val = 0;
//unsigned int rpm = 0;
//unsigned long t_old;
//int pinLectura = 0;

void useRPM(void) {
    unsigned long rpmAUX;

    timerMillisAux = millis();

    timerMillis = (millis()-timerMillisAux);

    flancos0 = 0;

    t_old = micros();

    while(timerMillis<2000){
        if (flancos0 >= 10) //ver si se puede sacar por el delay
        {
            rpmAUX = 30000000/(micros() - t_old);
            rpm = rpmAUX*flancos0;
            t_old = micros();
            flancos0 = 0;
        }

        timerMillis = (millis()-timerMillisAux);
    }
}

// Constantes de Calculo y Funcion para el LCD
float caudalAgua = 0;
float caudalAire = 0;
float caudalAguaTot = 0;

```

```

void screenPrint() {

    caudalAgua = caudalA-caudalB;

    caudalAguaTot = c1;


    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("T:");lcd.print(caudalAguaTot);lcd.print(";
D:");lcd.print(caudalAgua);lcd.print(" L/MIN");


    lcd.setCursor(0,1);

    //lcd.print(caudalAire);lcd.print("Kg/Hr ");

    lcd.print(valorConvertido);lcd.print("Volts ");


    lcd.setCursor(0,2);

    lcd.print(rpm);lcd.print("RPM");


    lcd.setCursor(0,3);

    lcd.print(displayTemp);lcd.print(" Celsius");

}

```

```

void useTemperature(){

    sensors.requestTemperatures();

    currentTemp0 = sensors.getTempCByIndex(0);

    if (currentTemp0 >= (-50))

    {

        displayTemp = currentTemp0;

    }

}

```

```

// Constantes de Calculo y Funcion del MAF

//int pinMAF = A4;

//int valorMAF = 0;

//int constanteAD = 1023/5;

//float valorConvertido = 0;

```

```

void useMAF(void){

    valorMAF = analogRead(A4);

```

```

    valorConvertido = valorMAF * (5.0 / 1023.0);

}

```

```

void RPM_COUNT()

```

```

{

    flancos0++;

}

```

```

void CaudalimetroA_COUNT()

```

```

{

    flancos1++;

}

```

```

void CaudalimetroB_COUNT()

```

```

{

    flancos2++;

}

```

16. Anexo C: Programa RPM

```

int pinReceptor = A0; //Guardamos en esta variable el pin
Analógico

```

```

int sensorVal;

```

```

int inPin = 2;

```

```

int val = 0;

```

```

volatile byte flancos;

```

```

unsigned int rpm;

```

```

unsigned long t_old;

```

```

void setup(){

```

```

    Serial.begin(9600); // Abrir comunicación por Serial

```

```

    attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING);

```

```

    flancos = 0;

```

```

    rpm = 0;

```

```

    t_old = 0;

```

```

}

```

```

void loop(){

```

```

    if (flancos >= 20) { //ver si se puede sacar por el delay

```

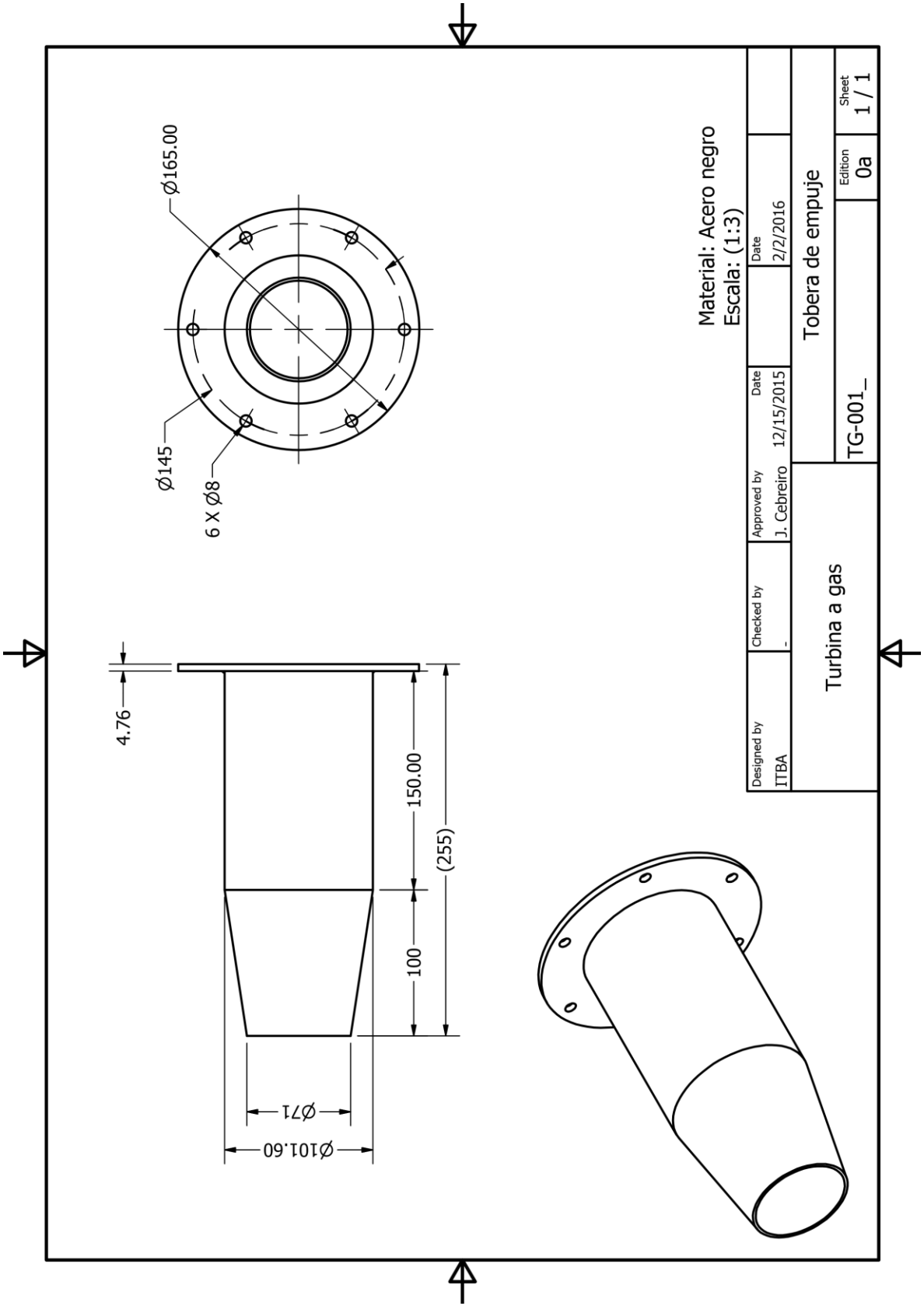
```
rpm = 30*1000/(millis() - t_old)*flancos;
t_old = millis();
flancos = 0;
}

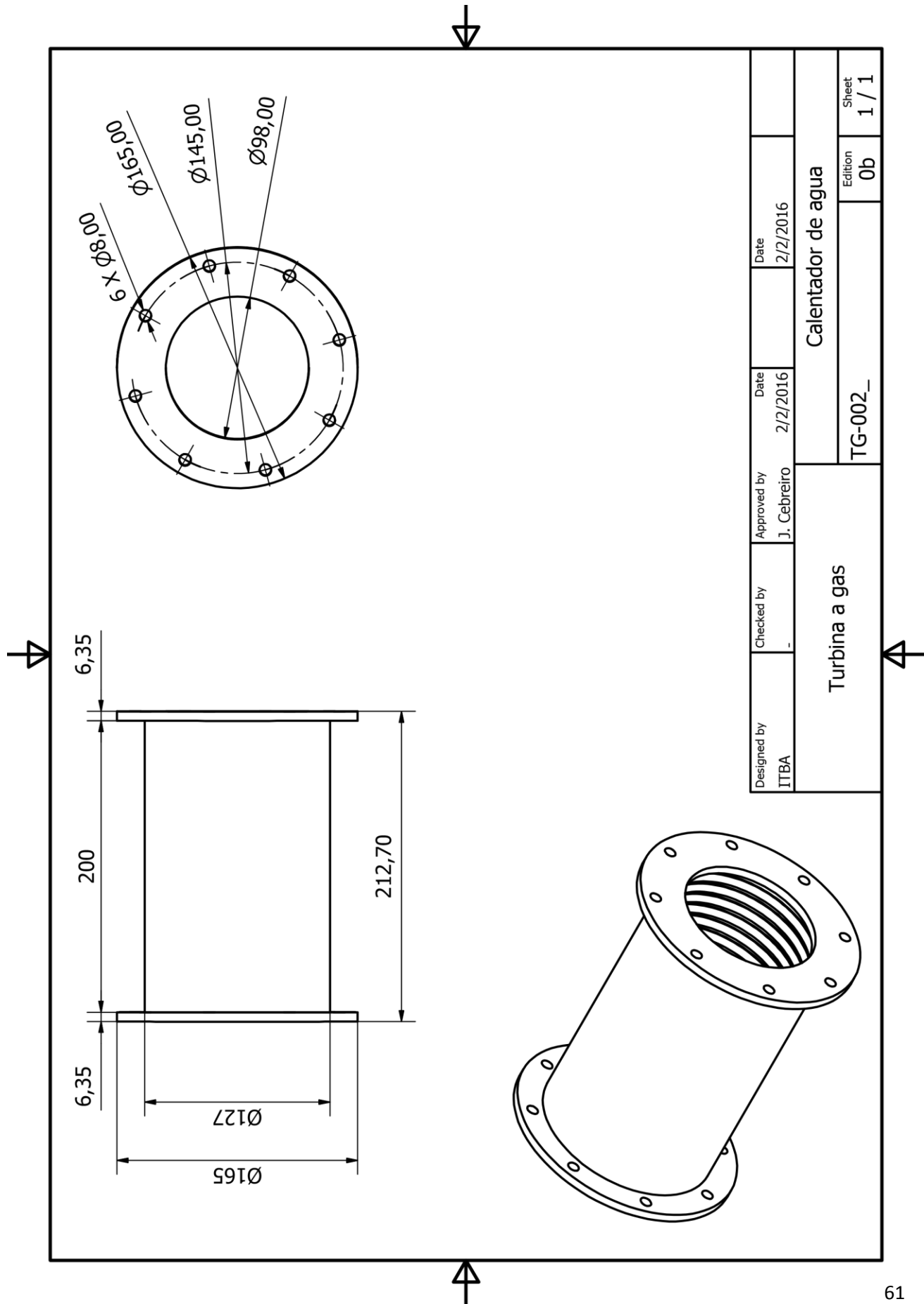
sensorVal = analogRead(pinReceptor);
val = digitalRead(inPin);
Serial.println(sensorVal); // Leer el valor del Pin y escribirlo
Serial.println(val);
Serial.println(rpm);

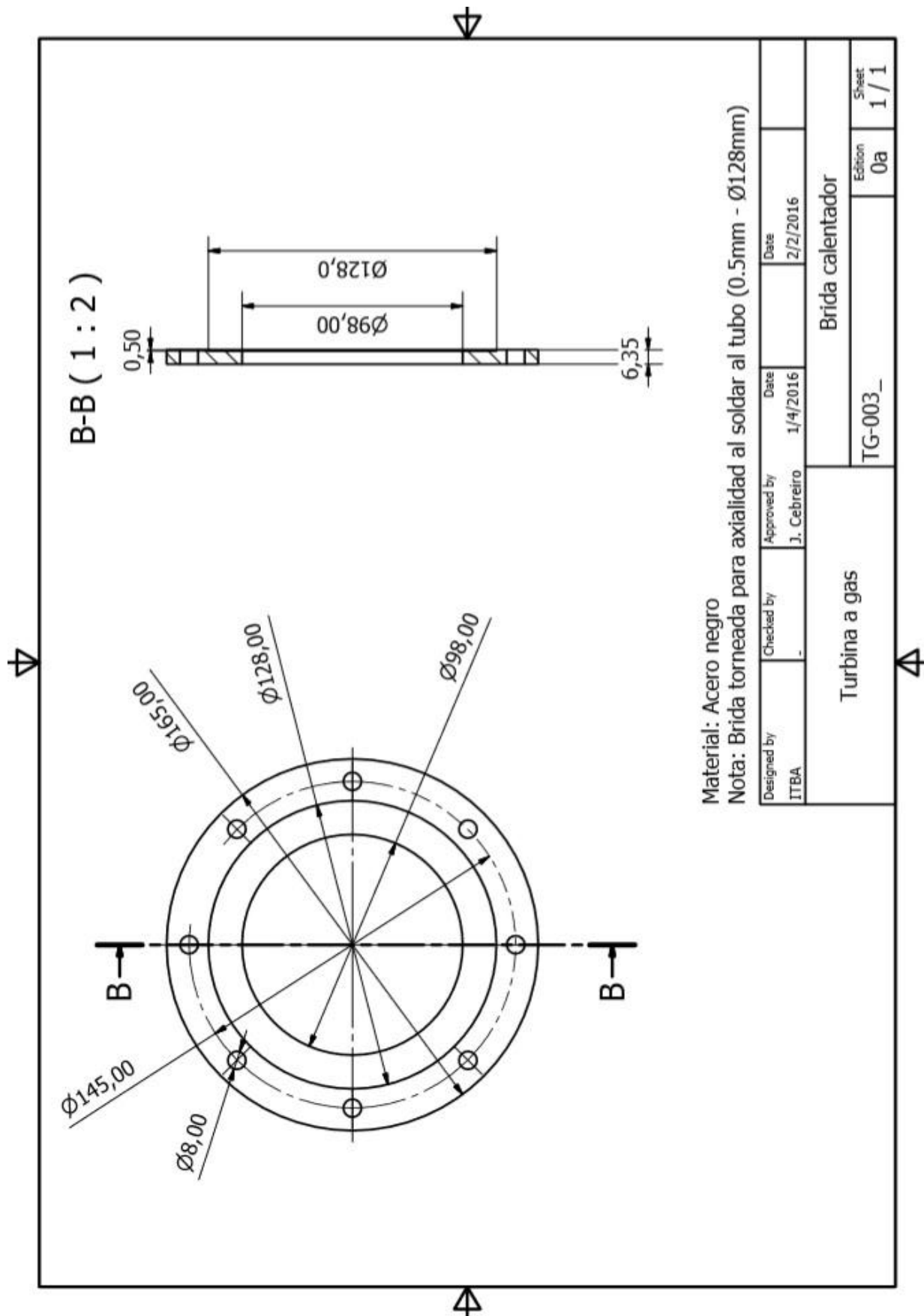
//Serial.println(millis());
delay(300);
}

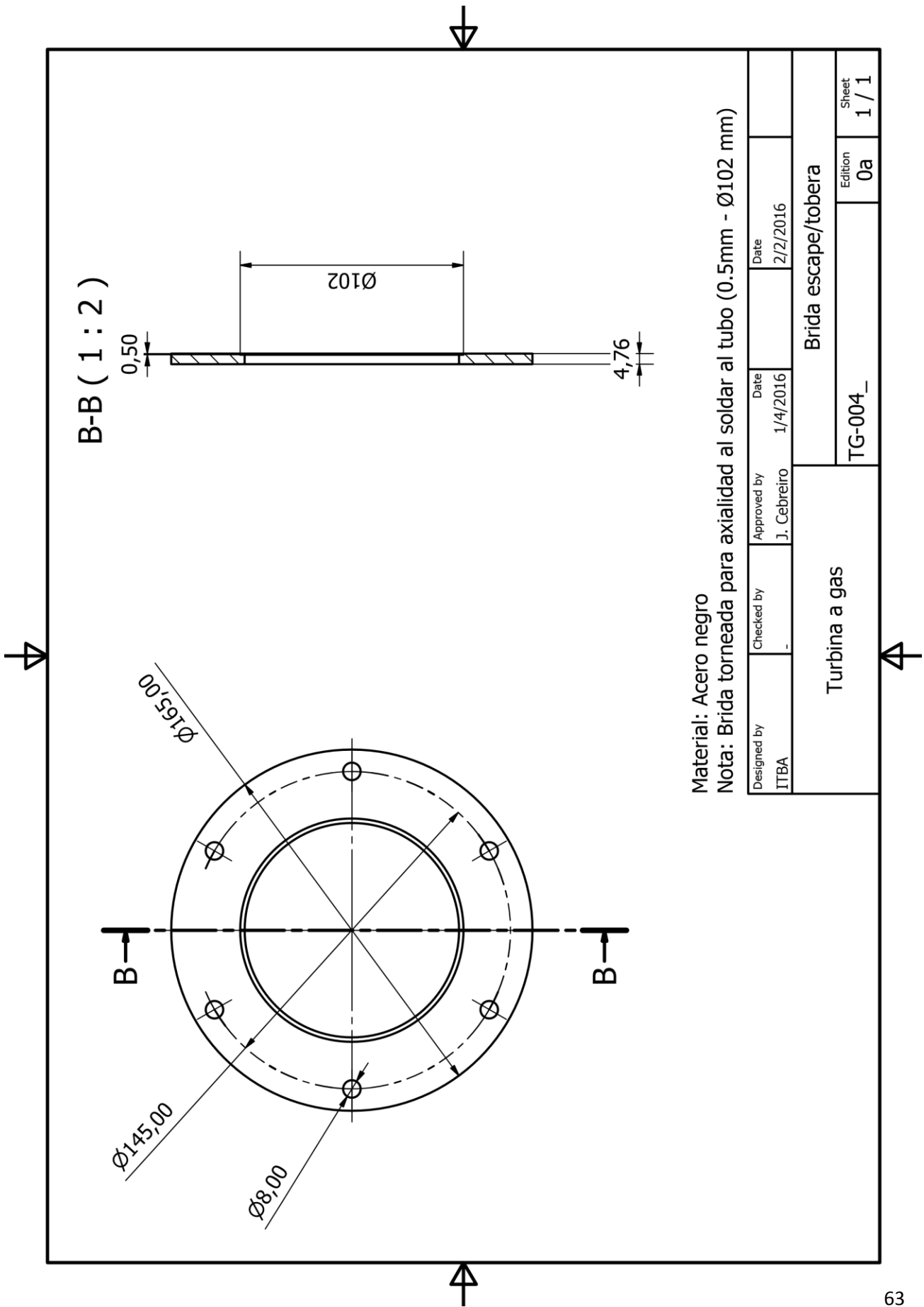
void rpm_fun()
{
    flancos++;
}
```

17. Anexo D: Planos









MANUAL DE USO DE UNA TURBINA DE
GAS A PARTIR DE UN
TURBOCOMPRESOR AUTOMOVILÍSTICO

Anexo al Informe de Proyecto Final de Carrera
Dpto. Ingeniería Mecánica

ALUMNOS:

Brozzi, Dario Leg. 51196

Von Scheidt, Christian Leg. 51333

TUTOR:

Ing. José Pablo Cebreiro

INSTRUCCIONES IMPORTANTES DE SEGURIDAD

Lea estas instrucciones por completo antes de instalar y poner en funcionamiento el producto.

- ❗ **GUARDE ESTAS INSTRUCCIONES.** Se adjuntan instrucciones importantes que deben seguirse durante la instalación y el mantenimiento.
- ❗ Apague la turbina y póngase en contacto con un supervisor si detecta que la máquina hace ruido o funciona de manera inusual.
- ❗ Instale la turbina en un día sin lluvia (puede llevar a problemas de oxidación de la carcasa exterior).
- ❗ Instale la turbina en un día sin vientos excesivos (puede llevar a problemas durante el encendido de la turbina).
- ❗ Apriete correctamente todos los sujetadores, tuercas y bulones.
- ❗ Respete el tamaño de cables y las recomendaciones de fusibles incluidas en este manual.
- ❗ **Ventee la cámara de combustión entre las diferentes pruebas**
- ❗ **Revise el video instructivo para ver cómo ensamblar la turbina**



Previo al arranque

Antes de la utilización de la turbina es imperativo que se tomen todas las precauciones que se enumeraron en la sección “Instrucciones Importantes de Seguridad” y se tomen todos los recaudos que se crean necesarios para evitar posibles lesiones ante un eventual accidente. Se hace hincapié en que los usuarios de la turbina se coloquen casco, anteojos de protección y calzado apropiado y que se pongan a disposición matafuegos en caso de alguna emergencia.

Con todos los elementos de seguridad ya dispuestos, se puede comenzar a verificar que la máquina se encuentre en condiciones para funcionar. Se deben verificar los siguientes ítems, preferentemente en el orden que se ofrece a continuación para evitar inconvenientes:

1. **Verificar que el recipiente de aceite se encuentra líquido suficiente:** Esto implica verificar que el aceite supera y tapa la sección por donde la bomba (compuesta por el taladro y la bomba de agua de auto) toma el líquido.
2. **Comprobar que se puede llevar el aceite a 40 PSI:** Para este paso de verificación, es necesario encender la bomba de aceite y regular la presión de aceite con la perilla que se encuentra en el tablero de comando. Dado el caso de que con la máxima corriente, la bomba no llegase a los 40 PSI, se deberá regular la presión por medio de un cierre del bypass que se encuentra sobre la bomba. Se recomienda bajar al mínimo la potencia desde el panel de control previo al ajuste del Bypass en caso de ser necesario operarlo.
3. **Verificar conexión de mangueras de agua:** Tanto las de alimentación de la bomba como de salida del bypass de agua posterior son conexiones de vital importancia. Si llega a faltar agua en la cámara en momentos clave, puede llegar a ser muy dañino para la misma. Por otra parte, si la conexión del bypass no estuviera bien realizada, podría ocasionar en oxidación de la base de la turbina.
4. **Encender la Bomba de Agua:** para este punto es MUY importante que esté habilitado el caudal de agua y que se haya cumplido el paso anterior. Encender la bomba de agua y verificar que el caudal aumente a al menos 4 L/min, este paso se debe repetir una vez verificados los elementos de medición electrónicos.
5. **Verificar cables de conexión de los sensores:** Esto es especialmente importante para el conexionado cercano a la entrada de aire de la turbina dado que, por movimientos de traslado, estos son los más propensos a soltarse. Para revisar si las conexiones son las correctas, el usuario puede encontrar una ilustración en el Anexo que se adjunta con este manual

6. **Mover Selector de Sensores/Bujía para ver si ambos estados funcionan:**
Mantener el selector de Sensores para las siguientes pruebas
7. **Observar si funciona el display:** para este paso, con verificar que se observan números legibles en la pantalla es suficiente.
8. **Verificar que los instrumentos de medición estén activos:**
 - a. **Verificar que mide caudal de agua:** esta es una buena ocasión para verificar nuevamente que el caudal al prender la hidrolavadora varíe
 - b. **Verificar que hay una lectura de RPM:** En caso de no poder lograr una medición y observar que pese a realizar cambios no se devuelven datos correctos, se incluye en este manual una sección sobre el procedimiento adecuado para reparar la medición y obtener valores correctos.
 - c. **Verificar que hay una lectura de MAF:** esta lectura hace referencia a la tensión que aparecen en el display. Los valores normales para “sin funcionamiento” deben estar cercanos al 0 pero no necesariamente 0. Por lo general, estos valores rondaran 0.04 V a 0.12 V
 - d. **Verifica que exista una medición de temperatura**
9. **Medir la presión de la garrafa de gas para asegurar que tenga contenido suficiente**
10. **Verificar que la bujía funcione correctamente:** para este paso es necesario encender la bujía y escuchar atentamente a la cámara para evaluar si se escucha el sonido eléctrico característico.

Paso 1: Encendido

ADVERTENCIA: SI SE ENCONTRARA ABIERTA LA LLAVE DE COMBUSTIBLE, Y LA TURBINA SE APAGARA O NO ENCENDIERA (YA SEA POR AHOGAMIENTO, FALTA DE COMBUSTIBLE O AIRE), SE DEBERÁ: APAGAR INMEDIATAMENTE LA BUJÍA Y CERRAR LA VÁLVULA DE ADMISIÓN DE COMBUSTIBLE. SI SE DESEA INTENTAR NUEVAMENTE, ES IMPERATIVO VENTILAR LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN ANTES DE REALIZAR EL NUEVO INTENTO.

Este paso consiste en preparar la alimentación correcta de mezcla aire-combustible para la ignición de la turbina.

Para lograr este objetivo, es necesario seguir el siguiente procedimiento:

1. Encender el soplador y dejarlo en ralentí.
2. Encender la bomba de aceite y colocar la presión de aceite (según el medidor en el tablero) en 40 PSI. La bomba debe estar encendida **SIEMPRE** durante todo el proceso.
3. Encender la bomba de agua.
4. Habilitar la lectura de las termocuplas con el switch rojo marcado como “1” en la imagen del Anexo.
5. Colocar el soplador sobre la boca de entrada de aire para **ventilar todos los posibles gases** que hayan quedado estancos desde la última ignición.
6. Habilitar el switch de selección arduino/bujía por medio del switch rojo marcado como “2” en la imagen del anexo.
7. Colocar el switch de selección arduino/bujía en la posición superior (Bujía).
8. Acelerar el soplador y encender la bujía.
9. De a poco, girar la perilla de gas hasta escuchar el ruido característico de la ignición dentro de la cámara.
10. Aumentar el caudal de aire del soplador y, al mismo tiempo, aumentar el combustible que ingresa a la cámara. En este paso se debería llegar a, aproximadamente, un tercio del recorrido máximo de la palanca de admisión de combustible. **Mirar SIEMPRE la temperatura de la cámara para evitar que supere los 900°C.**
11. Una vez alcanzado el punto anterior, bajar el switch de selección arduino/bujía para alimentar el tablero electrónico. Verificar que los valores estén midiendo correctamente (sin la conexión del MAF).

En este punto, la turbina ya se encuentra encendida y los valores que aparecen en pantalla son los mínimos indispensables para el funcionamiento de la turbina.

Durante este paso es importante prestar atención a los valores alcanzados de temperatura, revoluciones por minuto y presión en la cámara. Estos valores pueden ser de utilidad para regular y proteger la turbina. Con estos valores, seremos capaces de proteger a la turbina para que no supere la temperatura de operación máxima, las revoluciones no caigan repentinamente y la presión de la cámara no supere valores críticos de funcionamiento.

Paso 2: Estabilización

ADVERTENCIA: SI SE ENCONTRARA ABIERTA LA LLAVE DE COMBUSTIBLE, Y LA TURBINA SE APAGARA O NO ENCENDIERA (YA SEA POR AHOGAMIENTO, FALTA DE COMBUSTIBLE O AIRE), SE DEBERÁ: APAGAR INMEDIATAMENTE LA BUJÍA, CERRAR LA VÁLVULA DE ADMISIÓN DE COMBUSTIBLE. SI SE DESEA INTENTAR NUEVAMENTE, ES IMPERATIVO VENTILAR LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN ANTES DE REALIZAR EL NUEVO INTENTO.

El objetivo de este paso es estabilizar la turbina y lograr que las temperaturas no alcancen valores críticos dentro de la cámara de combustión.

Para lograr este objetivo, es necesario seguir el siguiente procedimiento:

1. Una vez que la temperatura alcance los 850°C medidos en la cámara, se debe abrir la válvula del bypass de agua. Preferentemente por debajo de 1L por minuto (lo cual representa poco más de 10° de apertura)
2. Elevar el combustible que ingresa a la cámara hasta que la temperatura suba por encima de los 800°C y se estabilice cercano a los 850°C.
3. En este momento, se debe dejar operar la turbina teniendo mucho cuidado que los valores sensados se mantengan dentro de los valores normales y seguros de funcionamiento.
4. Aquí, con la turbina estabilizada, se puede pasar a medir todos los valores característicos del ciclo Brayton.

Durante este paso es importante prestar atención a los valores alcanzados de temperatura, revoluciones por minuto y presión en la cámara. Estos valores pueden ser de utilidad para regular y proteger la turbina. Con estos valores, seremos capaces de proteger a la turbina para que no supere la temperatura de operación máxima, las revoluciones no caigan repentinamente y la presión de la cámara no supere valores críticos de funcionamiento.

Paso 3: Apagado

En este paso, el objetivo será lograr el apagado correcto de la turbina, evitando fallas innecesarias y problemas futuros tanto a la cámara de combustión como a los sistemas periféricos.

Para lograr este objetivo, es necesario seguir el siguiente procedimiento:

1. Bajar la llave de alimentación de combustible hasta que no haya flujo de caudal de combustible hacia la cámara
2. Cerrar el bypass de agua para evitar que siga ingresando agua a la cámara
3. Ventilar con el soplador para eliminar humos que queden en la cámara y ayudar a evaporar el agua remanente. Realizar esta acción por alrededor de 1 minuto
4. Utilizar el soplador para ventilar cualquier resto de agua que pueda haber caído sobre la estructura
5. Recie luego de, como mínimo, 30 segundos después de apagada la turbina se puede apagar la bomba de aceite. Esto es importante para evitar que se recaliente el aceite y se enfríe correctamente el turbocompresor
6. **ADVERTENCIA: Esperar a que la máquina se enfríe antes de proseguir con la limpieza y puesta a punto para cualquier prueba siguiente.**

Anexo: Información Relevante



Imagen 1: Disposición de pines exteriores cercanos a la entrada de aire



Imagen 1: Esquema de disposición de elementos en el tablero de comando. De izquierda a Derecha y de Arriba Abajo: Display Arduino, Display Termocuplas, Selector Termocuplas, Switch Rojo1, Switch Arduino/Bujía, Switch Rojo 2, Regulador de Bomba de Aceite, Switch Rojo 3.