



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Proyecto Técnico Industrial

PUESTA A PUNTO DE BANCO DE ENSAYO DE TURBINA A REACCIÓN DE LABORATORIO

Alumno: Antonio González Troyano

Tutor: Fernando Antonio Cruz Peragón
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera
Area: Máquinas y Motores Térmicos

Septiembre, 2023

Índice

1. Resumen	5
2. Introducción	7
2.1. Justificación	7
2.2. Objetivos	7
2.3. Antecedentes	7
2.3.1. Motores de reacción	7
2.3.2. Funcionamiento de un turborreactor	7
2.3.3. Teoremas de conservación	8
2.3.4. Conservación de la masa	9
2.3.5. Conservación de la cantidad de movimiento	9
2.3.6. Conservación de la energía	10
2.3.7. Certificación de emisiones de motores de aeronaves	11
3. Material	13
3.1. Datos técnicos del motor	13
3.1.1. Compresor	14
3.1.2. Cámara de combustión	16
3.1.3. Turbina	18
3.1.4. Tobera	19
3.2. Banco de ensayo	20
3.2.1. Unidad de control electrónica	21
3.2.2. Mando de control	21
3.2.3. Switch	22
3.2.4. Acelerador	22
3.2.5. Unidad central	23
3.2.6. Conexiones aire/combustible	25
3.2.7. Lector del caudal de combustible	26
3.2.8. Caudalímetro	26
3.2.9. Depósito de combustible	28
3.2.10. Filtro de aire	29
3.2.11. Filtro de combustible	29
3.2.12. Sensores predeterminados instalados	29
3.2.13. Sensores adicionales instalados	32
3.3. Descripción del termómetro TEPCEL 305 y 307	34
3.4. Descripción del termómetro Kane-May KM330	35
3.5. Descripción del manómetro AIRFLOW DM3	35
3.6. Descripción del manómetro CHAUVIN ARNOUX	36
3.7. Analizador de gases de combustión: Testo 350	37
3.7.1. Unidad de control	37
3.7.2. Caja analizadora	40
3.7.3. Sonda modular de gases de combustión	42
3.8. Bomba calorimétrica	43

3.8.1.	Recipiente de combustión de oxígeno (1110)	44
3.8.2.	Cubeta	45
3.8.3.	Bloque regulador, oxígeno (A570DD)	47
3.8.4.	Válvula de solenoide de oxígeno (A1278DD)	47
3.8.5.	Conjunto de motor agitador (A1268DD)	47
3.8.6.	Balanza analítica	47
3.8.7.	Balanza	47
4.	Métodos	49
4.1.	Procedimiento de cálculo	49
4.1.1.	Evaluación de la tobera a la salida	49
4.1.2.	Evaluación de la compresión	51
4.1.3.	Evaluación salida de cámara de combustión	52
4.1.4.	Evaluación a la entrada de la tobera	53
4.2.	Emisiones	54
4.3.	Calibración termómetro con sensor tipo K	58
4.4.	Cálculo del poder calorífico superior e inferior	61
4.5.	Proceso de cebado	64
4.5.1.	Cebado de la línea de combustible	65
4.5.2.	Selección de funciones	65
4.5.3.	Cebado de la línea de combustible G	67
4.5.4.	Cebado de la línea de combustible F	69
4.6.	Proceso de encendido	71
4.7.	Realización del ensayo	72
4.7.1.	Medición de la temperatura	72
4.7.2.	Medición de la presión	73
4.7.3.	Medición de las emisiones de los gases de combustión	75
4.7.4.	Medición del empuje y consumo de combustible	79
4.8.	Proceso de apagado	80
5.	Resultados	81
5.1.	Medidas ciclo LTO	81
5.1.1.	Primer ensayo: Grado de carga 7 %	81
5.1.2.	Segundo ensayo: Grado de carga 30 %	83
5.1.3.	Tercer ensayo: Grado de carga 85 %	85
5.1.4.	Cuarto ensayo: Grado de carga 100 %	87
5.2.	Discusión de los resultados	91
5.2.1.	Curva de calibración del flujo de aire	91
5.2.2.	Grado de carga frente a rpm	93
5.2.3.	Grado de carga frente EGT	94
5.2.4.	Grado de carga frente al empuje	95
5.2.5.	Grado de carga frente al consumo de combustible	96
5.2.6.	Grado de carga frente al consumo específico de combustible	96
5.2.7.	Grado de carga frente al consumo específico de combustible y el empuje	97
5.3.	Dificultades en el ensayo	98

6. Conclusiones

99

1. Resumen

Este trabajo consiste en la puesta a punto del banco de ensayo de una turbina a reacción. Para ello se detallarán los instrumentos utilizados y como se realiza un ensayo. Además, se realizará una prueba de emisiones la cual sigue las normas del ensayo landing and take-off (LTO, por sus siglas en inglés). Por último, se discutirán los resultados obtenidos en los distintos ensayos. Se ha escrito un anexo donde se explican las distintas etapas que hay que hacer para realizar un ensayo correctamente así como los distintos procedimientos para poder cambiar distintas partes del motor para su correcto funcionamiento en el caso de que estas estén defectuosas.

2. Introducción

2.1. Justificación

En los últimos años hay una necesidad creciente de reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética en todos los aspectos, entre los cuales entra la aviación. En ella, el elemento crítico es su sistema de propulsión, basado en motores térmicos a reacción. Con el objeto de estudiar y caracterizar las emisiones en motores a reacción, hay actualmente dos equipos de ensayo con su correspondiente turbina de gas en el laboratorio 004 de Máquinas y Motores Térmicos, en la EPS de Jaén. Una de ellas se ha adquirido recientemente, y se desea ponerla a punto para realizar ensayos.

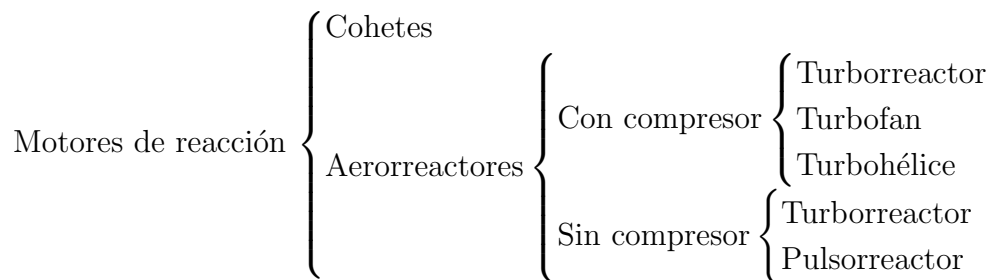
2.2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es ponerla en marcha, y sistematizar un procedimiento de medida de propiedades de presión y temperatura en diferentes puntos de la turbina, así como de sus emisiones, haciendo uso de analizador de humos. También se realizará un ensayo “landing and take-off” (*LTO*, por sus siglas en inglés), el cual se utiliza para determinar el desempeño que tiene el motor en el ciclo de aterrizaje y despegue.

2.3. Antecedentes

2.3.1. Motores de reacción

Los motores de reacción son dispositivos que producen un chorro de gases a su salida con una velocidad muy elevada. Este chorro se produce como resultado de una combustión, de forma que la energía que contiene el combustible se transforma en energía cinética, en vez de hacerlo en energía mecánica en un eje. Para estas máquinas es necesario considerar la ecuación de conservación de la energía, para establecer los trabajos y consumo energético de combustible. También es necesario considerar la ecuación de conservación de cantidad de movimiento para obtener la fuerza de empuje. Estas máquinas se pueden clasificar de la siguiente manera.



2.3.2. Funcionamiento de un turborreactor

Este motor incorpora los elementos de una turbina de gas, los cuales son un compresor, cámara de combustión y turbina. La turbina en este motor solo sirve para mover el compresor, además este motor incorpora un difusor antes del compresor y una tobera a la salida de la turbina. El análisis de un turborreactor se hace en relación a un ciclo Brayton, el cual desarrolla en serie dos compresiones (difusor y compresor) y dos expansiones (turbina y tobera).

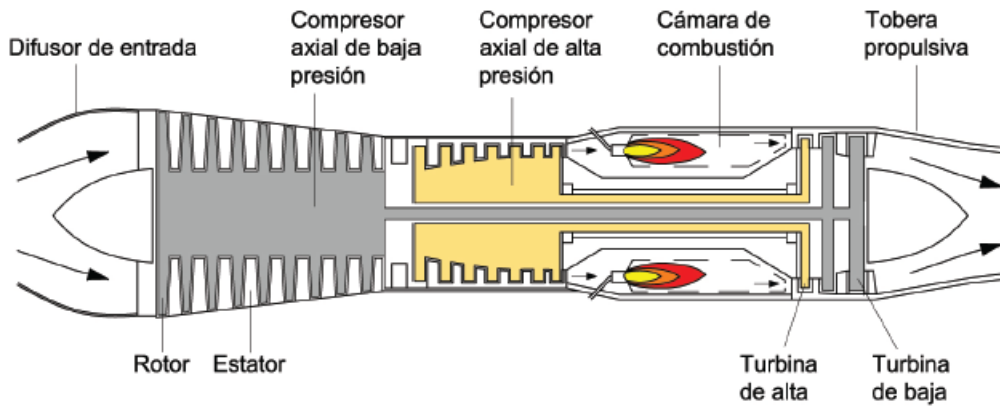


Figura 2.1: Esquema de un turborreactor.

El proceso H-10 corresponde con el difusor, el proceso 10-20 corresponde con la compresión, el proceso 20-30 corresponde con el aporte de calor en la cámara de combustión, el proceso 30-40 corresponde con la expansión en la turbina y el proceso 40-5 corresponde con la expansión en la tobera. Estos procesos se pueden ver en la figura 2.2.

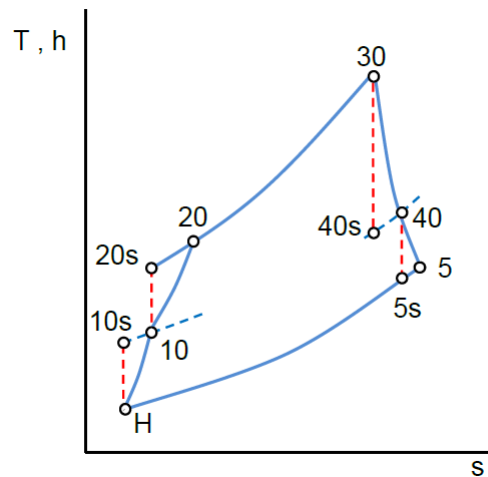


Figura 2.2: Ciclo termodinámico de un turborreactor

2.3.3. Teoremas de conservación

Para explicar las ecuaciones de continuidad aplicadas a este tipo de motores se recurre a la figura 3.3 (para el caso de un motor cohete la sección de entrada y el flujo de aire no existen). Se evaluarán para el caso de régimen estacionario. Desde un observador móvil, solidario con el motor, éste quedaría estático, de esta forma el aire que entra al motor llega a una velocidad “ u ”, que es la misma que la velocidad de vuelo. La sección A_o es una sección ficticia lo suficientemente alejada para que las líneas de corriente no se modifiquen. Este tubo de entrada desde A_o hasta A_e provoca una difusión, que frena el fluido hasta las condiciones de entrada.

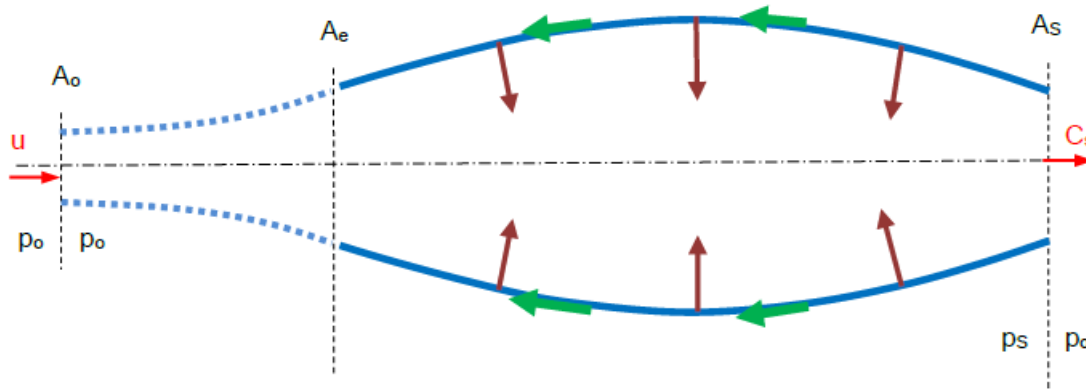


Figura 2.3: Motor aerorreactor.

Este tubo se ha dibujado de forma divergente suponiendo que el flujo es subsónico. Si el flujo fuera supersónico primero se debería pasar el flujo de supersónico a sónico a través de un conducto divergente para posteriormente hacer la difusión con flujo subsónico.

En el caso de este trabajo el motor está parado por lo que la velocidad de vuelo es nula. Esto produce que el tubo ficticio debe ser una tobera convergente, que toma aire a una velocidad nula y lo lleva hasta las condiciones de entrada.

2.3.4. Conservación de la masa

El flujo de gases que sale por la tobera deberá ser igual a la suma del aire a la entrada más el combustible utilizado en la combustión. Si se conocen las condiciones reales de presión p_s , temperatura T_s , velocidad c_s y sección A_s a la salida del motor, entonces se podrá conocer el flujo de gases a la salida. Si las condiciones son ideales se utiliza un coeficiente de descarga C_D .

$$\dot{m}_g = c_s \cdot \rho_s \cdot A_s = C_D \cdot c_{s,iso} \cdot \rho_{s,iso} \cdot A_s \quad (7.1)$$

Este flujo será el mismo a lo largo de todo el sistema, ya que se está evaluando en régimen estacionario. La ecuación (7.1) es válida para cualquier sección. También si la tobera es convergente o convergente-divergente.

2.3.5. Conservación de la cantidad de movimiento

La variable de la presión no aparece en la ecuación de conservación de la masa, por lo que se recurre a la ecuación de cantidad de movimiento donde aparece en forma de sus derivadas. Por tanto, la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en forma diferencial, aplicada al gas, considerando la presión relativa respecto a la atmosférica ($p - p_0$) y en régimen estacionario es la siguiente:

$$\frac{D(\rho c)}{Dt} = \frac{d(\rho c)}{dt} + c \cdot \frac{\partial(\rho c)}{\partial x} = -\frac{\partial(p - p_0)}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad (7.2)$$

Los esfuerzos de presión y rozamiento que la pared interior ejerce sobre el gas tienen la dirección del motor. Además, en los extremos habrá una presión del gas ejerciendo una fuerza hacia fuera,

correspondiente a p_0 y p_s , además de la presión ambiente actuando hacia adentro. Si reordenamos los términos en la ecuación (7.2) obtenemos el **empuje intrínseco**:

$$E_i = \dot{m}_g \cdot c_s - \dot{m}_a \cdot u + (p_s - p_o) \cdot A_s \quad (7.3)$$

Este es el empuje resultante de los esfuerzos en carena, presión en los extremos y los efectos del ambiente. Por la tercera Ley de Newton, esta será la fuerza neta en empuja al vehículo en movimiento.

Si la presión de salida (p_s) es igual a la presión ambiental, la tobera se dice que está adaptada. Para obtener la potencia propulsiva se multiplica este empuje por el desplazamiento del motor, ya que se deriva de la forma diferencial del trabajo en un movimiento lineal, $dW = F \cdot dx$ (con igual dirección y sentido de la fuerza F y el desplazamiento).

2.3.6. Conservación de la energía

En este apartado hay que diferenciar las dos formas de evaluar el sistema: como observador fijo y como observador móvil.

El balance energético para un **observador fijo** es el siguiente:

$$\dot{Q}_{ap} + \dot{E}_{c_p} = N_p + \dot{E}_{c_s} + \Delta \dot{H} \quad (7.4)$$

A continuación, se define los términos de la ecuación (7.4):

- Potencia térmica real aportada en la cámara de combustión: $\dot{Q}_{ap} = \eta_{cc} \cdot H_u$
- Energía cinética del propulsante (combustible o mezcla): $\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot u^2$ donde $\dot{m}$ es $\dot{m}_c$ para aerorreactores.
- Potencia propulsiva: N_p
- Variación de flujo de energía cinética: $\frac{1}{2} \cdot \dot{m}_g (c_s - u)^2$
- Variación de energía térmica estática de los gases a sus paso por el motor: $\Delta \dot{H} = \dot{m}_g \cdot (h_s - h_h)$
- Flujo másico de aire, gases y combustible: $\dot{m}_a, \dot{m}_g, \dot{m}_c$

Considerando los términos anteriores la ecuación (7.4) queda:

$$\eta_{cc} \cdot \dot{m}_c \cdot H_u + \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_c \cdot u^2 + \dot{m}_c \cdot h_c + \dot{m}_a \cdot h_h = N_p + \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_g (c_s - u)^2 + \dot{m}_g \cdot h_s \quad (7.4 \text{ bis})$$

Si se realiza un balance energético para un **observador móvil**, entonces se tiene que todo el flujo calorífico del gas que entra al motor sirve para aumentar la energía cinética y el estado térmico de los gases. En este balance no habrá potencia propulsiva debido que se considera que no hay desplazamiento.

$$\dot{Q}_{ap} = \dot{E}_{c_s} - \dot{E}_{c_E} + \Delta \dot{H} \quad (7.5)$$

Hay dos formas de calcular la potencia propulsiva. La primera es obtenerla multiplicando el empuje intrínseco por la velocidad de vuelo $N_p = E_i \cdot u$, ya que se obtiene de la expresión $dW = F \cdot dx$

$$N_p = E_i \cdot u = [\dot{m}_g \cdot c_s - \dot{m}_a \cdot u + (p_s - p_a) \cdot A_s] \cdot u \quad (7.6)$$

La otra forma de obtener la potencia propulsiva es comparar las ecuaciones (7.4) y (7.5). De esta forma la potencia propulsiva corresponde con la diferencia de los incrementos de energía cinética de ambas expresiones.

2.3.7. Certificación de emisiones de motores de aeronaves

Para certificar las emisiones, la OACI ha definido un ciclo LTO de referencia específico. Este ciclo consta de cuatro fases modales las cuales son, “aterrizaje”, “rodaje”, “despegue” y “ascenso”. Este ciclo es una aproximación simplificada del ciclo de vuelo operacional. Un ejemplo de simplificación es que se asume que la operación de despegue cambia abruptamente a potencia de ascenso al final de la carrera de despegue y que esto es mantenido sin cambios, por lo que no se capturan bien los detalles y variaciones que ocurren en la operación real. Este ciclo fue diseñado como un ciclo de referencia con el fin de comparar tecnologías.

Fase operativa	Tiempo (min)	Grado de carga (%)
Aterrizaje	4.0	30
Taxi	26	7
Despegue	0.7	100
Ascenso	2.2	85

Tabla 1: Ciclo LTO.

Estas normas de emisiones de la OACI se aplica a motores turborreactores y turbofan de aeronaves subsónicas y supersónicas con un índice de empuje de 26.7 kN. La OACI excluyó de la norma a los pequeños motores turbofan, turborreactor, turbohélice y alternativos. A continuación, se explicarán las distintas fases del ciclo operacional de vuelo.

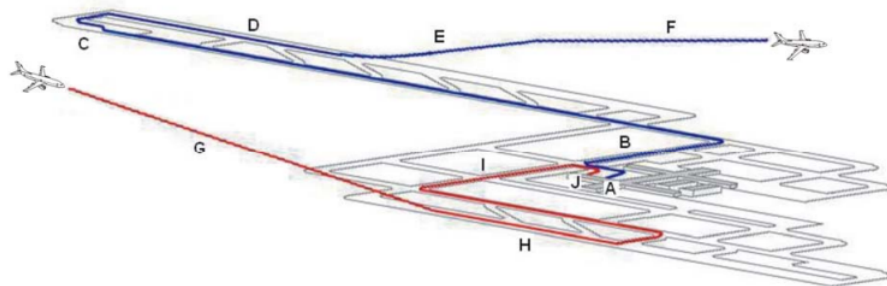


Figura 2.4: Ciclo operacional de vuelo

■ Salida.

- A. **Arranque:** Es normal arrancar los motores principales antes de la maniobra de empuje desde el puesto de estacionamiento. Los motores principales se encienden inmediatamente antes del rodaje.

- B. **Rodaje a la pista:** En esta fase las aeronaves suelen ir a la pista o el área de espera con todos los motores encendidos. El rodaje de salida se lleva a cabo en ralentí aunque se pueden hacer breves ráfagas para vencer la inercia.
- C. **Espera en tierra:** Cuando sea necesario, se puede solicitar a la aeronave que haga cola mientras espera la autorización para entrar en pista. Los motores principales normalmente están configurados para impulsarse al ralentí con breves ráfagas.
- D. **Recorrido de despegue y ascenso:** La aeronave se acelera a lo largo de la pista hasta alcanzar la velocidad de rotación al final del despegue. Los motores funcionan a la potencia de despegue. Los operadores utilizan empujes reducidos que están determinados por el peso real de la aeronave, la longitud de la pista y los factores meteorológicos.
- E. **Ascenso inicial hasta el corte de empuje:** Después de despegar el tren de aterrizaje se levanta y la aeronave asciende a velocidad constante con el ajuste de potencia de despegue inicial.
- F. **Aceleración, paso a configuración de limpia y ascenso en ruta:** Después de la reducción de empuje, la aeronave continúa ascendiendo a un ajuste de empuje menor. Seguidamente se produce una retracción de flaps/slats a medida que la aeronave acelera y alcanza la altitud de crucero.

■ Llegada

- G. **Aterrizaje final y extensión de flaps:** Para el aterrizaje final se estabiliza desde un punto de referencia que sigue una pendiente de planeo predecible a bajo empuje. Los ajustes del empuje se incrementan para contrarrestar la resistencia adicional a medida que los flaps y el tren de aterrizaje se bajan mientras que la velocidad disminuye.
- H. **Enderezamiento, toma de contacto y recorrido de aterrizaje:** El acelerador normalmente se retarda al ralentí durante el enderezamiento y la carrera de aterrizaje. Este proceso es seguido por la aplicación de los frenos de las ruedas y, en su caso, por un empuje inverso para reducir la velocidad de la aeronave en la pista.
- I. **Rodaje desde la pista hasta el puesto de estacionamiento:** El rodaje desde la pista es un proceso similar al descrito anteriormente, en este caso el piloto puede apagar uno o más motores si es necesario.
- J. **Apagado del motor:** En este proceso los motores de la aeronave se apagan cuando ha dejado de rodar.

3. Material

3.1. Datos técnicos del motor

El motor de reacción es de la empresa *AMT Netherlands* cuyo modelo es el *Olympus HP E-start* (*kerosene start*). El combustible utilizado es **Jet A-1** el cual es usado en aviación comercial, en nuestro caso, la turbina también usa el combustible como lubricante por lo que es necesario que el combustible sea mezclado previamente con aceite de turbina, en concreto **Aeroshell 500** al **4.5 %**. Este aceite se encargará de la lubricación durante la secuencia de encendido y apagado del motor.

A continuación se presenta una tabla con las especificaciones técnicas del motor.



Figura 3.1: Motor a ensayar

Diámetro	130 mm
Longitud	374 mm
Peso del motor	2900 gr
Empuje a 108500 rpm	230 N
Empuje 106000 rpm	186 N
Empuje a rpm mínimas	10 N
Relación de presiones a max rpm	3.8:1
Flujo de masa a max rpm	450 gr/s
Máximas rpm	108500
Máximas rpm permitidas	112000
Temperatura de los gases de escape	700°C
Máxima temperatura de los gases de escape	750°C
Consumo de combustible a max rpm	640 gr/min

Tabla 2: Datos técnicos.

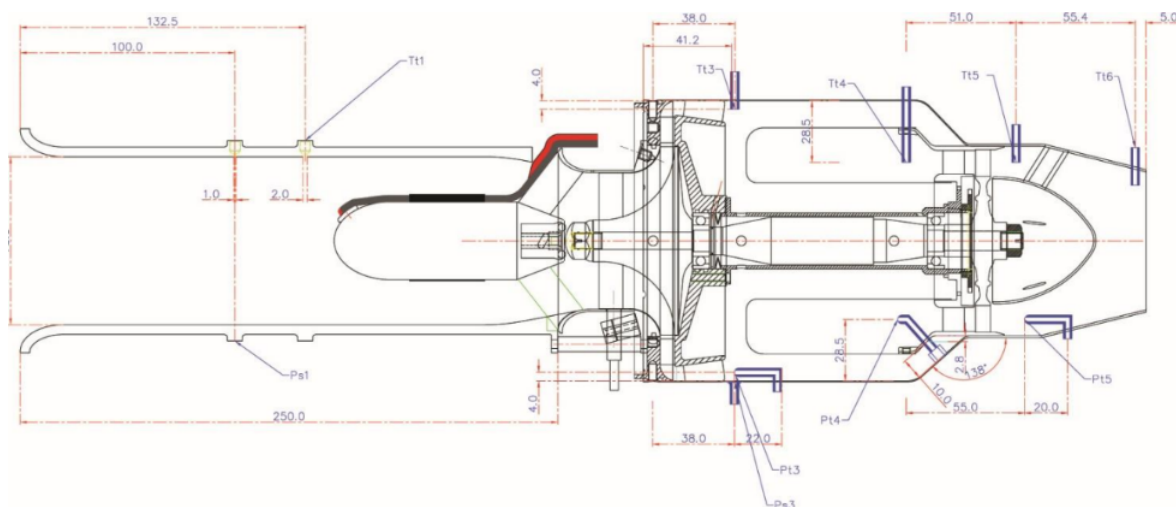


Figura 3.2: Plano del motor a reacción. Modelo Olympus HP

Se han presentado las especificaciones técnicas del motor, ahora se explicará cada parte del mismo y su funcionamiento.

3.1.1. Compresor

Primeramente el aire del ambiente es aspirado por el compresor. El compresor de este motor es un compresor centrífugo y es accionado por un motor eléctrico en la etapa de arranque. Justo a la entrada del compresor hay un pequeño tubo como se puede ver en la figura 2.2, esto se hace para que el aire a la entrada del compresor tenga una componente axial lo más grande posible.

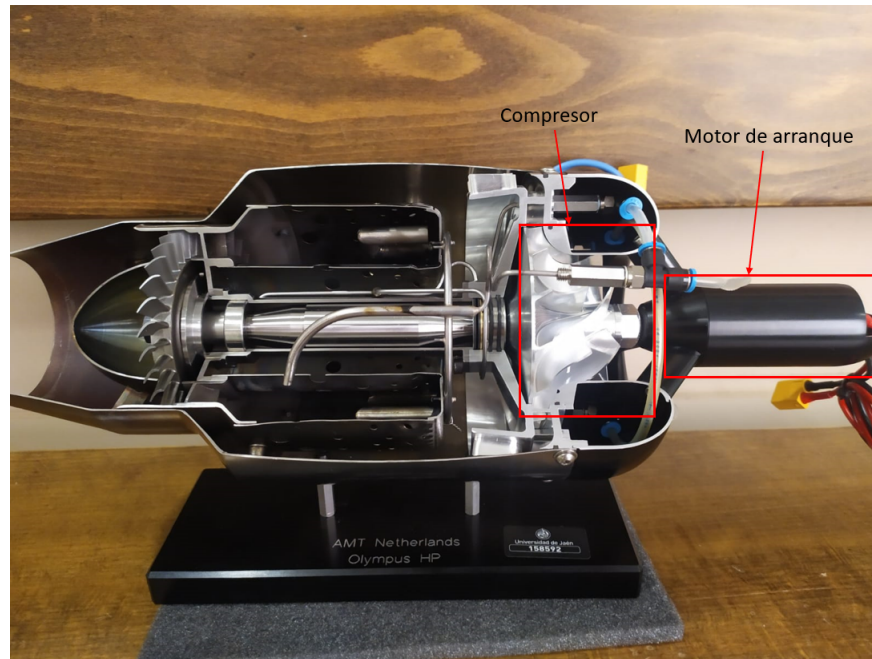


Figura 3.3: Compresor centrífugo y motor de arranque

Una vez que el aire es comprimido por el compresor este pasa a la cámara de combustión donde se mezclará con el combustible.

Esta turbomáquina posee unas características de funcionamiento fuera del punto de diseño que hay que tener en cuenta, ya que las condiciones variables de velocidad y flujo hacen que el rendimiento isoentrópico y la relación de presiones varíe con la carga. Para este caso se representan las curvas donde el eje de abscisa es un flujo $\dot{m}$ y en el de ordenadas la relación de presiones r_p . Para cada velocidad de giro n , tiene una curva característica $r_p - \dot{m}$, además de otra $\eta - \dot{m}$.

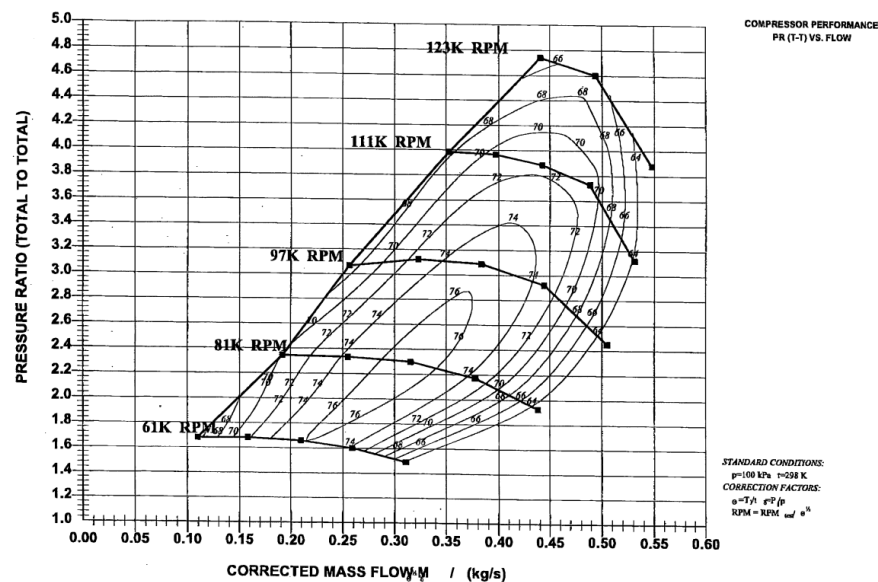


Figura 3.4: Mapa del compresor centrífugo

3.1.2. Cámara de combustión

La siguiente etapa consiste en mezclar el aire comprimido por el compresor con el combustible para su posterior ignición con la ayuda de una bujía. Para este tipo de motor no todo el combustible es mezclado con el aire sino que una parte se desvía a los cojinetes del eje para su lubricación y el resto se mezcla con el aire.

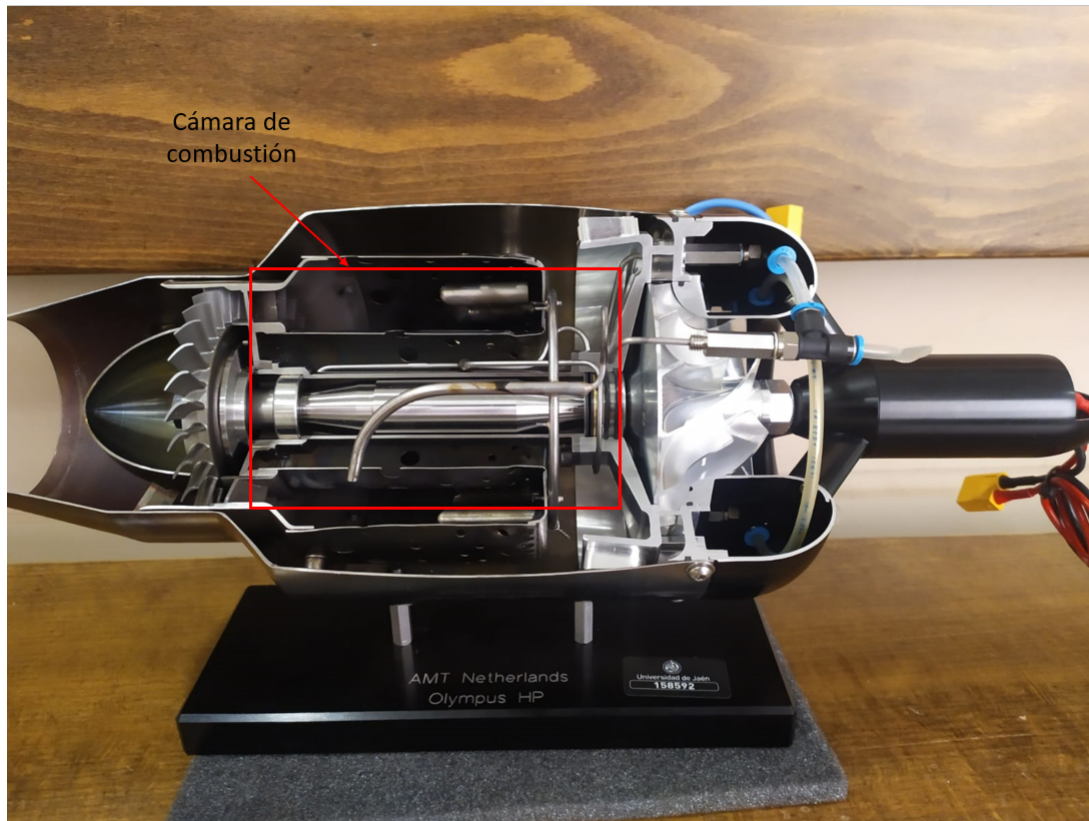


Figura 3.5: Cámara de combustión

En la figura 2.6 se muestra la línea que lleva el combustible a los cojinetes para lubricarlos. También se muestra en la figura 2.7 la línea que lleva el combustible para mezclarlo con el aire, esta línea pasa por un anillo donde tiene unas pequeñas salidas por donde sale el combustible, además tiene otras salidas más grandes en la parte superior e inferior de la cámara de combustión. Para producir la combustión se utiliza una bujía situada en la parte superior de la cámara de combustión, esta se puede observar en la figura 2.8.

Una vez que se produce la combustión se aumenta drásticamente la temperatura y el flujo de gases de escape sale de la cámara de combustión y pasa por la turbina la cuál acciona el compresor.

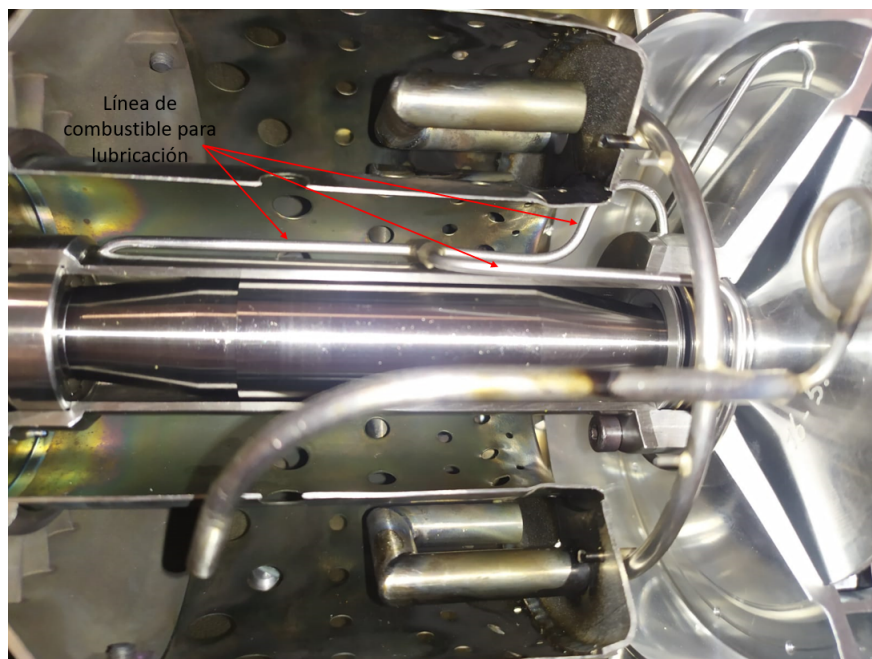


Figura 3.6: Línea de combustible para la lubricación

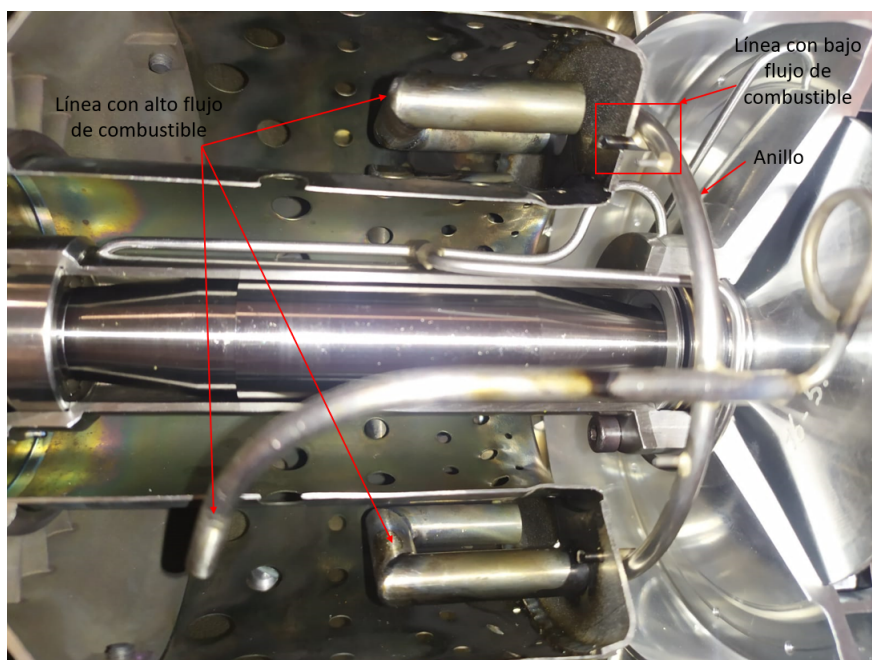


Figura 3.7: Línea de combustible

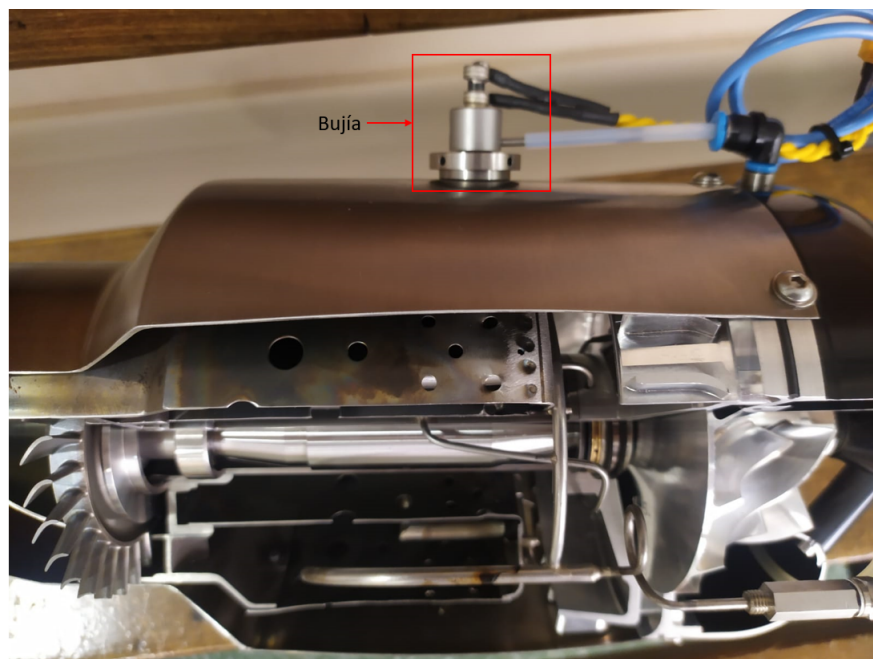


Figura 3.8: Bujía para producir la combustión

3.1.3. Turbina

Después de producirse la combustión, los gases de escape accionan una turbina. Esta es una turbina de tipo axial y es necesaria para accionar el compresor y así poder desconectar el motor de arranque.

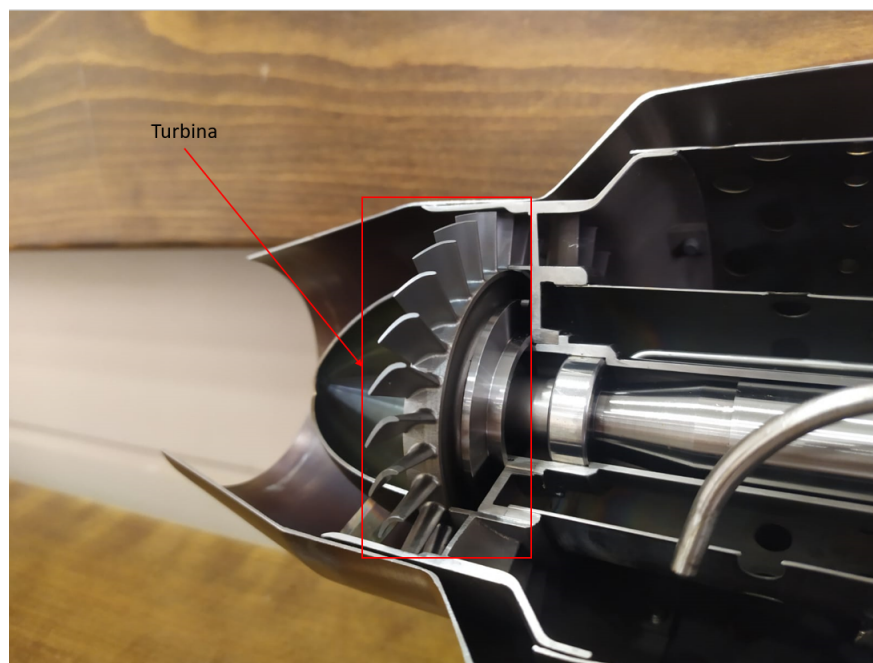


Figura 3.9: Turbina

3.1.4. Tobera

Por último, los gases de escape pasan por la tobera en la cuál se produce una expansión del flujo aumentando así la velocidad de los gases a la salida. Como se puede ver en la figura 2.10 la tobera tiene un tramo recto al principio, que se estrecha a partir de la mitad de su longitud hasta la salida. Dentro de ella hay un elemento que estrecha el paso del flujo, esto se hace para poder estabilizarlo y evitar el desprendimiento de la capa límite a la salida del flujo de la turbina.

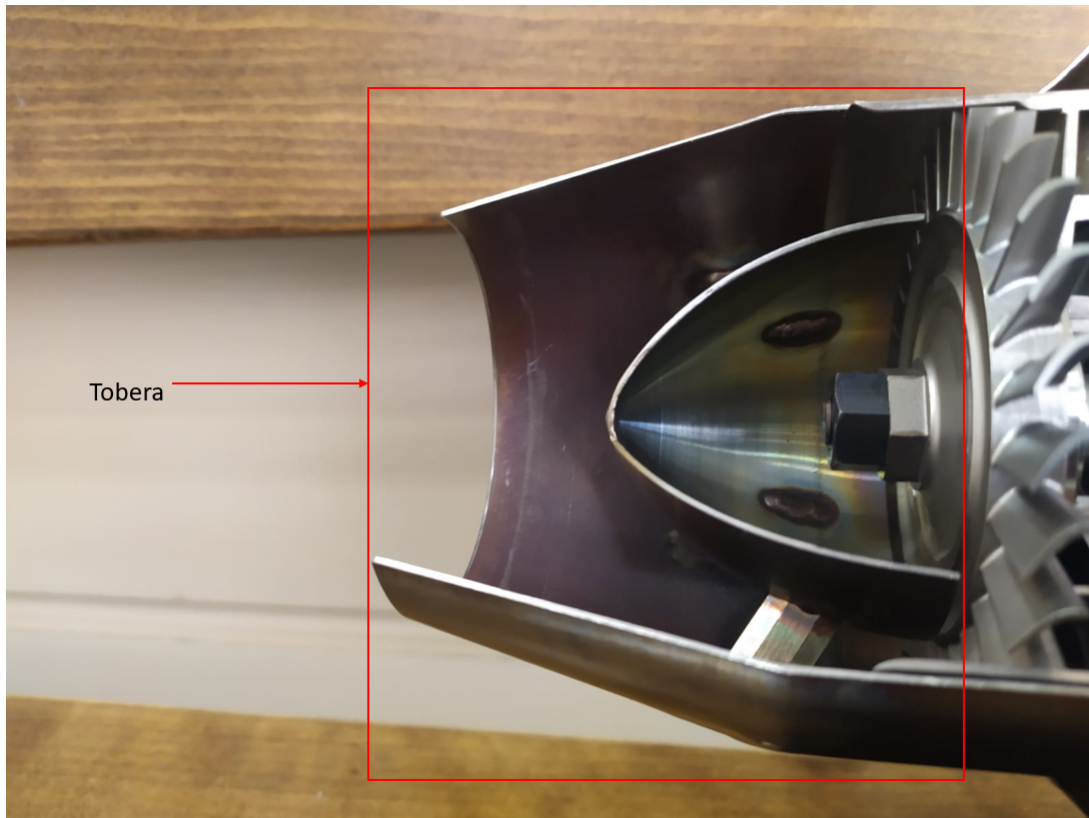


Figura 3.10: Tobera

A continuación, se presenta un esquema de la tobera con las medidas más significativas.

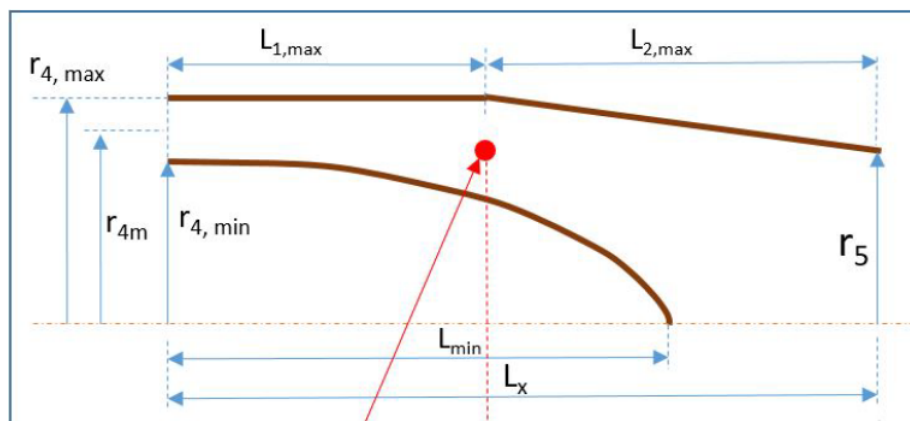


Figura 3.11: Medidas más significativas de la tobera

$r_{4,max}$	42 mm
$r_{4,min}$	30 mm
$r_{4,m}$	36 mm
$L_{1,max}$	35 mm
$L_{2,max}$	37 mm
L_x	72 mm
L_{min}	48 mm
r_5	32 mm

Tabla 3: Medidas características de la tobera

3.2. Banco de ensayo

El banco de ensayo está formado por el motor a reacción, modelo *Olympus HP*, el cual tiene conectados un sensor de rpm y de temperatura de los gases de escape. También tiene otros instrumentos como un medidor del flujo de combustible, un lector de datos que dependiendo del estado de la turbina (apagada, secuencia de arranque o secuencia de parada) indicará distintos parámetros. También contiene un depósito que cuenta además con un filtro de combustible y tiene conectadas todas las líneas que van desde el depósito al motor y las líneas de retorno de combustible que se usarán para el cebado de las mismas, este proceso se explicará de forma más detenida en la siguiente sección.



Figura 3.12: Banco de ensayo

3.2.1. Unidad de control electrónica

La unidad de control electrónica, *ECU* por sus siglas en inglés, está conectada al sensor de revoluciones y al de la temperatura de gases de escape y controla que las rpm y la temperatura de los gases de escape no excedan del límite permitido.



Figura 3.13: ECU del motor

3.2.2. Mando de control

Para poder controlar la secuencia de encendido y parada del motor así como el porcentaje de carga es necesario utilizar un mando de control.



Figura 3.14: Mando de control

El mando de control cuenta con dos instrumentos de control, **Switch** (interruptor en forma de palanca) situado a la izquierda y el **acelerador** (interruptor en forma de rueda) situado a la derecha.

3.2.3. Switch

El switch es un interruptor que tiene tres posiciones:

1. Posición de parada de emergencia.
2. Posición de parada.
3. Posición de encendido.

Este interruptor nos permite controlar el encendido y las distintas paradas del motor.



(a) Posición inferior (1) permite la parada de emergencia.



(b) Posición intermedia (2) permite la parada del motor.



(c) Posición superior (3) permite el encendido del motor.

Figura 3.15: Posiciones del switch

3.2.4. Acelerador

Este interruptor nos permite controlar el grado de carga del motor variando desde 0 % hasta 100 %, por lo que permite aumentar y disminuir las revoluciones del motor. Si el motor está apagado el

acelerador nos sirve para poder seleccionar funciones que tiene instaladas la ECU. Estas funciones nos permite realizar tareas de forma automática como por ejemplo el proceso de cebado de las líneas de combustible (este proceso se explicará más adelante), secuencia de enfriado rápido, etc.

3.2.5. Unidad central

Esta es la unidad de control del banco de ensayo. En ella está instalada la ecu y tiene distintos elementos para controlar el banco de ensayo. A continuación, se explicará los distintos elementos de la unidad central.

- Interruptor principal: Este interruptor permite el encendido/apagado del banco de ensayo. Para encender o apagar el banco hay que girar el interruptor de la figura 3.16.



Figura 3.16: Interruptor principal de la unidad de control

- Indicador del empuje: En esta zona se puede obtener la medida del empuje que genera el motor. El empuje está en unidades de kg. Está diseñado para una fuerza máxima de 90 kg.



Figura 3.17: Indicador del empuje

- Fusible: El banco cuenta con un fusible principal de 3.15 A.



Figura 3.18: Fusible principal del banco de ensayo

- Interruptor del aire: Este interruptor activa la salida de aire del banco de ensayos. También se puede utilizar para enfriar el motor.



Figura 3.19: Interruptor de aire

- Botón CTF: Este botón se puede utilizar para activar “funciones especiales”. Además también se puede utilizar para recalibrar el acelerador y las señales del interruptor del mando de control.



Figura 3.20: Botón CTF

- Salida del mando de control: En esta zona se conecta el mando de control o un cable dedicado para la descarga/programación de la ecu.



Figura 3.21: Salida del mando de control

3.2.6. Conexiones aire/combustible

El banco de ensayo cuenta con distintas conexiones de aire y combustible así como un circuito de retorno de combustible que se utilizará para el proceso de cebado.

- Fuel output/Salida de combustible: Esta línea está conectada a la entrada **F** del motor.
- IGN output/Salida IGN: Esta línea está conectada a la entrada **G** del motor.
- Air output/Salida de aire: Está conectada a la entrada **A** del motor. Esta salida está controlada por el interruptor a aire situado en la unidad de central.

- Fuel return/Retorno de combustible: Se puede usar temporalmente para conectar la salida de combustible al cebar la línea de combustible principal (función 50 %) y la línea de combustible del encendedor (función 60 %). Esto lleva el combustible directamente al depósito de combustible.

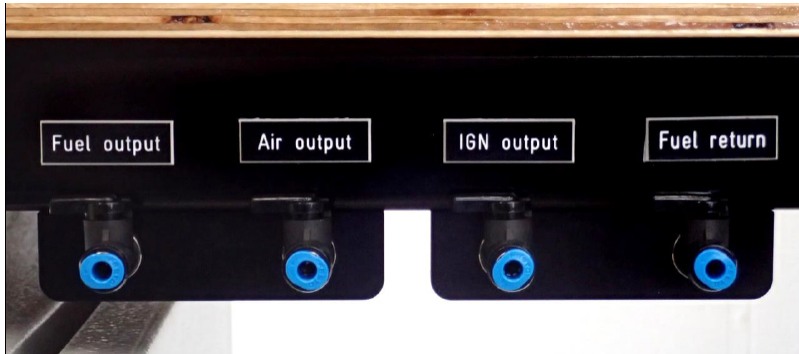


Figura 3.22: Conexiones aire/combustible del banco de ensayo

3.2.7. Lector del caudal de combustible

Este dispositivo nos muestra el flujo de combustible total en cm^3/min .



Figura 3.23: Lector del caudal de combustible

3.2.8. Caudalímetro

El caudalímetro es un dispositivo que es capaz de medir el flujo de combustible total. Este está situado debajo del banco de ensayo.

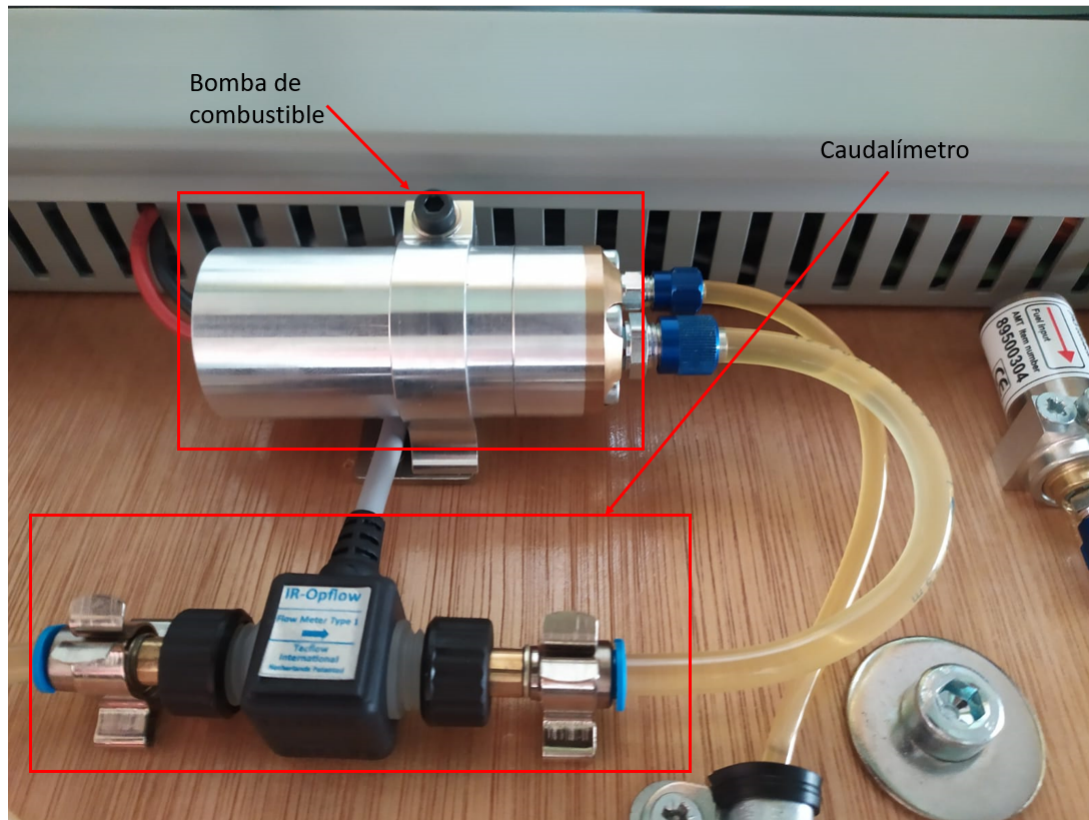


Figura 3.24: Localización del caudalímetro y de la bomba de combustible

Como se puede ver en la figura 2.24 el modelo de caudalímetro es **IR-Opflow turbine tipo 1**. A continuación, se presenta las especificaciones y las medidas del caudalímetro.

Rango medida (L/min)	0.1-2
Factor-K ^a (pulsos/L)	36000
Frecuencia	60-1200
Precisión	series $10 \pm 1\%$ del valor medido
Rango de temperatura	-40 a 85 °C
Presión máxima	10 bar
Viscosidad	15 mm ² /s
Material	Todas las partes mojadas están hechas de PVDF (Polifluoruro de vinilideno)

Tabla 4: Especificaciones del caudalímetro IR-Opflow tipo 1

^aEl factor-K es un coeficiente calculado al calibrar y comparar con otros dispositivos de medición que cumplen con los requisitos de precisión. El factor-K del medidor de flujo se confirmará antes de ponerlo en uso. Este coeficiente es un valor fijo. Es el coeficiente real obtenido por el fabricante del caudalímetro después de verificar cada instrumento.

Conector BSP o NPT tipo 1	A	D	d	L
Dimensiones en mm	9.5	1/4"	6.5	39

Tabla 5: Medidas del caudalímetro IR-Opflow tipo 1

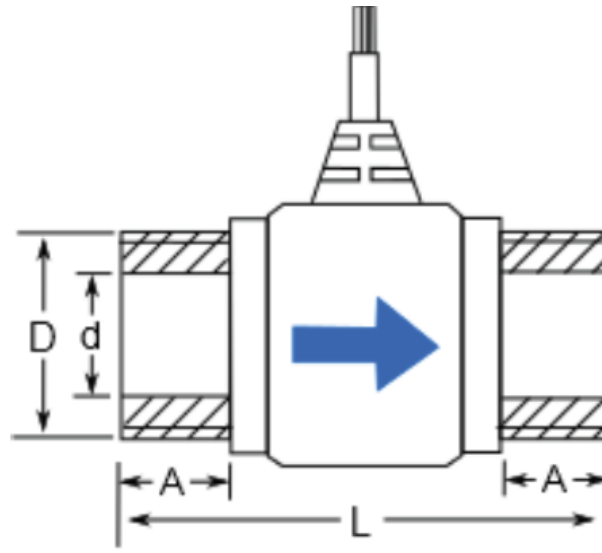


Figura 3.25: Dimensiones del caudalímetro IR-Opflow con conector BSP o NPT

3.2.9. Depósito de combustible

Este depósito tiene una capacidad de 20 litros. Dependiendo del grado de carga seleccionado, con esta capacidad, el motor es capaz de estar funcionando entre 20-30 minutos aproximadamente.



Figura 3.26: Depósito de combustible del banco de ensayo

3.2.10. Filtro de aire

El depósito de combustible contiene una ventilación de aire, que incluye un filtro de aire de 50 micras para evitar la contaminación del combustible.



Figura 3.27: Filtro de aire del depósito de combustible

3.2.11. Filtro de combustible

El depósito tiene un filtro de combustible de 200 micras. Este filtro es recomendable cambiarlo cada 200 litros de combustible.



Figura 3.28: Filtro de combustible del depósito

3.2.12. Sensores predeterminados instalados

El banco de ensayo viene con unos sensores predeterminados instalados estos son el sensor de rpm, temperatura de gases de escape y una célula de carga para poder medir el empuje. Además de estos, se han instalado unos sensores extras que se comentarán en la siguiente sección.

Sensor de temperatura de los gases de escape

El sensor de temperatura de los gases de escape o EGT está situado en la zona media de la tobera como se puede ver en la figura 2.29. El sensor de la EGT está fabricado con acero inoxidable y es un sensor tipo K de 1.5 mm.

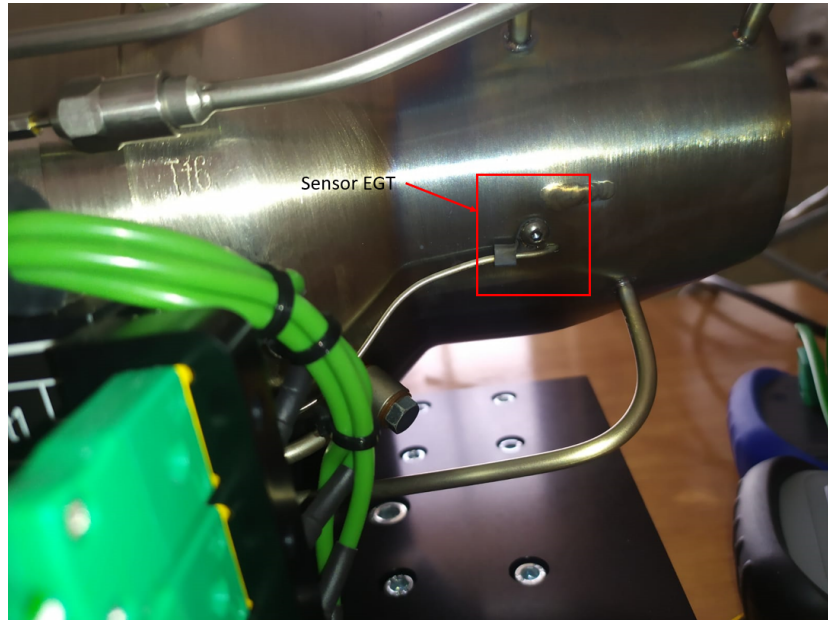


Figura 3.29: Localización del sensor EGT

Este cable continúa por detrás del panel de sensores instalados adicionalmente.

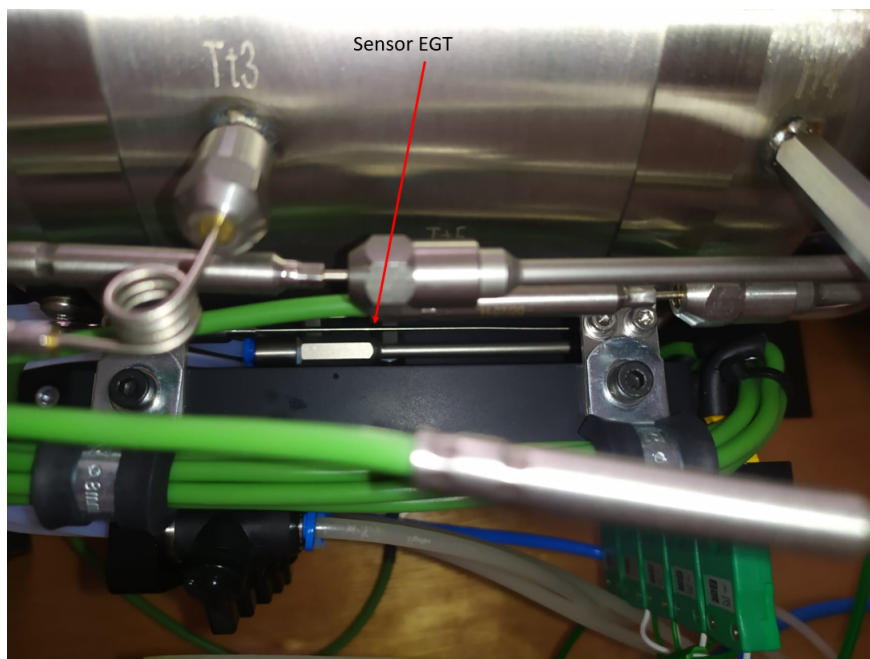


Figura 3.30: Camino seguido por el cable del sensor de la EGT

Por último este cable se conecta a la ECU, después se puede visualizar el valor de la temperatura de los gases de escape en el EDT.

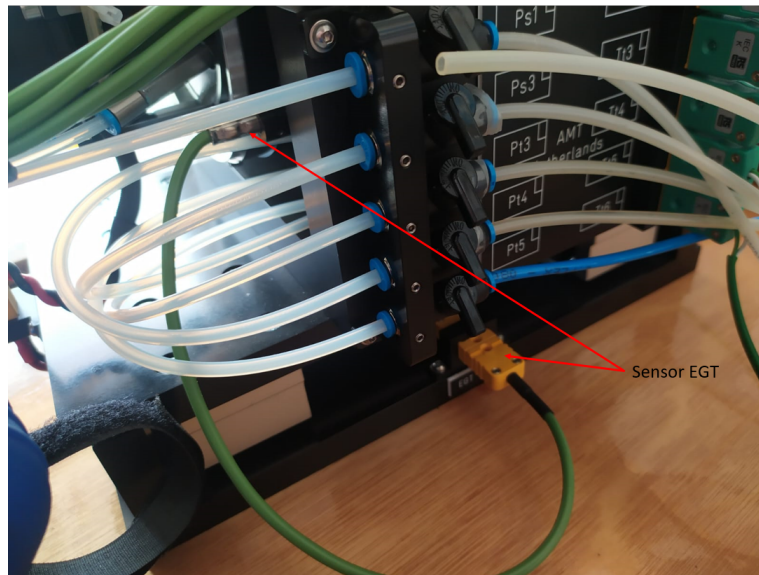


Figura 3.31: Lugar donde se conecta el sensor EGT

Célula de carga

Para poder medir el empuje que produce el motor es necesario contar con una célula de carga. Una célula de carga es un transductor que convierte la fuerza aplicada sobre ella en una señal eléctrica medible. Estos medidores están unidos a un elemento estructural que se deforma cuando se le aplica una fuerza. En la mayoría de los casos, se utilizan cuatro medidores de deformación para obtener la máxima sensibilidad y compensación de temperatura. Cuando se le aplica una fuerza, la tensión cambia la resistencia eléctrica de los medidores en proporción a la carga. En la figura 2.34 se puede ver la localización de la misma.

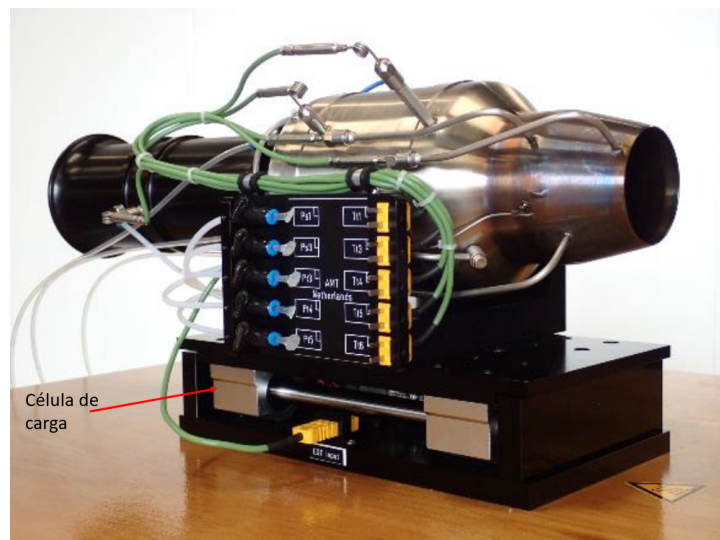


Figura 3.32: Localización de la célula de carga en el banco de ensayo

Sensor de velocidad angular

Este tipo de sensor es un sensor inductivo. Durante la operación de trabajo, debido al efecto inductivo, la bobina del sensor produce el voltaje oscilante. Esto es una señal de tipo sinusoidal.

Cuando los álabes del compresor pasan cerca del pin polar del sensor, el campo magnético que rodea la bobina cambia. Como resultado de los cambios en el campo magnético, se induce un voltaje en la bobina, que es proporcional a la fuerza y velocidad de cambio del campo magnético. En la figura 2.33 se muestra la localización del sensor.

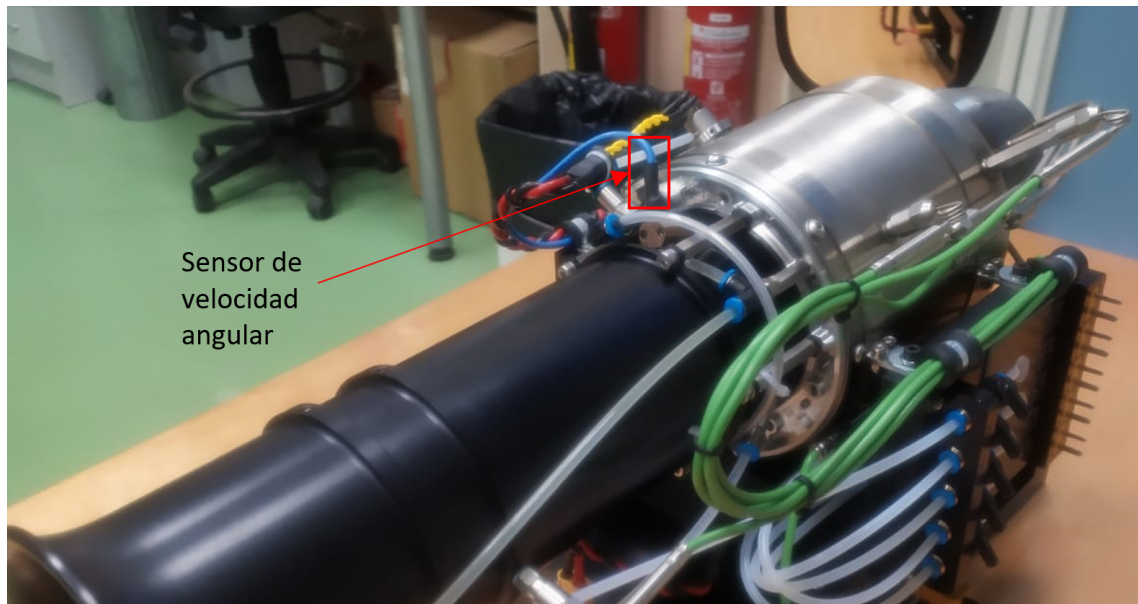


Figura 3.33: localización del sensor rpm

3.2.13. Sensores adicionales instalados

Este modelo además de tener instalado el sensor de rpm y de temperatura de los gases de escape, tiene instalados unos sensores extras de presión y temperatura. Estos sensores se pueden ver en la figura 3.34. Estos sensores son los siguientes:

Sensores de temperatura

- Tt1: Temperatura a la entrada del compresor. El conector está fabricado en acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt3: Temperatura a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt4: Temperatura a la entrada de la turbina o salida de la cámara de combustión. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor está hecho con una aleación de níquel y cromo también llamadas aleaciones de inconel. Estas aleaciones se suelen usar en aplicaciones de altas temperaturas. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.

- Tt5: Temperatura a la entrada de tobera o salida de la turbina. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt6: Temperatura a la salida de la tobera. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.

Sensores de presión

- Ps1: Presión estática a la entrada del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Ps3: Presión estática a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Pt3: Presión total a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Pt4: Presión total a la entrada a la turbina o de la cámara de combustión. El conector está hecho de acero inoxidable y el tubo dentro del motor está hecho de la aleación de iniconel.
- Pt5: Presión total a la entrada de la tobera o salida de la turbina. El conector está hecho de acero inoxidable y el tubo dentro del motor está hecho de la aleación de iniconel.

Para obtener la lectura de los sensores, el banco cuenta con un panel donde se puede conectar el sensor tipo K de temperatura a un termómetro para poder leer la medida. A este panel también se le puede conectar un manómetro para obtener la presión de los distintos puntos.

Las salidas de los sensores de presión del panel se han conectado todas a un dispositivo, este dispositivo tiene una salida donde se conecta al manómetro, de esta forma solo se puede medir la presión de los distintos puntos de uno en uno. Este se puede ver en la figura 2.34.

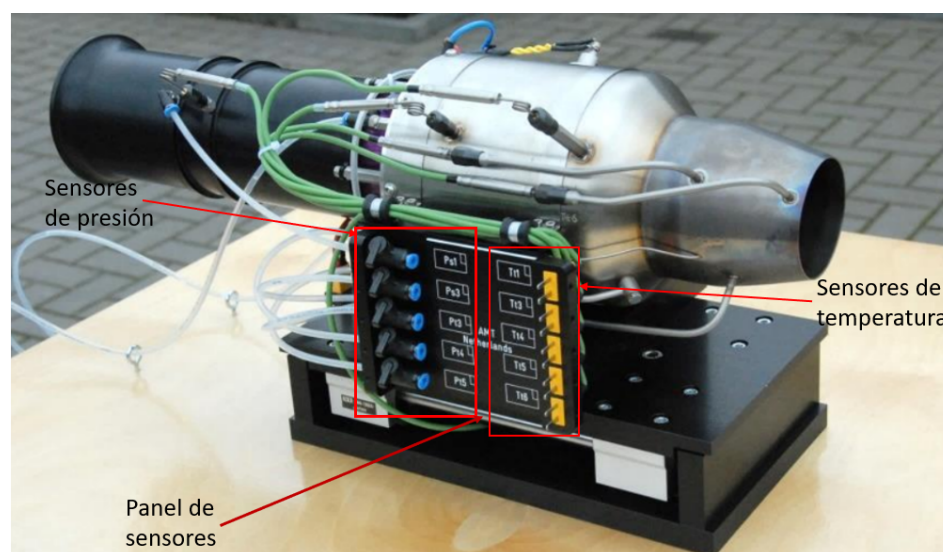


Figura 3.34: Panel de sensores instalado en el banco de ensayo

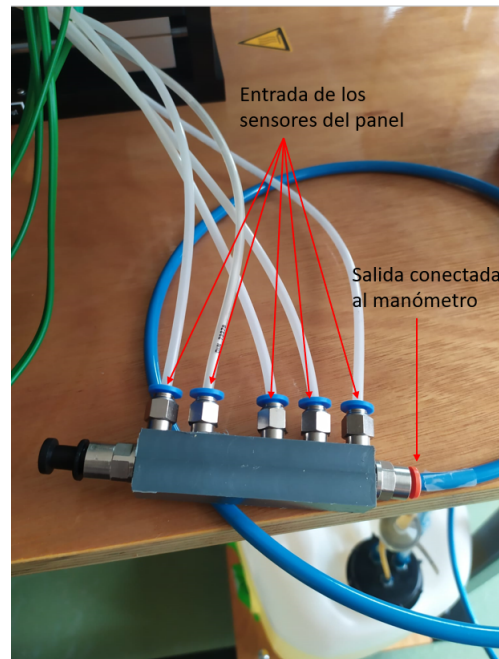


Figura 3.35: Dispositivo para conectar todas las salidas de presión del panel al manómetro

3.3. Descripción del termómetro TEPCEL 305 y 307

Los termómetros utilizados son *TEPCEL 305* y el *TEPCEL 307*. El modelo 305 tiene una única entrada de termopar mientras que el modelo 307 tiene dos entradas de termopar. Estos termómetros tienen un rango de medida de entre -50°C hasta 1300°C . También se puede medir la temperatura en Fahrenheit por lo que el rango de medida será en este caso de -58°C hasta 2000°C . La resolución de este dispositivo es de $0.1^{\circ}/1.0^{\circ}$. El rango operativo de temperatura ambiental para su uso es de 0°C a 50°C .



Figura 3.36: Termómetro TEPCEL 305

La exactitud del dispositivo para una temperatura ambiente de entre 18°C hasta 28°C es:

- -50°C a $1000^{\circ}\text{C} \rightarrow \pm(0.3\% \text{ rdg} + 1^{\circ}\text{C})$
- -1000°C a $1300^{\circ}\text{C} \rightarrow \pm(0.5\% \text{ rdg} + 1^{\circ}\text{C})$

3.4. Descripción del termómetro Kane-May KM330

El termómetro industrial *Kane KM330* es un termómetro con un sensor Tipo K con una temperatura máxima de medición de 1300°C . Incorpora una función de memoria de temperatura máxima. Tiene un rango de temperaturas de -50°C hasta 1300°C , una resolución seleccionable de $0.1^{\circ}/1^{\circ}\text{C}$ y una exactitud de $\pm 0.2\%$ de la lectura $\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.37: Termómetro Kane-May KM330

3.5. Descripción del manómetro AIRFLOW DM3

Este es un manómetro de la empresa *AIRFLOW* modelo DM 3. Este manómetro permite determinar la presión positiva o negativa o la diferencia de presión. También es capaz de determinar el caudal volumétrico. Este manómetro está totalmente controlado por un microprocesador y con memoria de valor máximo y mínimo.



Figura 3.38: Manómetro Airflow DM 3

El rango de medición de este dispositivo es de 0 a 2 bar, tiene una exactitud de 0.5 % del rango de medición a 22 °C. La pantalla tiene un rango de 4 dígitos para la presión y 3 dígitos para el flujo.

3.6. Descripción del manómetro CHAUVIN ARNOUX

El manómetro digital utilizado es un manómetro fabricado por *CHAUVIN ARNOUX* en concreto es el modelo C.A 850. Este manómetro está diseñado para medir niveles de presión de aire acondicionado, equipos médicos y sistemas de control neumático. Las unidades de presión capaz de medir el dispositivo son: bar, mmHg, ozin², kg/cm², inH₂O, kPa, ftH₂O, inHg, cmh₂O, mbar. El dispositivo es capaz de medir presiones relativas y diferenciales con un rango de medición de 0 a 6.99 bar, es capaz de aguantar una presión máxima de 10.33 bar. Tiene una precisión de 0.3 % una resolución de 0.004 bar. Este manómetro tiene unas condiciones de uso para un rango de temperaturas de 0 a 50°C y una humedad relativa menor a 80 %.



Figura 3.39: Manómetro C.A 850

3.7. Analizador de gases de combustión: Testo 350

Para analizar los gases de combustión del motor se ha utilizado el analizador de gases *Testo 350*. Este aparato está compuesto por una unidad de control para mostrar los valores medidos y control de la caja analizadora y una sonda analizadora el sirve para obtener la medida de las emisiones de los gases de combustión.



Figura 3.40: Analizador de humos Testo 350

Los principales usos de este aparato son:

- Mediciones en turbina de gas y motores estacionarios industriales.
- Control de emisiones y comprobación del cumplimiento de valores normativos de emisión.
- Servicio y ajuste de incineradoras industriales.
- Servicio / puesta en marcha de quemadores y calderas industriales.

3.7.1. Unidad de control

Con este elemento se puede controlar la caja analizadora y seleccionar las distintas opciones de medida.



Figura 3.41: Unidad de control del Testo 350

1. Interfaz IrDa,
2. Botón de apagado / encendido.
3. Sujeción magnética (lado trasero)
4. Pantalla.
5. Teclado.
6. Regleta de contactos para conexión a la caja analizadora (lado trasero)
7. Interfaces: USB 2.0, cargador, bus de datos Testo.

Pantalla

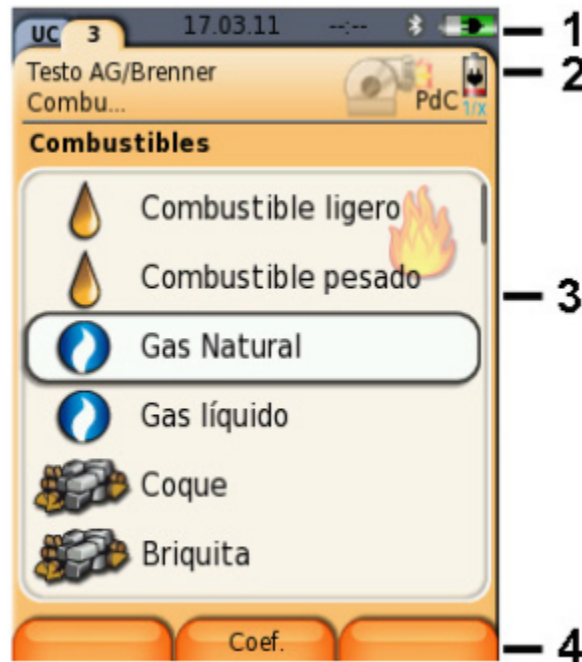


Figura 3.42: Pantalla de la unidad de control

1. Barra de estado
 - Mostrar fecha y hora.
 - Mostrar estado Bluetooth, alimentación de corriente y batería restante para la unidad de control.
2. Barra de pestañas y campo de información de las pestañas:
 - Barra de pestañas: Muestra los componentes del sistema de medida. Mediante la barra de pestalas se puede acceder a los distintos componentes.
 - Campo de información de la pestaña: Indicación de la carpeta/situación de medición seleccionada, combustible elegido, aplicación elegida, estado de alimentación de corriente y batería restante, factor de dilución ajustado.
3. Campo para seleccionar funciones (la función elegida se destaca en blanco, las funciones que no se pueden seleccionar aparecen en gris) o para mostrar valores medidos.
4. Indicación de funciones de las teclas de función.

Conexiones

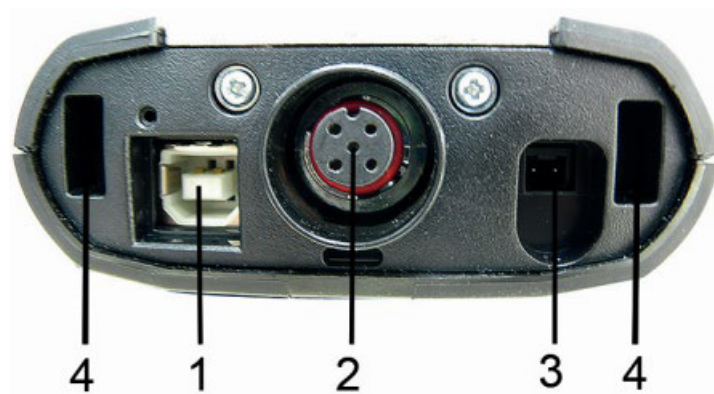


Figura 3.43: Conexiones de la unidad de control

1. USB 2.0
2. Bus de datos Testo.
3. Terminal para fuente 0554 1096.
4. Ranura para acoplar con la caja analizadora.

3.7.2. Caja analizadora

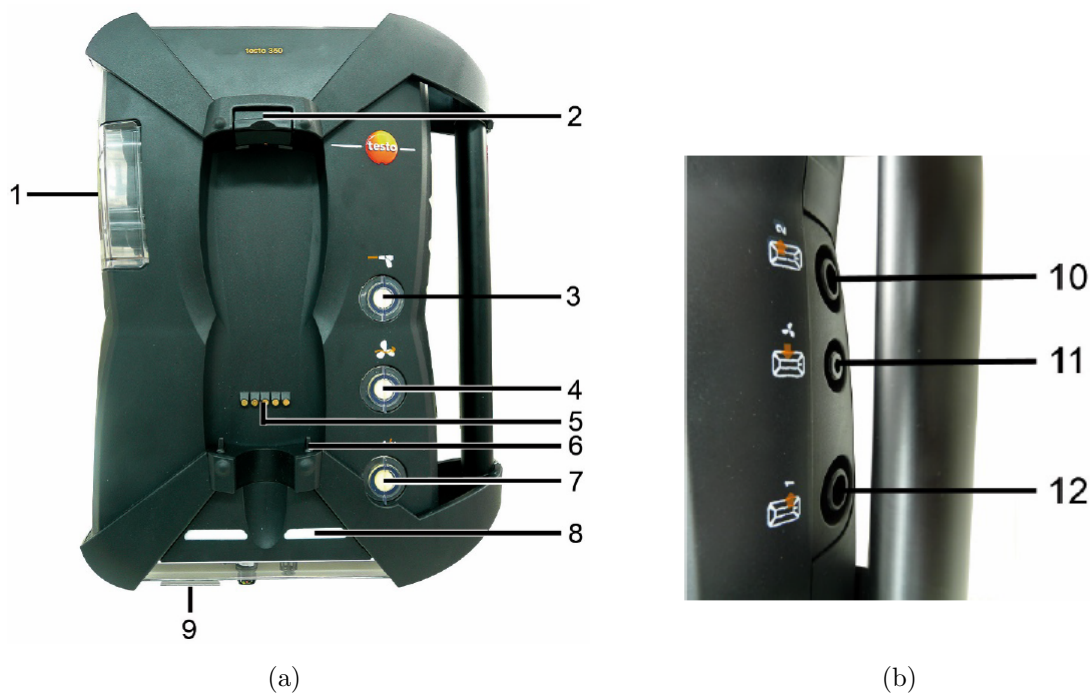


Figura 3.44: Caja analizadora del Testo 350

1. Trampa de condensados y recipiente de condensados.
2. Botón de desbloqueo/bloqueo de la unidad de control.
3. Filtro de partículas gas de medición.
4. Filtro entrada aire del exterior.
5. Regleta de contactos para conexión a la unidad de control.
6. Espiga para acoplarla con la unidad de control.
7. Filtro de aire de dilución.
8. Indicador de estado.
9. Pestaña de vista completa para rotulación/identificación.
10. Salida de gases 1.
11. Entrada de aire exterior.
12. Salida de gases 2.

Conexiones

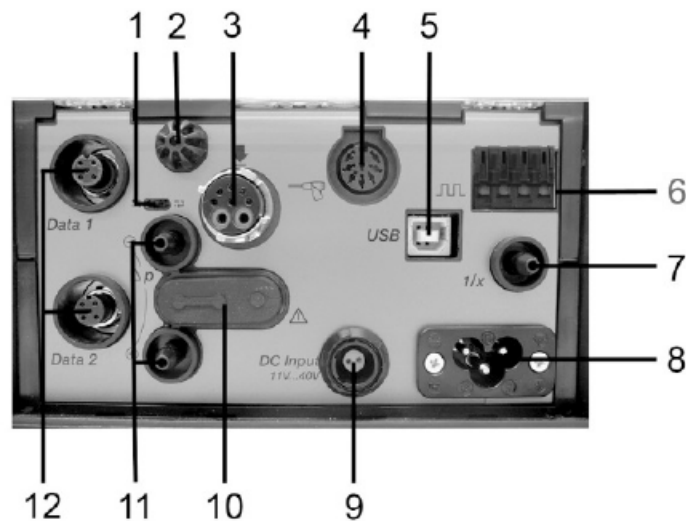


Figura 3.45: Conexiones de la caja analizadora

1. Interruptor deslizante terminador bus de datos.
2. Palpador de temperatura del aire de combustión (TA).
3. Sonda de gases de combustión.
4. Entrada palpador.

5. USB 2.0
6. Entrada trigger.
7. Entrada de aire de dilución para ampliación del rango de medición.
8. Conexión red 100...240 V AC, 50-60 Hz.
9. Entrada corriente continua 11...40 V CC.
10. Tapa acceso línea de gas (solo para reparaciones).
11. Conexiones de presión p+ y p-
12. Bus de datos Testo.

3.7.3. Sonda modular de gases de combustión

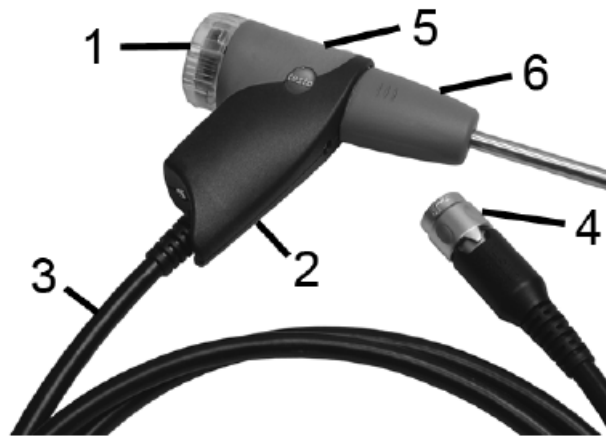


Figura 3.46: Sonda modular para medir las emisiones de los gases de combustión

1. Cámara filtrante extraíble con mirilla, filtro de partículas.
2. Mango de la sonda.
3. Línea de conexión.
4. Enchufe de conexión al aparato de medición.
5. Desbloqueo módulo de sonda.
6. Módulo de sonda.

3.8. Bomba calorimétrica

Para el cálculo del poder calorífico superior se ha utilizado una bomba calorimétrica de la empresa *Parr* modelo 6050.



Figura 3.47: Bomba calorimétrica Parr 6050

Los elementos principales de la bomba calorimétrica Parr 6050 son los siguientes:

Elemento	Descripción
1110	Recipiente de combustión de oxígeno
A1559DD	Cubeta
A570DD	Bloque regulador, oxígeno
A1278DD	Solenoides de oxígeno
1940E	Fuente de alimentación
897E	Condensador, 40 V, 81000 μ F
538VB	Conector macho 1/8 NPTM-T-BT Nylon
139E23	Fusible, acción rápida 15 Amp 250 VAC
A2140E	Panel, E/S
1417E3	Cubo de termisor
A1564DD	Cable principal de encendido
1416E	Chaqueta termisor
A1268DD	Conjunto del motor agitador
A1560DD	Cable, USB

Tabla 6: Elementos de la bomba calorimétrica Parr 6050.

A continuación se explicará más detenidamente los principales elementos de la bomba calorimétrica.

3.8.1. Recipiente de combustión de oxígeno (1110)

En este recipiente es donde se produce la combustión del combustible ensayado, por ello este recipiente es capaz de soportar grandes presiones y grandes variaciones de temperatura.

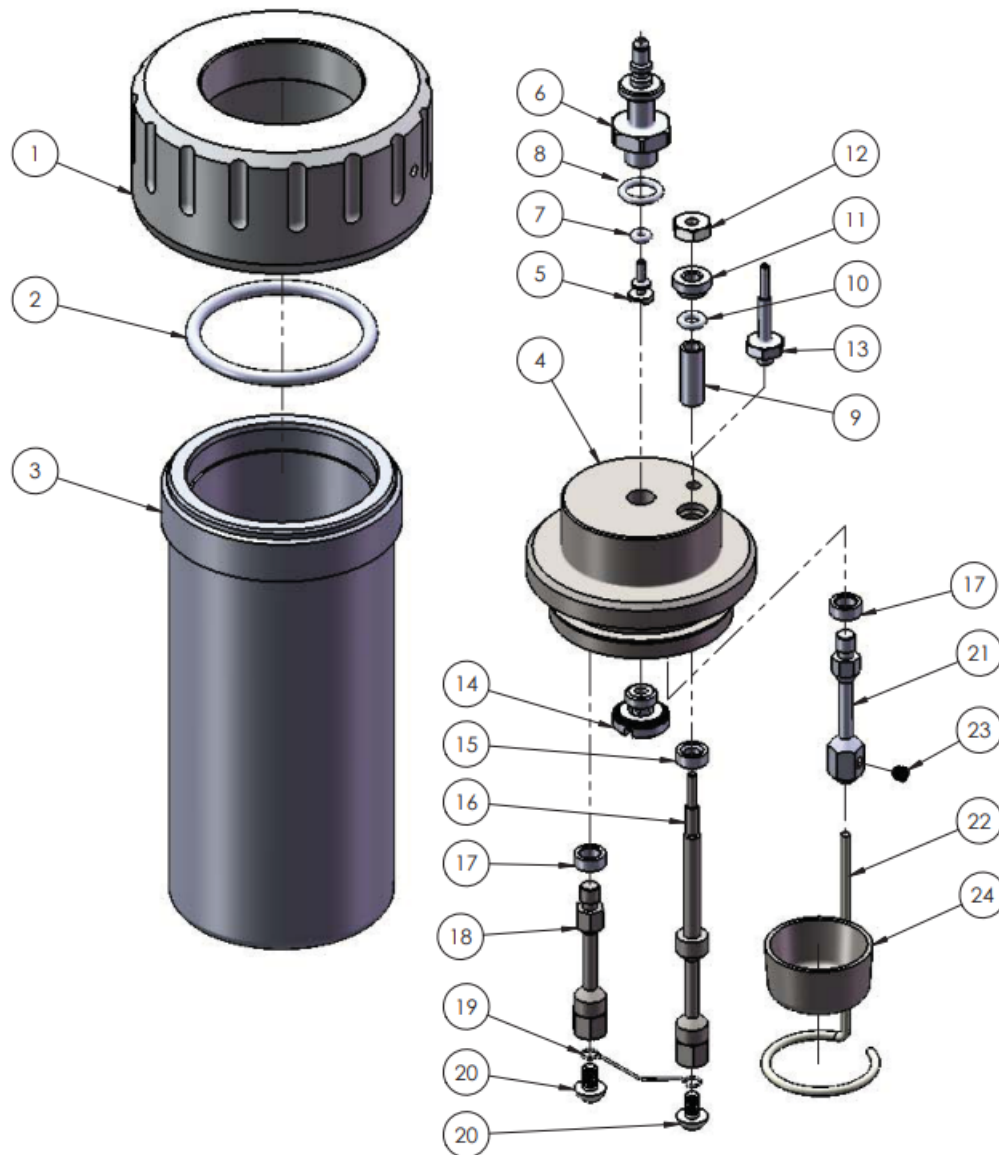


Figura 3.48: Desglose del recipiente de combustión de oxígeno (1110)

Número	Elemento	Descripción
1	1526DD	Tapón de rosca
2	1444DDJB	Junta tórica
3	1524DD 1524DDCC 1524DDCL	Cilindro, T316 Cilindro, C20 Cilindro, G-30 servicio de cloro
4	1525DD 1525DDCC 1525DDCL	Cabezal, recipiente T316 Cabezal, recipiente C20 Cabezal, recipiente, G-30 servicio de cloro
5	1528DD	Pasador, válvula de retención
6	1527DD	Adaptador, tapa del recipiente
7	519AJV	Junta tórica
8	694DD	Junta tórica
9	658DD	Aislante
10	659DD	Junta tórica
11	663DD	Casquillo de contacto
12	SN1632HX	Tuerca hexagonal 8-32
13	1529DD	Electrodo de puesta a tierra
14	645DD	Difusor
15	654DD	Arandela de electrodo
16	1094DD2 1094DD2CH	Electrodo, largo Electrodo, largo (1110CL)
17	655DD	Electrodo, separador
18	1095DD 1095DDCH	Electrodo Electrodo (1110CL)
19	840DD2	Alambre térmico (2,0")
20	PA1332RD04	6-32 X 1/4 RHMS
21	1095DD3 1095DD3CH	Electrodo Electrodo (1110CL)
22	906DD2	Portacápsulas
23	PC1332SC02	6-32 X 1/8 SHSS
24	43AS	Cazoleta, acero inoxidable

3.8.2. Cubeta

En este elemento se introduce la cantidad específica de agua recomendada por el fabricante para realizar el ensayo, en este caso será 1 litro o un 1 kg.



Figura 3.49: Cubeta

Además en el interior se pueden observar tres partes principales de la misma, esto se puede ver en la figura 2.54.



Figura 3.50: Interior de la cubeta.

1. Protector del sensor encargado de realizar la toma de datos, el cual mide la temperatura del agua dentro de la cubeta.
2. Lugar donde se coloca el recipiente de combustión de oxígeno.
3. Orificios que se encargan de conectar el fluido con la bomba agitadora de agua.

3.8.3. Bloque regulador, oxígeno (A570DD)

Este elemento proporciona la presión necesaria en el recipiente de combustión de oxígeno (1110), donde el fabricante recomienda que sea de 3000 kPa.

3.8.4. Válvula de solenoide de oxígeno (A1278DD)

Esta válvula permite la entrada del oxígeno al recipiente de combustión de oxígeno (1110). Para ello cuando la bomba calorimétrica comienza con el proceso de ensayo del combustible, manda una señal eléctrica a la válvula, esta se abre y comienza a entrar el oxígeno. Cuando se llega a la presión adecuada, se deja de enviar la señal eléctrica a la válvula y se termina el proceso de suministrar oxígeno.

3.8.5. Conjunto de motor agitador (A1268DD)

Este elemento permite obtener una mayor precisión en la medición de la temperatura, cuando se produce se está produciendo la combustión del combustible. Para ello el motor es capaz de hacer recircular el agua que hay dentro de la cubeta cuando se está haciendo el ensayo del combustible.

3.8.6. Balanza analítica

Se ha utilizado la balanza analítica *BOECO BAS Plus*, que cuenta con una precisión de 0.0001 g. Esta balanza se ha utilizado para medir la cantidad de combustible que se va a analizar.

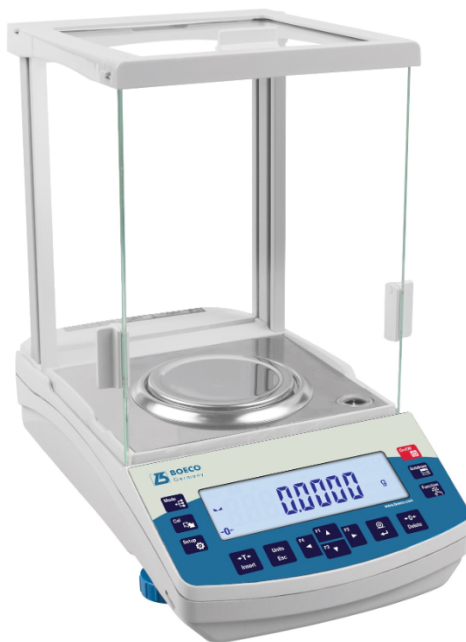


Figura 3.51: Balanza analítica BOECO BAS Plus

3.8.7. Balanza

Esta balanza se ha utilizado para medir la cantidad de agua que hay que suministrar a la cubeta para realizar el ensayo de manera adecuada, en nuestro caso como se comentó anteriormente es de

1 kg o 1 litro.



Figura 3.52: Balanza

4. Métodos

4.1. Procedimiento de cálculo

Primero se evalúa la tobera desde su salida (punto 5, 50) hasta la entrada (punto 4, 40), pudiendo obtener así su rendimiento. Después se analiza la máquina desde la entrada (punto H, H0, 10) hasta la salida del compresor (punto 20), que corresponde con la entrada de la cámara de combustión. La confluencia de los valores anteriores en el punto 3 se realiza a través de los balances en la cámara de combustión y en el generador de gas, obteniendo así los rendimientos tanto de la cámara de combustión como de la turbina. Ahora se explicará más detenidamente los procesos comentados anteriormente.

4.1.1. Evaluación de la tobera a la salida

La geometría de la tobera es un conducto recto al principio, que se estrecha a partir de la mitad de su longitud hasta la salida. Dentro de ella hay un elemento que estrecha el paso del flujo, esto se hace para estabilizar el flujo y evitar el desprendimiento de la capa límite a la salida del flujo de la turbina. En la figura se presenta de forma aproximada la situación del sensor de temperatura.

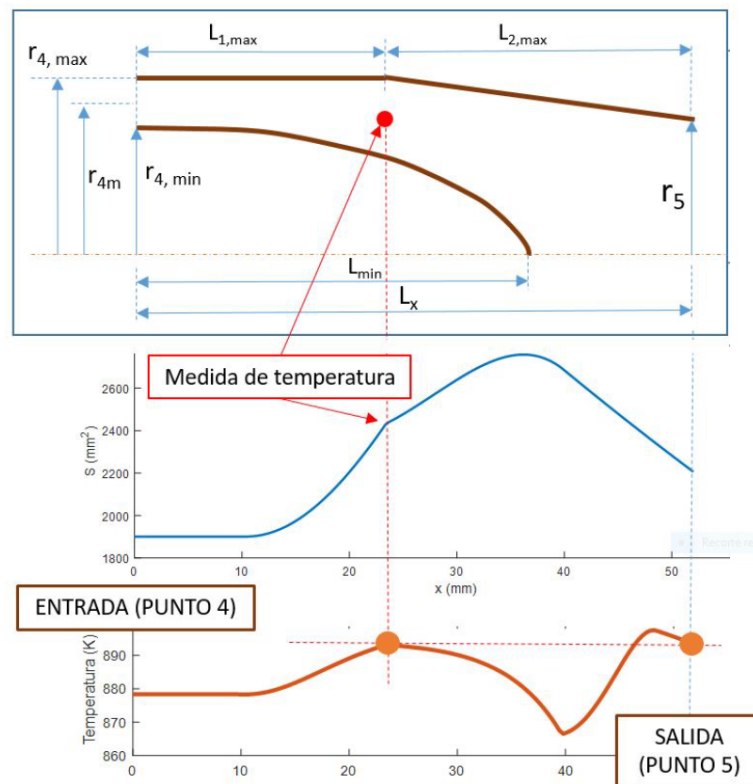


Figura 4.1: Localización del sensor de temperatura

Se ha realizado un procedimiento de análisis (conservación de masa, energía y cantidad de movimiento) por diferencias finitas en flujo unidimensional estable para algunas condiciones como son, tobera adiabática, y se ha evidenciado que la temperatura estática en dicho punto de medida es muy similar a la de la salida de la tobera. En cualquier caso, la temperatura a lo largo de la tobera

se mantiene, despreciando las pérdidas de calor ($T_{40} = T_{50}$).

Si solo se mide la temperatura de salida EGT, esta se establece como T_{40} y la tobera se considera adiabática. En este caso la temperatura T_{50} se corresponde con la que mide el sensor inmerso en el cuerpo de la tobera. Por otra parte, si se midiera la temperatura T_{50} a la salida de la tobera, al disponer de dos datos puede suceder lo siguiente:

1. Si ambas temperaturas son muy próximas, se desecha una de ellas y la tobera se considerará adiabática con la misma temperatura de remanso a lo largo de toda su longitud ($T_{40} = T_{50} = T_{40,m}$).
2. Si la diferencia es considerable, entre ambos puntos de medida habrá pérdidas de calor que pueden valorarse y la tobera dejará de ser adiabática. En este caso, hay que reajustar los valores de T_{40} y T_{50} respecto a las medidas. Las pérdidas de calor entre los dos puntos de medida ($\Delta q_m = h_{40,m} - h_{50,m}$) están asociados a la fracción de superficie exterior de la tobera en contacto con el ambiente, entre ambos puntos dS_{4-5} . Antes del punto de medida 40_m , habrá una sección dS_{4-4m} , y tras 50_m , otra $dS_{5m,5}$. Así, el reajuste se hace de forma lineal de la siguiente forma:

$$T_{40} = T_{40m} + (T_{40m} - T_{50m} \cdot [dS_{4-4m}/dS_{4m-5}]) \quad (11.1)$$

$$T_{50} = T_{50m} - (T_{40m} - T_{50m} \cdot [dS_{5m-5}/dS_{4m-5}]) \quad (11.2)$$

Por tanto, se demuestra que a la salida de la tobera se conoce t_{50} y $p_5 = p_h$ (también se ha comprobado que el flujo es subsónico y que la tobera está acoplada). Al estar acoplada la tobera al ambiente, con velocidad de vuelo $u = 0$, a partir de las expresiones para el empuje (obtenido del banco de ensayo), flujo másico de gases m_g y entalpía total, se deduce la temperatura estática T_5 y h_5 y la velocidad de salida de los gases de la tobera c_5 .

$$E = m_g \cdot c_5 \quad (11.3)$$

$$m_g = S_5 \cdot \rho_5 \cdot c_5 \quad (11.4)$$

$$h_{50} = h_5 + \frac{c_5^2}{2} = c_p \cdot T_{50} \quad (11.5)$$

Conocida c_5 se deduce m_g con la expresión (11.4). También se conoce el caudal volumétrico de combustible V_c , con lo que se determina su flujo másico m_c .

Aquí hay que hacer una aclaración, ya que la cantidad de combustible que mide el caudalímetro es la total. Del total del combustible una parte del él se usa para producir la combustión y otra para la lubricación del eje. Por lo que el flujo de combustible usado en las ecuaciones descritas anteriormente no es el medido con el caudalímetro sino una fracción del mismo. Según la empresa esto es, 80 % del combustible para la combustión y el 20 % para la lubricación del eje.

Una vez hecha esta aclaración, conocido el flujo de aire m_a y el dosado F:

$$m_c = V_c \cdot \rho_c \quad (11.6)$$

$$m_a = m_g - m_c = \frac{m_c}{F} \quad (11.7)$$

Conocidas las condiciones estáticas del punto 5, presión, temperatura, velocidad, se podrá evaluar el resto de propiedades de remanso (50):

$$p_5^{1-\gamma} \cdot T_5^\gamma = p_{50}^{1-\gamma} \cdot T_{50}^\gamma \quad (11.8)$$

$$h_{50} = h_5 + \frac{c_5^2}{2} \quad (11.9)$$

4.1.2. Evaluación de la compresión

Conocidas las condiciones ambientales, $p_H = P_{H0}$ y $T_H = T_{H0}$, se puede deducir la entalpía $h_{H0} = h_{10}$. En esta primera fase de estudio se asigna el mismo valor 10 que H y H0, posteriormente se identifican estos puntos de manera más precisa al diagnosticar el compresor.

Conocida la sección de entrada S_1 se puede determinar la presión p_1 para el punto 1. Desde el punto 10, se evalúa T_1 a través de la ecuaciones de la adiabáticas obteniéndose así el resto de propiedades incluidas c_1 . De forma que el flujo de aire que resulte sea el de la ecuación (11.7). Esto se realiza mediante un proceso iterativo conocido el flujo de aire, sección y las expresiones de las adiabáticas:

$$p_{10} \cdot v_{10}^\gamma = p_1 \cdot v_1^\gamma \quad (11.10)$$

$$h_{10} = h_1 + \frac{c_1^2}{2} \quad (11.11)$$

$$m_a = S_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \quad \text{donde} \quad \rho_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} \quad (11.12)$$

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad (11.13)$$

Desde el punto 10, se llega a determinar las condiciones del punto 20. Conociendo la relación de compresión total del compresor ($r_c = p_{20}/p_{10}$), se establece la entalpía de salida ideal h_{20s} , a partir de la ecuación de las adiabáticas ($p \cdot v^\gamma = cte$) y las del punto 10. Por último se utiliza la expresión del rendimiento isoentrópico.

$$p_{10} \cdot v_{10}^\gamma = p_{20} \cdot v_{20s}^\gamma \quad (11.14)$$

$$\eta_c = \frac{h_{20s} - h_{10}}{h_{20} - h_{10}} \quad (11.15)$$

Al igual que para el punto 1, se puede utilizar un proceso iterativo para identificar las condiciones estáticas del punto 2, conocida la sección de salida del compresor S_2 . Para utilizar este procedimiento es necesario conocer previamente el rendimiento del compresor (η_c) y la relación de compresión total (r_c) que se deducen de las curvas características del compresor.

También se puede realizar el proceso inverso, conociendo la presión y la temperatura total, siempre y cuando se tengan sensores para llevar a cabo las medidas. Para este caso se conocen la p_{20} y T_{20} , conocidos estos datos se puede establecer primero la relación de compresión r_c . Sabemos que $p_{20s} = p_{20}$, por lo que se pueden calcular condiciones de salida ideales y el rendimiento del compresor η_c a partir de la ecuación (11.15). El proceso en este caso es el siguiente:

1. Conocida p_2 y T_2 se calcula ρ_2 y se deduce la velocidad c_2 de la ecuación $m_a = S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2$
2. Para calcular las condiciones totales 20 se usa la expresión $h_{20} = h_2 + c_2^2/2$ y la ecuación de las adiabáticas entre 2 y 20.

Los términos r_c y η_c serán entonces resultados de la estimación. Igual que para el punto 1 se usa un proceso iterativo para obtener p_2 obteniendo así las condiciones estáticas del punto 2, conocida su sección de salida S_2 :

$$p_{20} \cdot v_{20}^\gamma = p_2 \cdot v_2^\gamma \quad (11.16)$$

$$h_{20} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} \quad (11.17)$$

$$m_a = S_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \quad \text{donde} \quad \rho_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} \quad (11.18)$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 \quad (11.19)$$

4.1.3. Evaluación salida de cámara de combustión

El balance energético en la cámara de combustión resulta en la entalpía de remanso a la entrada de la turbina (salida de la cámara de combustión) para el punto 30:

$$h_{20} - h_{10} = (1 + F) \cdot (h_{30} - h_{40}) \cdot \eta_m \quad (11.20)$$

Si no se conoce la temperatura en 30, se toma como conocido el dato el rendimiento mecánico (η_m) y de la ecuación (11.20) se obtiene h_{30} y con ello la temperatura T_{30} . Por el contrario, si se permite medir T_{30} (el cual es nuestro caso) se puede obtener h_{30} y con ello el rendimiento mecánico (η_m).

Paralelamente si no se conoce p_{30} se puede estimar a partir de la expresión $p_{30} = p_{20} \cdot (1 - \epsilon)$, donde ϵ es la pérdida de carga en la cámara de combustión. Si se puede obtener p_{30} a partir de una medida experimental, entonces se puede calcular la pérdida de carga (ϵ) en la cámara de combustión. Al igual que ocurría con los puntos 1 y 2, se tiene que iterar para encontrar p_3 , identificando las condiciones estáticas del punto 3, conocida la sección de salida de la cámara de combustión S_3 :

$$p_{30} \cdot v_{30}^\gamma = p_3 \cdot v_3^\gamma \quad (11.21)$$

$$h_{30} = h_3 + \frac{c_3^2}{2} \quad (11.22)$$

$$m_g = S_3 \cdot \rho_3 \cdot c_3 \quad \text{donde} \quad \rho_3 = \frac{R \cdot T_3}{p_3} \quad (11.23)$$

$$h_3 = c_p \cdot T_3 \quad (11.24)$$

4.1.4. Evaluación a la entrada de la tobera

Considerando la tobera adiabática se sabe que la entalpía de remanso se mantiene a lo largo de aquella, por tanto se tiene que $h_{40} = h_{50}$. Aplicando la ecuación de conservación de la masa ($m_g = S_4 \cdot \rho_4 \cdot c_{4a}$), energía ($h_{40} = h_4 + c_4^2/2$) y de cantidad de movimiento, se pueden determinar las condiciones estáticas del punto 4, siempre que se conozca su presión:

$$(S_5 \cdot \rho_5 \cdot c_5^2 - S_4 \cdot \rho_4 \cdot c_{4a}^2) + (p_5 \cdot S_5 - p_4 \cdot S_4) + \sum \tau S_j - 0,5 \cdot (p_4 + p_5) \cdot (S_5 - S_4) = 0 \quad (11.25)$$

Un prime algoritmo considera los términos $\tau S_j = F_j \cdot \tau_j \cdot dS_j$ (N), como esfuerzo cortante del fluido con la pared “j”, evaluado como el producto de la superficie en contacto dS_j (m^2) y la pérdida de carga τ_j (N/m^2), que a su vez se establece a partir de la longitud L (m), densidad (ρ), velocidad c (m/s) y diámetro D (m) característicos y el coeficiente de pérdidas adimensional λ . Este último coeficiente se puede determinar a partir de la rugosidad absoluta del material k (m) y el número de Reynolds (Re). Para determinar el esfuerzo cortante se utilizan las siguientes expresiones:

$$\tau = \lambda \cdot (L/D) \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad (11.26)$$

$$1/\lambda^{1/2} = -2 \cdot \log_{10} \cdot [((k/D) \cdot 3,7) + (2,51/(Re \cdot \lambda^{1/2}))] \quad (\text{Fórmula de colebrook-White}) \quad (11.27)$$

$$Re = \frac{c \cdot D}{\nu} \quad (11.28)$$

$$\nu = \nu_0 + \nu_1 \cdot T + \nu_2 \cdot T^2 \quad (11.29)$$

El algoritmo sigue este procedimiento. Primero se establece una presión p_4 y de la fórmula (11.25) se deduce c_{4a} , que corresponde con la componente axial de la velocidad absoluta a la salida de la turbina. Como este valor es igual a la velocidad relativa de salida w_{4a} , se puede calcular la componente tangencial w_{4u} si es conocido el ángulo de salida relativo β_4 . Este término es conocido ya que se puede medir la geometría del rotor de la turbina y, en este caso, se le asigna un valor negativo a dicha componente por tanto se tiene que:

$$\operatorname{tg} \beta_4 = w_{4a}/|w_{4u}| \quad (11.30)$$

$$c_{4u} = u_4 - |w_{4u}| \quad (11.31)$$

$$u_4 = r_{4m} \cdot (2 \cdot \pi \cdot n/60) \quad (11.32)$$

$$c_4 = (c_{4a}^2 + c_{4u}^2)^{1/2} \quad (11.33)$$

Gracias a este proceso se puede obtener c_4 y a partir de la expresión $h_{40} = h_4 + c_4^2/2$, se puede determinar h_4 y de él T_4 y ρ_4 . Con estos datos se puede evaluar el flujo $m_g = S_4 \cdot \rho_4 \cdot c_{4a}$ y se comprueba si coincide con el calculado al inicio del procedimiento. Si no es así se modifica el valor de p_4 y se repite el proceso hasta que dicho flujo coincida con el real. Una vez terminado este

proceso se determinan las condiciones de remanso del punto 4 con la ecuación de la adiabática ($p_4 \cdot v_4^\gamma = p_{40} \cdot v_{40}^\gamma$) y $h_{40} = h_4 + c_4^2/2$, y se establece el rendimiento isoentrópico de la tobera con la ecuación,

$$\eta_{to} = \frac{h_{40} - h_5}{h_{40} - h_{5s}} \quad (11.34)$$

evaluando previamente las condiciones ideales a la salida (5s) a partir de la ecuación de las adiabáticas ($p_{40} \cdot v_{40}^\gamma = p_5 \cdot v_{5s}^\gamma$)

Se puede realizar un procedimiento alternativo iterando también sobre p_4 si se conoce la presión total a la salida de la turbina p_{40} . Para realizar este proceso es necesario colocar un sensor de presión en una zona de sección constante justo antes del inicio de la tobera. Este procedimiento es muy similar al anterior pero en este caso, dada p_4 se establece T_4 a través de la ecuación de la adiabática entre 4 y 40, conocidas p_{40} y T_{40} . A partir de ahí se calcula ρ_4 y de la expresión del flujo másico se deduce c_{4a} . Por otro lado, el esfuerzo cortante total ($\sum \tau S_j$) se despeja de la ecuación (11.25), sin necesidad de usar las expresiones (11.26-11.29). Teniendo en cuenta las expresiones (11.30 - 11.34) se determina los términos c_{4u} y c_4 . A continuación, usando la expresión $h_{40} = h_4 + c_4^2/2$ se calcula h_4 y de nuevo T_4 y con estos valores se podrá calcular la presión p_{40} a partir de la expresión de la adiabática.

Por último con estos datos calculados anteriormente se puede obtener el rendimiento isoentrópico de la turbina, calculando antes las condiciones de salida ideales (40s) a partir de la ecuación de las adiabáticas, $p_{30} \cdot v_{30}^\gamma = p_{40} \cdot v_{4s}^\gamma$

$$\eta_{TT} = \frac{h_{30} - h_{40}}{h_{30} - h_{40s}} \quad (11.35)$$

La ecuación (11.35) es el rendimiento total a total de la turbina, también se puede determinar el rendimiento estático η_{TE} . Para este caso es necesario conocer las condiciones estáticas ideales 4s para p_4 con la misma entropía que el punto 30 ($p_{30} \cdot v_{30}^\gamma = p_4 \cdot v_{4s}^\gamma$) :

$$\eta_{TE} = \frac{h_{30} - h_{40}}{h_{30} - h_{4s}} \quad (11.36)$$

El rendimiento térmico del ciclo η_t (observador móvil) coincide en este caso con el rendimiento del motor η_m (observador fijo), debido a que la velocidad de vuelo es $u = 0$. La expresión del rendimiento térmico será:

$$\eta_t = \frac{\Delta E_c}{Q_c} = \frac{(1 + F) \cdot 0,5 \cdot c_5^2}{F \cdot PCI} \quad (11.37)$$

4.2. Emisiones

En este apartado se explicará el método utilizado para obtener todos los parámetros necesarios para obtener las emisiones producidas por el motor.

La fracción másica del combustible se expresa como [c h o s n], para 1 Kmol de combustible se tiene $C_{ao}H_{bo}S_{do}N_{do}$ y pesa $a_oM_c + b_oM_H + c_oM_o + d_oM_s + e_oM_n$. En ese Kmol se tiene:

$$\frac{c}{M_c} \cdot M_{comb} \frac{Kmol\ c}{Kmol\ comb} = a_o$$

Por tanto se tiene:

$$a_0 = c \frac{M_c}{M_{comb}}; b_0 = h \frac{M_h}{M_{comb}}; c_0 = o \frac{M_o}{M_{comb}}; d_0 = s \frac{M_s}{M_{comb}}; e_o = n \frac{M_n}{M_{comb}}$$

Donde $M_c = 12$, $M_h = 1$, $M_o = 12$, $M_s = 32$, $M_n = 14$

Composición Aire:

$$\%O_2$$

$$\%N_2 \rightarrow K_n = \frac{\%N_2}{\%O_2}$$

$$\%W_2 \rightarrow K_w = \frac{\%w}{\%O_2}$$

$$\%CO_2 \rightarrow K_c = \frac{\%CO_2}{\%O_2}$$

$$\%Resto \rightarrow K_r = \frac{\%Resto}{\%O_2}$$

$$\begin{aligned} C_{ao}H_{bo}S_{do}N_{do} + O_xO_2 + O_xK_nN_2 + O_xK_cCO_2 + O_xK_r \cdot Resto + O_xK_w \cdot H_2O \rightarrow \\ \rightarrow b_1CO_2 + b_2CO + b_3HC + b_4C + b_5H_2 + b_6NO + b_7NO_2 + b_8SO_2 + O_xK_cCO_2 + O_xK_rResto + \\ + O_xK_wH_2O + b_9H_2O + b_{10}O_2 + b_{11}N_2 \end{aligned}$$

Donde $HC = C_bH_BO_C$ y $b_1 = a_1$; $b_2 = a_2$; $b_3 = a_3$; $b_4 = a_4$; $b_5 = a_5$; $b_6 = a_6$; $b_7 = a_7$; $b_8 = a_8$; $b_9 = a_9$

$$a_1C + a_1O_2 \rightarrow a_1CO_2$$

$$a_2C + a_2\frac{1}{2}O_2 \rightarrow a_2CO$$

$$a_4C \rightarrow a_4C$$

$$a_3[C + BH + CO] \rightarrow a_3[C_AH_BO_C]$$

$$a_5H_2 \rightarrow a_5H_2$$

$$a_6\frac{1}{2}N_2 + a_6\frac{1}{2}O_2 \rightarrow a_6NO$$

$$a_7\frac{1}{2}N_2 + a_7O_2 \rightarrow a_7NO_2$$

$$a_8S + a_8O_2 \rightarrow a_8SO_2$$

$$a_9H_2 + a_9\frac{1}{2}O_2 \rightarrow a_9H_2O$$

Aplicando un balance de masa en la reacción se obtiene:

$$(c) \ a_0 = b_1 + b_2 + b_3A + b_4$$

$$(H) \ b_0 = b_3B + 2b_5 + 2b_q$$

$$(O) \ c_0 + 2O_x = 2b_1 + b_2 + b_3C + b_6 + 2b_7 + 2b_8b_9 + 2b_{10}$$

$$(S) \ d_0 = b_8$$

$$(N) \ e_0 + 2O_xK_n = b_6 + b_7 + 3b_{11}$$

Entonces tenemos como incógnitas b_1 y O_x , en total tenemos 12, y conocemos $a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, A, B, C, K_n, K_c, K_r, K_w$

$$(HS) \ y_s = b_1 + b_2 + b_3 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x \cdot [k_c + K_r]; \ y_{H_2O} = b_q + O_x \cdot K_w$$

$$\begin{aligned}
\rightarrow vO_2 = \frac{b_{10}}{y_s} \rightarrow y_s \cdot vO_2 = b_{10} & \quad \rightarrow y_s \cdot vHC = b_3 & \quad \rightarrow vNO \cdot y_s = b_6 \\
\rightarrow vCO_2 \cdot y_s = b_1 + O_x \cdot K_c & \quad \rightarrow vH_2 \cdot y_s = b_5 & \quad \rightarrow vNO_2 \cdot y_s = b_7 \\
\rightarrow vCO \cdot y_s = b_2 & \quad \rightarrow vC \cdot y_s = b_4
\end{aligned}$$

Ecuaciones resultantes:

$$vO_2 = \frac{b_{10}}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vO_2 = b_{10} \quad (7.1)$$

$$vCO_2 = \frac{b_1 + O_x K_c}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vCO_2 = b_1 + O_x K_c \quad (7.2)$$

$$vCO = \frac{b_2}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vCO = b_2 \quad (7.3)$$

$$vHC = \frac{b_3}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vHC = b_3 \quad (7.4)$$

$$vH_2 = \frac{b_5}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vH_2 = b_5 \quad (7.5)$$

$$vC = \frac{b_4}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vC = b_4 \quad (7.6)$$

$$vNO = \frac{b_6}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vNO = b_6 \quad (7.7)$$

$$vNO_2 = \frac{b_7}{y_s} \rightarrow [b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_{10} + b_{11} + O_x[K_c + K_r]] \cdot vNO_2 = b_7 \quad (7.8)$$

$$(c) \rightarrow a_0 = b_1 + b_2 + b_3 A + b_4 \quad (7.9)$$

$$(H) \rightarrow b_0 = b_3 B + 2b_5 + 2b_9 \quad (7.10)$$

$$(O) \rightarrow c_0 + 2O_x = 2b_1 + b_2 + b_3 C + b_6 + 2b_7 + 2b_8 + b_9 + 2b_{10} \quad (7.11)$$

$$(S) \rightarrow d_0 = b_8 \quad (7.12)$$

$$(N) \rightarrow e_0 + 2O_x K_n = b_6 + b_7 + 2b_{11} \quad (7.13)$$

Tenemos 13 ecuaciones para 12 incógnitas, por lo cuál tenemos que eliminar una. Se podría eliminar la ecuación de HC o H_2 . Una vez que tenemos los resultados, sacamos el valor por unidad de masa de combustible.

$$\rightarrow y_j \frac{kmol_j}{kg \text{ comb}} = b_j \frac{kmol_j}{Kmol \text{ c}} \cdot \frac{1}{M_{comb}} \cdot \frac{kmol \text{ c}}{kg \text{ comb}}$$

$$\text{así } y_{CO_2} = \frac{b_1 + O_x K_c}{M_{comb}}; y_{CO} = \frac{b_2}{M_{comb}}; y_{HC} = \frac{b_3}{M_{comb}}; y_c = \frac{b_4}{M_{comb}}; y_{H_2} = \frac{b_5}{M_{comb}}; y_{NO} = \frac{b_6}{M_{comb}};$$

$$y_{NO_2} = \frac{b_7}{M_{comb}}; y_{SO_2} = \frac{b_8}{M_{comb}}; y_{O_2} = \frac{b_{10}}{M_{comb}}; y_{N_2} = \frac{b_{11}}{M_{comb}}; y_{H_2O} = \frac{b_5 + O_x K_w}{M_{comb}}; y_{resto} = \frac{O_x K_r}{M_{comb}};$$

$$y_s = y_{CO_2} + y_{CO} + y_{HC} + y_c + y_{N_2} + y_{NO} + y_{NO_2} + y_{SO_2} + y_{O_2} + y_{N_2} + y_{resto}^{\Delta}$$

Donde $y_{CO_2} = y_{CO_2} + y_{CO_2}^{\Delta}$. También se tiene que $y_H = y_s + y_{H_2O} = y_s + y_{H_2O}^c + y_{H_2O}^{\Delta}$

Para cada uno de ellos, tendremos: $m_j \frac{kg_j}{kg_{comb}} = y_j \cdot M_j$

$$\rightarrow m_{0,in} = O_x \frac{kmol O_2}{kmol comb} \cdot \frac{1}{M_{comb}} \frac{kmol comb}{kg comb} \cdot M_{O_2} \frac{kg O_2}{kmol O_2} = O_x \frac{M_{O_2}}{M_{comb}} \frac{kg O_2}{kg comb}$$

Por tanto la masa de aire que entra será:

$$m_{aire,in} = m_{o,in} \cdot K_0 \quad \text{con} \quad K_0 = \frac{M_{aire} \frac{kg aire}{kmol aire}}{y_{O_2} \frac{kmol O_2}{kmol aire} \cdot M_{O_2} \frac{kg O_2}{kmol O_2}} = \Delta K_0 = \frac{M_{aire}}{y_{O_2} \cdot M_{O_2}} \left[\frac{kg aire}{kg O_2} \right]$$

Para el cálculo del dosado se procede de la siguiente manera:

$$F = O_x \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{comb}} \cdot \frac{M_{aire}}{y_{O_2} \cdot M_{O_2}}$$

Para el cálculo del coeficiente de exceso de aire primero se calculará el aire mínimo:

$$m_{o,in,minimo} = c \cdot \frac{M_{O_2}}{M_c} + h \cdot \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} + s \cdot \frac{M_{O_2}}{M_s}$$

Una vez que tenemos el aire mínimo se calcula el coeficiente de exceso de aire:

$$\lambda_{real} = \frac{m_{aire,in}}{m_{aire,min}} = \frac{m_{o,in} \cdot K_0}{m_{o,in,min} \cdot K_0} = \frac{m_{o,in}}{m_{o,in,min}}$$

Sin embargo, como la masa de aire real ($m_{a,real}$) de la turbina calculada en el ciclo hay que reajustar valores.

$$m_{air,in,real} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \rightarrow m_{o,in,real} = \frac{m_{air,real}}{K_0} \begin{cases} m_{N_2,real} = m_{o,in,real} \cdot k'_n \\ m_{CO_2,real} = m_{o,in,real} \cdot k'_c \\ m_{w_2,real} = m_{o,in,real} \cdot k'_w \\ m_{resto,real} = m_{o,in,real} \cdot k'_{resto} \end{cases}$$

$$y_{resto}^{A_{real}} = \frac{M_{resto,real}}{M_{resto}} \left(\frac{kmol resto}{kg comb} \right)$$

$$y_{H_2O}^{A_{real}} = \frac{M_{H_2O,real}}{M_{H_2O}} \left(\frac{kmol w}{kg comb} \right)$$

$$y_{CO_2}^{A_{real}} = \frac{M_{CO_2,real}}{M_{CO_2}} \left(\frac{kmol CO_2}{kg comb} \right)$$

Hay que reajustar el contenido de O_2 y N_2 en los humos. Hay que encontrar un valor nuevo de $O_{x,real}$.

$$m_{o,in,real} = O_{x,real} \left[\frac{kmol O_{2,in}}{kmol comb} \right] \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{comb}} \frac{Kg O_2 / kmol O_2}{kg comb / kmol comb}$$

$$\text{Siendo } O_{x,mal} = m_{o,in,real} \frac{M_{comb}}{M_{O_2}} \left[\frac{kmol O_{2,in}}{kmol comb} \right]$$

Desarrollando de nuevo la ecuación, $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$, siguen siendo iguales. El valor $O_{x,mal}$, que es un dato conocido, es nuevo. Así que la diferencia entre b'_{10} , y b'_{11} . Las ecuaciones que cambiarán serán la (7.11), (7.13):

$$C_0 + 2O_{x,real} = 2b_1 + b_2 + b_3C + b_6 + 2b_7 + 2b_8 + 2b'_{10}$$

$$e_0 + 2O_{x,real}K_n = b_6 + b_7 + 2b'_{11}$$

Conociendo b'_{10} y $b'_{11} \rightarrow y'_{O_2} = \frac{b'_{10}}{M_{comb}}; y'_{N_2} = \frac{b'_{11}}{M_{comb}}$

Por tanto se tiene que:

$$y'_s = y_{CO_2}^c + y_{CO} + y_{HC} + y_{H_2} + y_{NO} + y_{NO_2} + y_{SO_2} + y_{CO_2}^{Areal} + y_{resto}^{Areal} + y'_{O_2} + y'_{N_2}$$

$$y'_h = y'_s + y_{H_2O}^c + y_{H_2O}^{Areal} \quad \text{donde} \quad y_{H_2O}^c = y_{H_2O}^c + y_{H_2O}^{Areal}$$

4.3. Calibración termómetro con sensor tipo K

El sensor tipo K es un termopar capaz de medir la temperatura suministrando una señal de tensión eléctrica en función de la temperatura. Este tipo de sensor puede soportar una temperatura de hasta 1200 °C y está compuesto por combinación de materiales como NiCr-Ni o NiCr-MiAl.

Para la calibración de los termómetros se ha utilizado unas tablas de referencia internacional para termopares. Esta normativa está basada en la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90). La unidad de las temperaturas mostradas en las siguientes tablas son grados Celsius y las salidas de f.e.m (fuerza electromotriz) en microvoltios (μV).

-10	-392	-431	-470	-508	-547	-586	-624	-663	-701	-739	-10
0	0	-39	-79	-118	-157	-197	-236	-275	-314	-353	0
0	0	39	79	119	158	198	238	277	317	357	0
10	397	437	477	517	557	597	637	677	718	758	10
20	798	838	879	919	960	1000	1041	1081	1122	1163	20
30	1203	1244	1285	1326	1366	1407	1448	1489	1530	1571	30
40	1612	1653	1694	1735	1776	1817	1858	1899	1941	1982	40
50	2023	2064	2106	2147	2188	2230	2271	2312	2354	2395	50
60	2436	2478	2519	2561	2602	2644	2685	2727	2768	2810	60
70	2851	2893	2934	2976	3017	3059	3100	3142	3184	3225	70
80	3267	3308	3350	3391	3433	3474	3516	3557	3599	3640	80
90	3682	3723	3765	3806	3848	3889	3931	3972	4013	4055	90
100	4096	4138	4179	4220	4262	4303	4344	4385	4427	4468	100
110	4509	4550	4591	4633	4674	4715	4756	4797	4838	4879	110
120	4920	4961	5002	5043	5084	5124	5165	5206	5247	5288	120
130	5328	5369	5410	5450	5491	5532	5572	5613	5653	5694	130
140	5735	5775	5815	5856	5896	5937	5977	6017	6058	6098	140
150	6138	6179	6219	6259	6299	6339	6380	6420	6460	6500	150
160	6540	6580	6620	6660	6701	6741	6781	6821	6861	6901	160
170	6941	6981	7021	7060	7100	7140	7180	7220	7260	7300	170
180	7340	7380	7420	7460	7500	7540	7579	7619	7659	7699	180
190	7739	7779	7819	7859	7899	7939	7979	8019	8059	8099	190
200	8138	8178	8218	8258	8298	8338	8378	8418	8458	8499	200
210	8539	8579	8619	8659	8699	8739	8779	8819	8860	8900	210
220	8940	8980	9020	9061	9101	9141	9181	9222	9262	9302	220
230	9343	9383	9423	9464	9504	9545	9585	9626	9666	9707	230
240	9747	9788	9828	9869	9909	9950	9991	10031	10072	10113	240
250	10153	10194	10235	10276	10316	10357	10398	10439	10480	10520	250
260	10561	10602	10643	10684	10725	10766	10807	10848	10889	10930	260
270	10971	11012	11053	11094	11135	11176	11217	11259	11300	11341	270
280	11382	11423	11465	11506	11547	11588	11630	11671	11712	11753	280
290	11795	11836	11877	11919	11960	12001	12043	12084	12126	12167	290

Figura 4.2: Tabla 1 de referencia internacional para termopares

f.e.m./μV											
°C (t ₉₀)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C (t ₉₀)
300	12209	12250	12291	12333	12374	12416	12457	12499	12540	12582	300
310	12624	12665	12707	12748	12790	12831	12873	12915	12956	12998	310
320	13040	13081	13123	13165	13206	13248	13290	13331	13373	13415	320
330	13457	13498	13540	13582	13624	13665	13707	13749	13791	13833	330
340	13874	13916	13958	14000	14042	14084	14126	14167	14209	14251	340
350	14293	14335	14377	14419	14461	14503	14545	14587	14629	14671	350
360	14713	14755	14797	14839	14881	14923	14965	15007	15049	15091	360
370	15133	15175	15217	15259	15301	15343	15385	15427	15469	15511	370
380	15554	15596	15638	15680	15722	15764	15806	15849	15891	15933	380
390	15975	16017	16059	16102	16144	16186	16228	16270	16313	16355	390
400	16397	16439	16482	16524	16566	16608	16651	16693	16735	16778	400
410	16820	16862	16904	16947	16989	17031	17074	17116	17158	17201	410
420	17243	17285	17328	17370	17413	17455	17497	17540	17582	17624	420
430	17667	17709	17752	17794	17837	17879	17921	17964	18006	18049	430
440	18091	18134	18176	18218	18261	18303	18346	18388	18431	18473	440
450	18516	18558	18601	18643	18686	18728	18771	18813	18856	18898	450
460	18941	18983	19026	19068	19111	19154	19196	19239	19281	19324	460
470	19366	19409	19451	19494	19537	19579	19622	19664	19707	19750	470
480	19792	19835	19877	19920	19962	20005	20048	20090	20133	20175	480
490	20218	20261	20303	20346	20389	20431	20474	20516	20559	20602	490
500	20644	20687	20730	20772	20815	20857	20900	20943	20985	21028	500
510	21071	21113	21156	21199	21241	21284	21326	21369	21412	21454	510
520	21497	21540	21582	21625	21668	21710	21753	21796	21838	21881	520
530	21924	21966	22009	22052	22094	22137	22179	22222	22265	22307	530
540	22350	22393	22435	22478	22521	22563	22606	22649	22691	22734	540
550	22776	22819	22862	22904	22947	22990	23032	23075	23117	23160	550
560	23203	23245	23288	23331	23373	23416	23458	23501	23544	23586	560
570	23629	23671	23714	23757	23799	23842	23884	23927	23970	24012	570
580	24055	24097	24140	24182	24225	24267	24310	24353	24395	24438	580
590	24480	24523	24565	24608	24650	24693	24735	24778	24820	24863	590
600	24905	24948	24990	25033	25075	25118	25160	25203	25245	25288	600
610	25330	25373	25415	25458	25500	25543	25585	25627	25670	25712	610
620	25755	25797	25840	25882	25924	25967	26009	26052	26094	26136	620
630	26179	26221	26263	26306	26348	26390	26433	26475	26517	26560	630
640	26602	26644	26687	26729	26771	26814	26856	26898	26940	26983	640

Figura 4.3: Tabla 2 de referencia internacional para termopares

650	27025	27067	27109	27152	27194	27236	27278	27320	27363	27405	650
660	27447	27489	27531	27574	27616	27658	27700	27742	27784	27826	660
670	27869	27911	27953	27995	28037	28079	28121	28163	28205	28247	670
680	28289	28332	28374	28416	28458	28500	28542	28584	28626	28668	680
690	28710	28752	28794	28835	28877	28919	28961	29003	29045	29087	690
700	29129	29171	29213	29255	29297	29338	29380	29422	29464	29506	700
710	29548	29589	29631	29673	29715	29757	29798	29840	29882	29924	710
720	29965	30007	30049	30090	30132	30174	30216	30257	30299	30341	720
730	30382	30424	30466	30507	30549	30590	30632	30674	30715	30757	730
740	30798	30840	30881	30923	30964	31006	31047	31089	31130	31172	740
750	31213	31255	31296	31338	31379	31421	31462	31504	31545	31586	750
760	31628	31669	31710	31752	31793	31834	31876	31917	31958	32000	760
770	32041	32082	32124	32165	32206	32247	32289	32330	32371	32412	770
780	32453	32495	32536	32577	32618	32659	32700	32742	32783	32824	780
790	32865	32906	32947	32988	33029	33070	33111	33152	33193	33234	790
800	33275	33316	33357	33398	33439	33480	33521	33562	33603	33644	800
810	33685	33726	33767	33808	33848	33889	33930	33971	34012	34053	810
820	34093	34134	34175	34216	34257	34297	34338	34379	34420	34460	820
830	34501	34542	34582	34623	34664	34704	34745	34786	34826	34867	830
840	34908	34948	34989	35029	35070	35110	35151	35192	35232	35273	840
850	35313	35354	35394	35435	35475	35516	35556	35596	35637	35677	850
860	35718	35758	35798	35839	35879	35920	35960	36000	36041	36081	860
870	36121	36162	36202	36242	36282	36323	36363	36403	36443	36484	870
880	36524	36564	36604	36644	36685	36725	36765	36805	36845	36885	880
890	36925	36965	37006	37046	37086	37126	37166	37206	37246	37286	890

Figura 4.4: Tabla 3 de referencia internacional para termopares

		f.e.m./ μ V											
$^{\circ}\text{C}$ (t_{90})		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$^{\circ}\text{C}$ (t_{90})	
900	37326	37366	37406	37446	37486	37526	37566	37606	37646	37686	37726	900	37726
910	37725	37765	37805	37845	37885	37925	37965	38005	38044	38084	38124	910	38124
920	38124	38164	38204	38243	38283	38323	38363	38402	38442	38482	38522	920	38522
930	38522	38561	38601	38641	38680	38720	38760	38799	38839	38878	38918	930	38918
940	38918	38958	38997	39037	39076	39116	39155	39195	39235	39274	39314	940	39314
950	39314	39353	39393	39432	39471	39511	39550	39590	39629	39669	39708	950	39708
960	39708	39747	39787	39826	39866	39905	39944	39984	40023	40062	40101	960	40101
970	40101	40141	40180	40219	40259	40298	40337	40376	40415	40455	40494	970	40494
980	40494	40533	40572	40611	40651	40690	40729	40768	40807	40846	40885	980	40885
990	40885	40924	40963	41002	41042	41081	41120	41159	41198	41237	41276	990	41276
1000	41276	41315	41354	41393	41431	41470	41509	41548	41587	41626	41665	1000	41665
1010	41665	41704	41743	41781	41820	41859	41898	41937	41976	42014	42053	1010	42053

Figura 4.5: Tabla 4 de referencia internacional para termopares

Con estas tablas se realiza un ajuste lineal donde se grafica la fuerza electromotriz frente a la temperatura y la temperatura frente a la fuerza electromotriz.

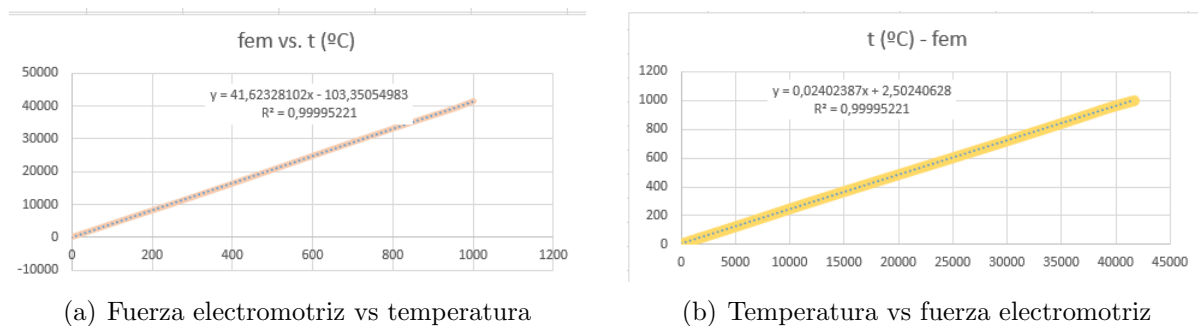


Figura 4.6: Calibración sensor tipo K

Una vez que tenemos este ajuste se puede obtener para una temperatura dada el rango máximo y mínimo obteniéndose la figura 2.41.

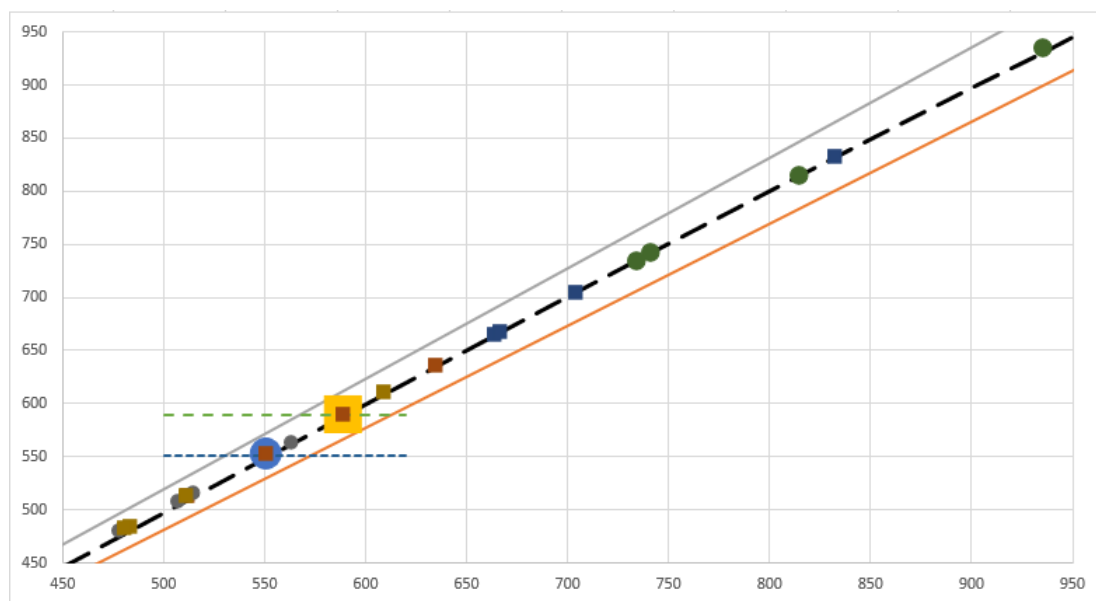


Figura 4.7: Rango de temperaturas

En la figura 2.41 se puede ver la tolerancia que tienen los termómetros y se puede ver que cuanto mayor es la temperatura se va perdiendo precisión en la medida tomada. Por lo tanto se puede comprobar si la medida tomada está dentro del máximo y mínimo.

4.4. Cálculo del poder calorífico superior e inferior

En esta sección se presenta la forma seguida para determinar el poder calorífico superior e inferior del combustible, en este caso es una mezcla de **Jet-A1** y aceite de turbina **Aeroshell 500**. Para determinar el poder calorífico superior se ha utilizado una bomba calorimétrica, ubicada en el laboratorio 004 de Máquinas y Motores Térmicos. La bomba calorimétrica *Parr 6050* es el equipo utilizado para obtener el poder calorífico superior.



Figura 4.8: Bomba calorimétrica Parr 6050

El proceso seguido para realizar el ensayo es el siguiente. En primer lugar para comprobar que la bomba calorimétrica está bien calibrada, se realiza un primer ensayo con ácido benzoico. Se usa este elemento debido a que ya se conoce su poder calorífico superior, por lo que una vez que concluya el ensayo, si el resultado dado en el ensayo del poder calorífico superior es igual o muy aproximado al real, en ese caso la bomba estará correctamente calibrada.

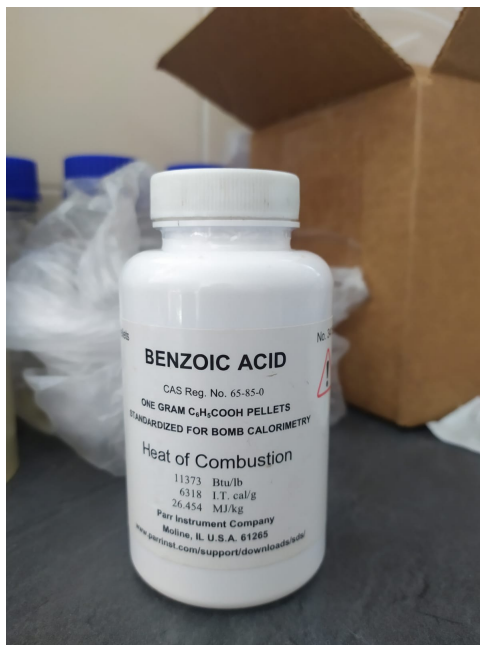


Figura 4.9: Ácido benzoico

El poder calorífico superior del ácido benzoico es de 6318 cal/g y el resultado del ensayo es de 6227.94 cal/g. Esto supone un error del 1.42 %.

Una vez que tenemos calibrada la bomba se procede a ensayar una muestra de la mezcla de Jet-A1 y aceite de turbina.

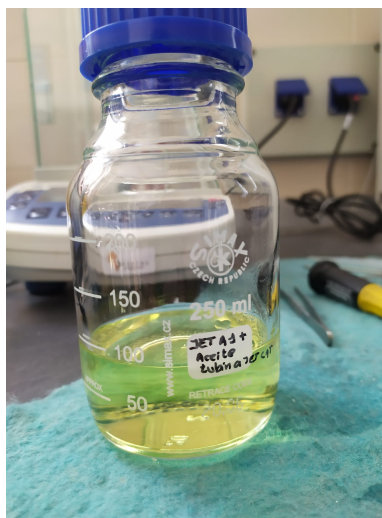


Figura 4.10: Muestra de la mezcla de Jet-A1 y aceite de turbina

Se ha realizado un total de 3 ensayos para la misma muestra obteniéndose los siguientes resultados:

- Ensayo 1: PCS = 10852,41 cal/g
- Ensayo 2: PCS = 10651,41 cal/g

- Ensayo 3: PCS = 10681,165 cal/g

Si realizamos el siguiente factor de conversión para convertir las cal/g en kJ/kg se tiene:

$$10852,41 \frac{\text{cal}}{\text{g}} \frac{\text{kcal}}{1000 \text{ cal}} \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} \frac{4,18 \text{ kJ}}{\text{kcal}} = 45363,15 \text{ kJ/kg} \quad (6.2)$$

Si hacemos lo mismo para el ensayo 2 y 3 se obtiene:

- Ensayo 1: PCS = 45363,15 kJ/kg
- Ensayo 2: PCS = 44522,9 kJ/kg
- Ensayo 3: PCS = 44647,26 kJ/kg

Para obtener el poder calorífico superior se realiza la media de los tres ensayos.

$$PCS = \frac{45363,15 + 44522,9 + 44647,27}{3} = 44844,44 \text{ kJ/kg} \quad (6.3)$$

Una vez que tenemos el poder calorífico superior se puede obtener el poder calorífico inferior de la siguiente forma:

$$PCI = PCS - 5264,35 h \quad (6.4)$$

Donde **h** es la fracción másica de hidrógeno en el combustible. El término 5264.35 se obtiene de la siguiente manera:

$$h \frac{\text{kg } H_2}{\text{kg comb}} \cdot \frac{18 \text{ kg } H_2O}{2 \text{ kg } H_2} \cdot \Delta \bar{h}_f \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kmol } H_2O} \cdot \frac{1 \text{ kmol } H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} = h \cdot \frac{\Delta \bar{h}_f}{2} = h \cdot \frac{44010}{2 \cdot 4,18} = h \cdot 5264,35 \quad (6.5)$$

Donde $\Delta \bar{h}_f$ es la diferencia entre la entalpía de formación del agua en forma de vapor y forma líquida. La entalpía de formación del agua en forma de líquida es 285830 kJ/kmol y la entalpía de formación del agua en forma de vapor 241830 kJ/kmol.

Para obtener la fracción másica de hidrógeno se ha enviado una muestra de la mezcla de Jet-A1 y aceite de turbina, una muestra de Jet-A1 puro y una muestra de aceite de turbina pura, al Centro de Instrumentación Científico-Técnica (CICT) de la Universidad de Jaén.

Descripción del equipo del CICT

El equipo utilizado para determinar la composición elemental de las muestras es el *AQ07-Analizador elemental automático CHNS 2*. Este equipo está disponible en el CICT ubicado en la dependencia A2-211, es un Analizador Elemental basado en la técnica de combustión total de las muestras para determinar el contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre, tanto en muestras sólidas como líquidas. El analizador cuenta con un horno de combustión primario donde caerá la muestra y tendrá lugar la combustión de la misma. A continuación, se encuentra un horno de postcombustión que retiene el exceso de oxígeno. Además cuenta con un cargador automático de muestras de 2 carruseles de 30 posiciones cada uno.

Una vez hecho el ensayo nos enviaron los resultados:

Combustible	n %	c %	h %	s %	Resto
J100	0.02	85.04	15.09	0.57	-0.72
Jet Oil	0.05	85.38	14.44	0.12	0.01
Jet-A1 (95.5 %)+Aceite turbina (4.5 %)	0.03	84.75	14.44	0.15	0.62

Tabla 7: Composición elemental de las distintas muestras enviadas al CICT.

En la tabla 2 se puede ver la composición elemental de las distintas muestras enviadas al CICT. Donde **J100** es Jet-A1 puro, **Jet Oil** es el aceite de turbina puro y **Jet-A1+Aceite turbina** es la muestra de la mezcla. Para obtener la composición de la mezcla se ha realizado una proporción debido a que el contenido de azufre en la mezcla es muy pequeño comparado con el del Jet-A1 puro. Por eso la composición elemental utilizada será:

$$c = 85 \%$$

$$h = 14,45 \%$$

$$s = 0,55 \%$$

Una vez que conocemos la composición de hidrógeno se sustituye en la ec (7.4). Obteniéndose el poder calorífico inferior.

$$PCI = PCS - 5400 h = 44844,44 - 5264,35 \cdot 0,1445 = 44083,74 \text{ kJ/kg} \quad (7.5)$$

Combustible	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
Jet-A1 (95.5 %)+Aceite turbina (4.5 %)	44844.44	44074.74

Tabla 8: Poder calorífico superior e inferior de la mezcla

4.5. Proceso de cebado

Para que el arranque del motor sea exitoso es necesario que las líneas de combustible estén completamente llenas de combustible y sin la presencia de burbujas de aire. Para poder realizar esta operación se recurren a unas funciones que tiene instaladas la ECU para poder realizar el proceso de forma automática.

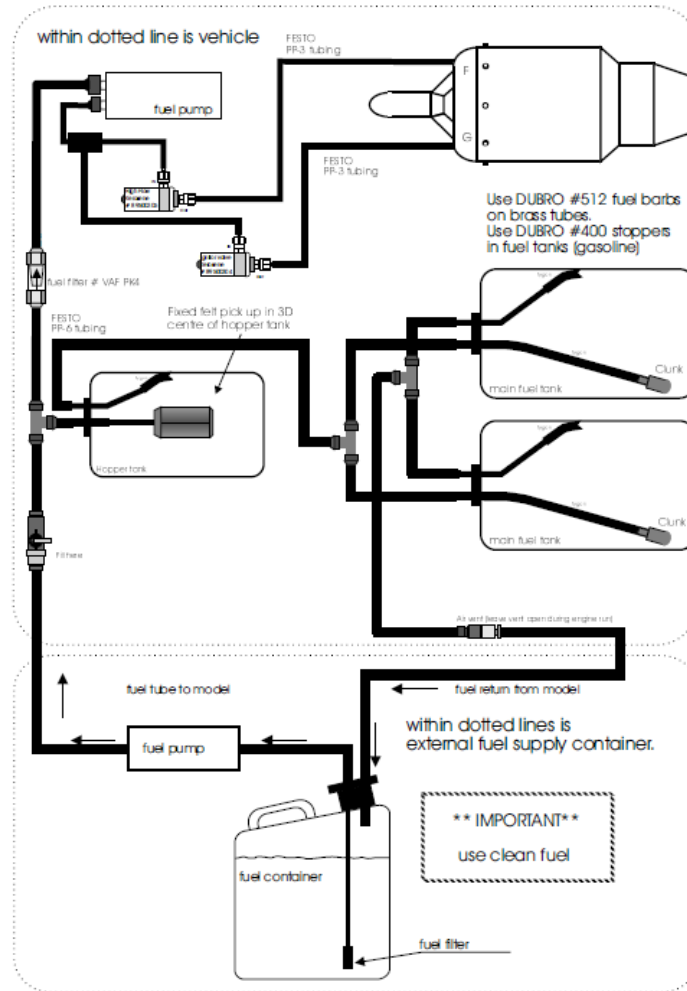


Figura 4.11: Esquema del sistema de combustible

4.5.1. Cebado de la línea de combustible

Para poder seleccionar una función es necesario seleccionarla con el mando de control.

El mando de control permite controlar la secuencia de encendido y apagado del motor mediante el **Switch** (para el proceso de cebado no es necesario utilizar el switch por lo que asegúrese de que está puesto en la posición (1), (posición de parada)).

El otro elemento que tiene el mando de control es el acelerador, este elemento permite aumentar o disminuir el grado de carga del motor. Con él se puede aumentar y disminuir las rpm cuando el motor está encendido. Mientras que el motor está apagado y la ECU está encendida se puede usar para seleccionar las distintas funciones que esta tiene instaladas.

4.5.2. Selección de funciones

El acelerador permite seleccionar las distintas funciones que tiene instaladas la ECU. A continuación se muestran las distintas funciones que presenta la misma.

- 10 % No está en uso en este momento.

- 20 % No está en uso en este momento.
- 30 % Enciende el encendedor.
- 40 % No está en uso en este momento.
- 50 % Función de cebado (línea F, línea principal de combustible).
- 60 % Función de cebado (línea G, sistema de encendido).
- 70 % No está en uso en este momento.
- 80 % Activa el motor eléctrico.
- 90 % Comprueba el embrague.¹
- 100 % Función de enfriado rápido.²

Para seleccionar una de las funciones anteriores se gira el acelerador hasta que en el terminal de datos del motor (*EDT* por sus siglas en inglés), aparezca el porcentaje deseado. Por ejemplo, si se quisiera usar la función de *enfriado rápido*, el acelerador habría que girarlo hasta que en el *EDT* aparezca **100 %**. Una vez que tenemos el acelerador en la posición deseada habría que pulsar el botón **CTF** situado en la caja blanca del banco de ensayo.



Figura 4.12: Situación del botón CTF

¹Activará la comprobación del embrague, encendido/apagado durante un intervalo de 0.5 segundos

²Al activar la función *enfriado rápido*, el motor eléctrico mantendrá el eje de la turbina girando continuamente, incluso si el botón CTF está liberado, hasta que se alcance la temperatura de enfriamiento.

4.5.3. Cebado de la línea de combustible G

El primer cebado es en la línea de sistema de encendido (línea G), para realizar el cebado en esta línea, se tiene que colocar el acelerador en la posición del 60 % (función 60 %). Es **muy importante** que la línea esté desconectada del motor y conectada al sistema de retorno de combustible, ya que si no se desconecta del motor el combustible entrará en la cámara de combustión provocando un arranque peligroso.

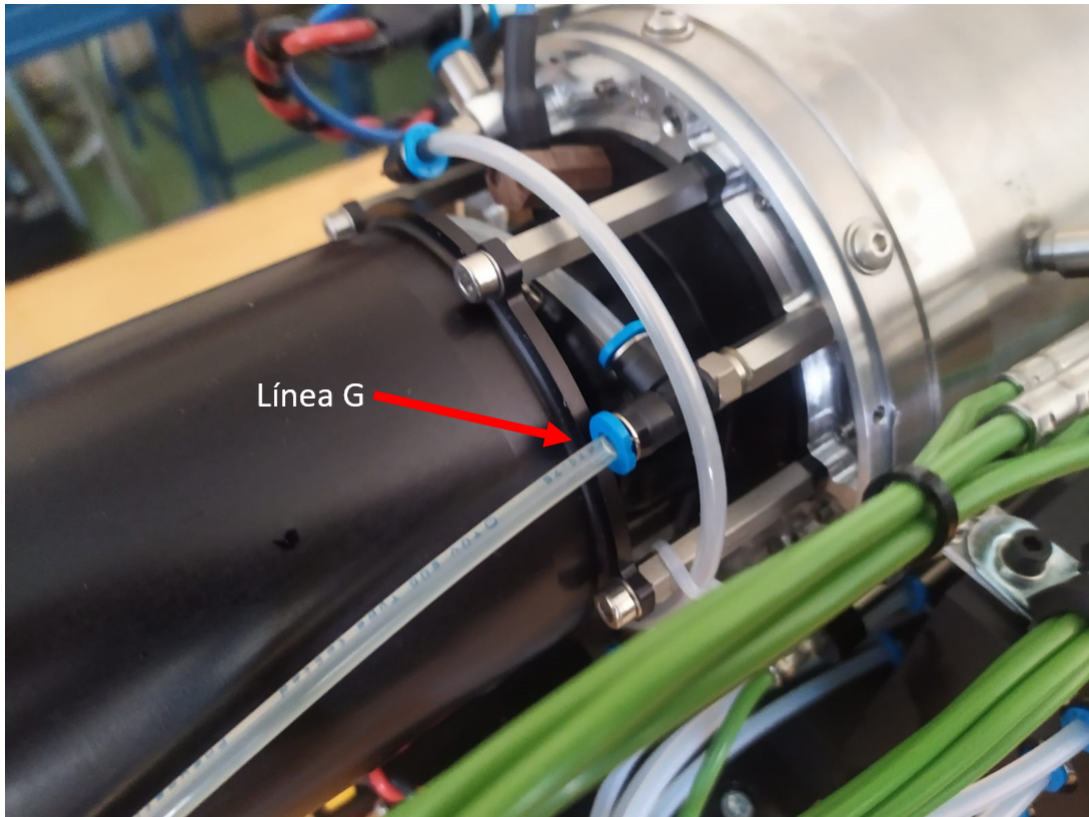


Figura 4.13: Línea de combustible G

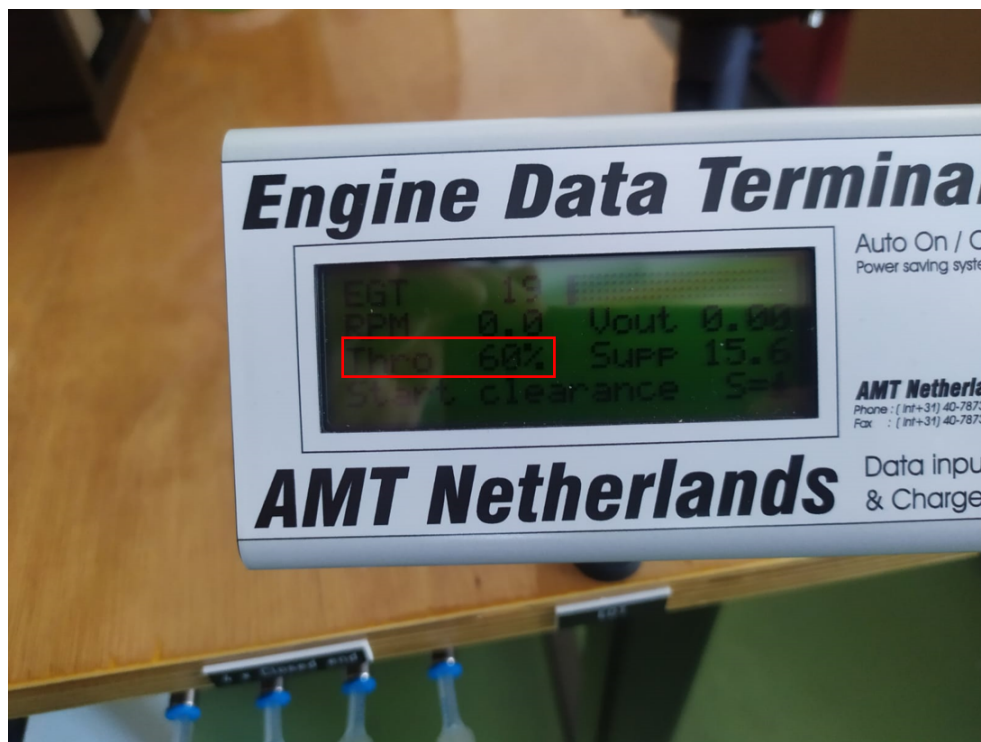


Figura 4.14: Posición del acelerador en el EDT

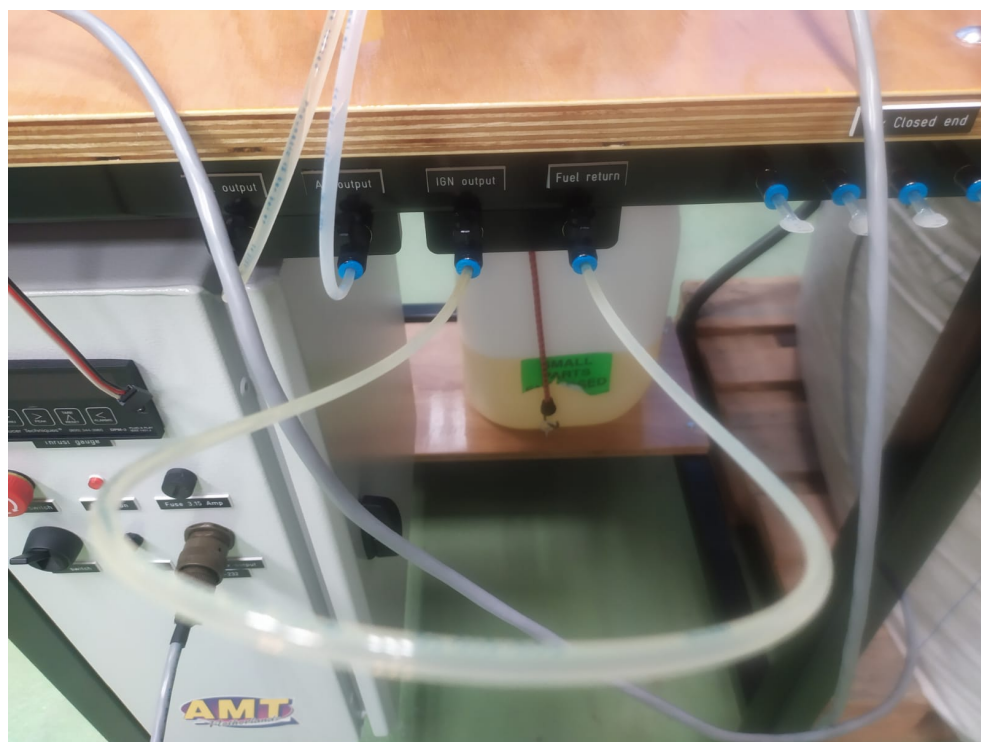


Figura 4.15: Conexión de la línea G al retorno de combustible

Una vez que tenemos puesto el acelerador en la posición deseada y hemos extraído la línea de

combustible del motor y la hemos conectado al retorno de combustible, pulsamos (y mantenemos) el botón **CTF**, durante 2 segundos no ocurrirá nada. Pasado ese tiempo la válvula de arranque se abrirá y la bomba de combustible se activará. Este proceso de cebado de la línea continuará hasta que se deje de pulsar el botón **CTF**, una vez que se deje de pulsar el proceso parará.

Una vez que este proceso ha terminado es recomendable revisar que las líneas de combustible no tienen burbujas de aire en su interior, si esto ocurriera se volverá a realizar el mismo proceso hasta que desaparezcan.

4.5.4. Cebado de la línea de combustible F

El segundo cebado es en la línea principal de combustible (F), para realizar el cebado en esta línea, se tiene que colocar el acelerador en la posición del 50 % (función 50 %). Es **muy importante** que la línea esté desconectada del motor y conectada al sistema de retorno de combustible, ya que si no se desconecta del motor el combustible entrará en la cámara de combustión provocando un arranque peligroso.

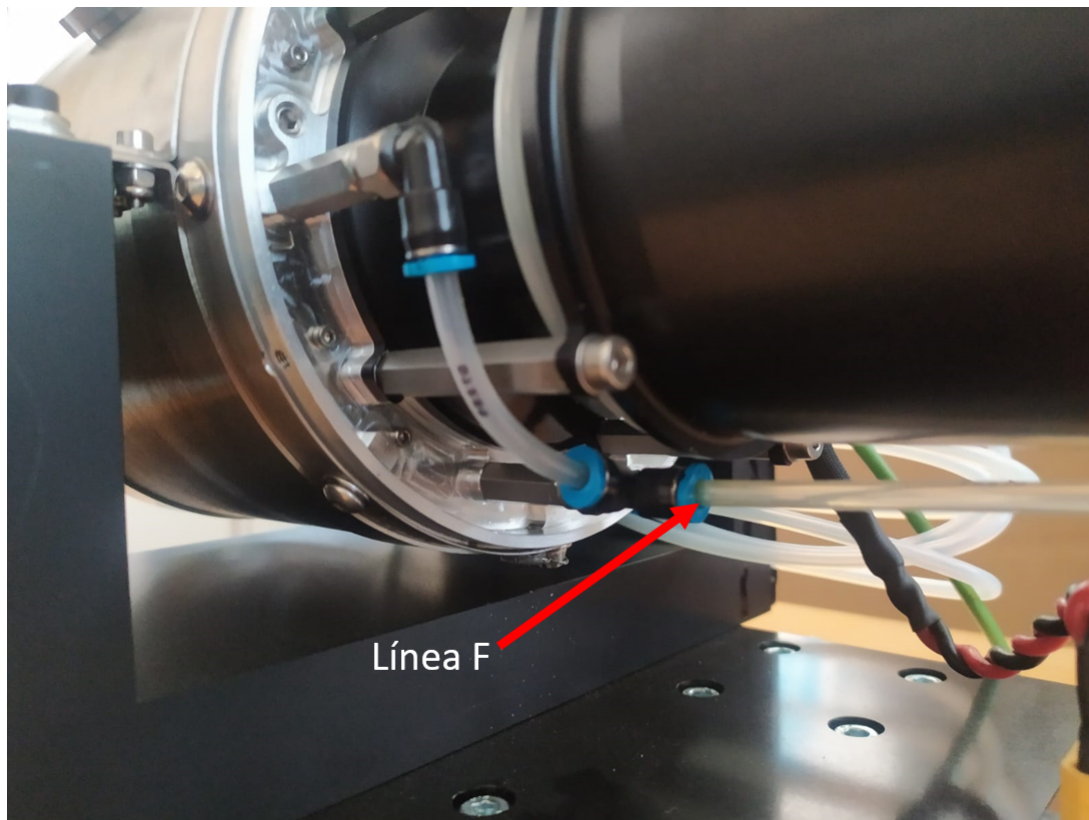


Figura 4.16: Línea de combustible F

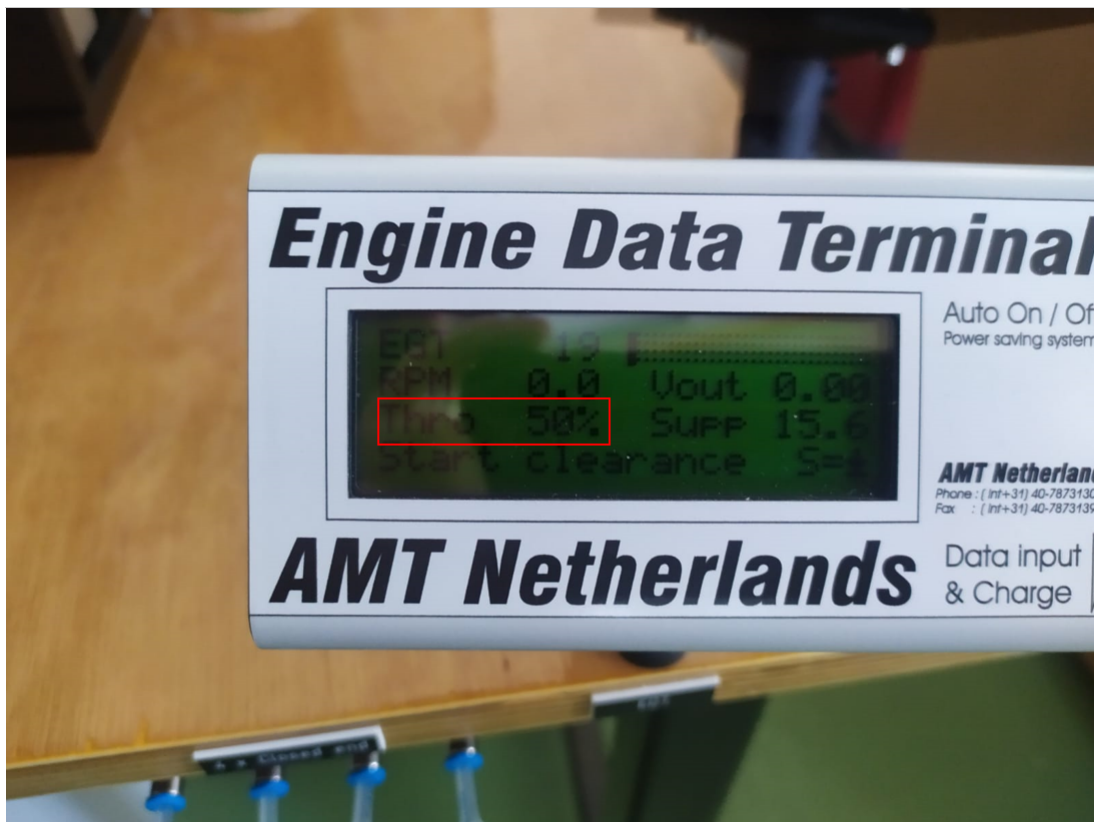


Figura 4.17: Posición del acelerador en el EDT

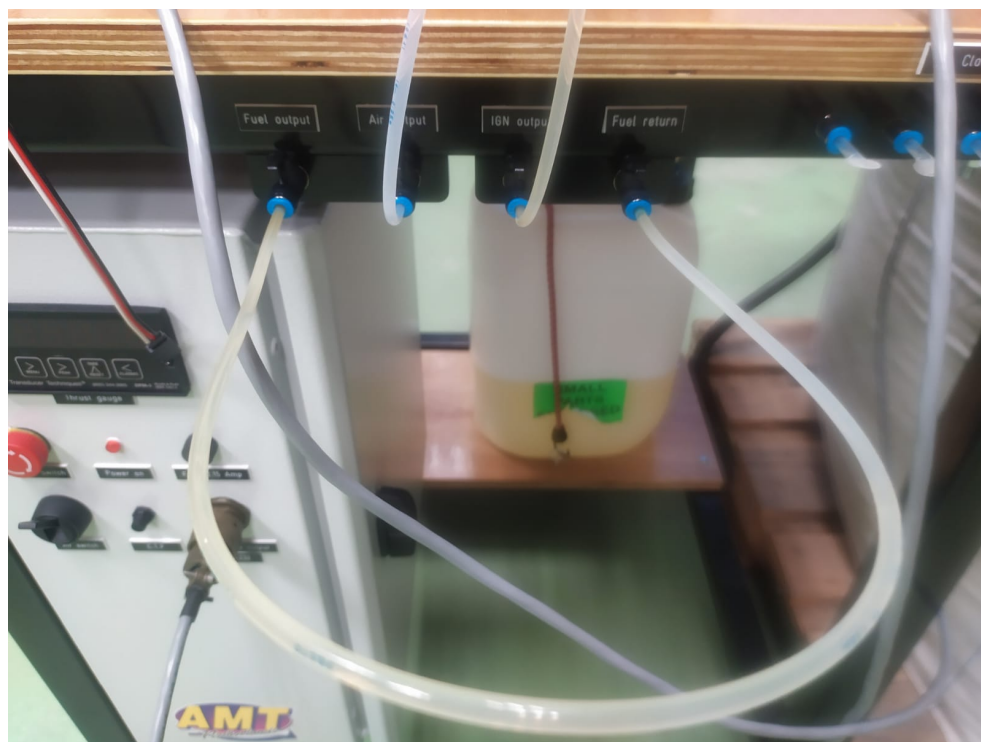


Figura 4.18: Conexión de la línea F al retorno de combustible

Una vez que tenemos puesto el acelerador en la posición deseada y hemos extraído la línea de combustible del motor y la hemos conectado al retorno de combustible, pulsamos (y mantenemos) el botón **CTF**, durante 2 segundos no ocurrirá nada. Pasado ese tiempo la válvula de combustible principal se abrirá y la bomba de combustible se activará. Este proceso de cebado de la línea continuará hasta que se deje de pulsar el botón **CTF**, una vez que se deje de pulsar el proceso parará.

Una vez que este proceso ha terminado es recomendable revisar que las líneas de combustible no tienen burbujas de aire en su interior, si esto ocurriera se volverá a realizar el mismo proceso hasta que desaparezcan.

4.6. Proceso de encendido

Después de asegurarnos de que las líneas tienen combustible y no tienen burbujas de aire en su interior es momento de iniciar la secuencia de encendido. Para realizar esta secuencia hay que seguir los siguientes pasos.

1. Es necesario que el **Switch** del mando de control esté en la posición inferior (posición de parada de emergencia) y el **acelerador** esté en la posición mínima.
2. Para iniciar la turbina coloque el **switch** en la posición superior (3). Ahora escuchará 5 pitidos de la ECU, y después la secuencia de encendido comenzará y el motor eléctrico empezará a girar la turbina.
Si inicia la secuencia de encendido y escucha altos pitidos de forma continuada en intervalos pequeños, eso quiere decir, que la temperatura de los gases de escape es demasiada elevada para poder iniciar la secuencia de encendido y la secuencia será abortada.
3. Después de la cuenta atrás de 5 pitidos la ECU engranará el motor eléctrico y subirá las revoluciones a 3000 rpm, la bomba de combustible empezará a funcionar y la válvula solenoide se abrirá.
4. Cuando la temperatura de los gases de escape se incrementen en 5°C desde el momento en el que se encendió el motor, la válvula de combustible principal se abrirá y el motor eléctrico girará a las máximas revoluciones.
5. La ECU acelerará automáticamente hasta las 50000 rpm, es el punto de calibración, y las mantendrá durante 2 segundos. Luego pasado estos 2 segundos bajará hasta las revoluciones mínimas (36000). Y el punto de ralentí estará calibrado.
6. Después de esto ya tiene el control de la turbina y podrá controlarla con el acelerador.

Nota: Si acelera al máximo por primera vez justo después de encender el motor, el motor estará limitado al 95 % durante 1-2 segundos hasta que la ECU termine la calibración interna.

Después de que ocurra esto, en el **EDT** aparecerá un mensaje de este tipo “Revoluciones máximas establecidas”. Esta es la confirmación de que la próxima vez que acelere al máximo conseguirá la máxima potencia.

4.7. Realización del ensayo

Una vez que el motor está encendido y está estabilizado se selecciona, con el acelerador de la figura 3.16, el grado de carga deseado para el ensayo.



Figura 4.19: Mediciones del EDT para un grado de carga de 30 %

Como se puede ver en la figura 4.19 en el EDT se puede medir la temperatura de los gases de escape, las rpm del motor así como la tensión de la bomba. En este caso concreto la temperatura de los gases de escape es de 538°C y una rpm de 79000.

4.7.1. Medición de la temperatura

Además de la lectura de los datos del EDT se pueden medir las temperaturas en los distintos puntos mencionados en la sección 4.5. Para saber el punto del motor donde se está haciendo la medición se ha colocado una etiqueta con el número del sensor, es decir, si en un termómetro pone en la etiqueta un 1 eso quiere decir que el termómetro está midiendo la temperatura del sensor 1 que corresponde con la entrada del compresor. Hay que tener cuidado ya que hay un termómetro modelo 307 el cual tiene dos entradas del sensor Tipo K, por lo que habrá que cambiar de canal para obtener la medición de los dos sensores. Para este caso se tiene que:

- Sensor Tt1: 26.4°C
- Sensor Tt3: 121.1°C
- Sensor Tt4: 689°C

- Sensor Tt5: 512°C
- Sensor Tt6: 494°C



(a) Mediciones de temperaturas con modelo 307 en la posición 3



(b) Mediciones de temperaturas con modelo 307 en la posición 6

Figura 4.20: Mediciones de temperaturas para un grado de carga del 30 %

4.7.2. Medición de la presión

Otra medición importante son la presiones en los distintos elementos del motor. Para ello se conectan los distintos tubos al panel de los sensores como en la figura 4.21

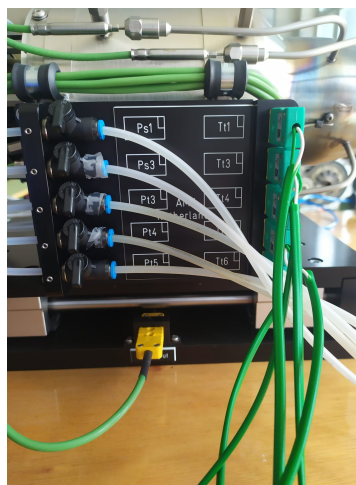


Figura 4.21: Colocación de los tubos para medir presiones

Una vez que tenemos los tubos conectados al panel, los conectamos a un elemento común para después conectar el manómetro.



Figura 4.22: Elemento de unión de los tubos al manómetro

Para medir las presiones de un punto en concreto por ejemplo el punto 1 que corresponde en el panel con Ps1 se debe hacer de la siguiente forma: Primero se abre la llave del punto elegido y se toma la lectura del manómetro. Para medir otro punto se debe primero cerrar la llave del punto anterior y después abrir la llave del nuevo punto donde se quiere hacer la medición. Esto quiere decir que si primero medimos la presión del punto 1 y después queremos medir la presión del punto 4, lo que debemos hacer es cerrar la llave del punto Ps1 y después abrir la llave del punto Pt4. Para este ensayo se tienen las siguientes presiones:

- Ps1: -0.0177 bar
- Ps3: 1.096 bar
- Pt3: 1.249 bar.
- Pt4: 1.067 bar.
- Pt5: 1.044 bar.



(a) Ps1



(b) Ps3



(c) Pt3



(d) Pt4



(e) Pt5

Figura 4.23: Mediciones de la presión para un grado de carga del 30 %

4.7.3. Medición de las emisiones de los gases de combustión

Para medir las emisiones de los gases de combustión se utilizará el analizador de humos Testo 350. Para medir las emisiones primeramente se debe encender el dispositivo y seleccionar el menú de **Mediciones**.

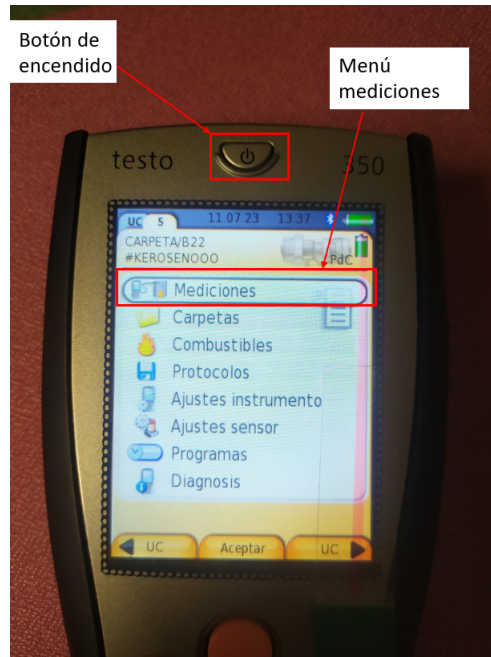


Figura 4.24: Encendido y menú de mediciones

Seleccionado el menú de mediciones aparecerá un menú con distintas aplicaciones: Quemador, Turbina, Motor $\lambda > 1$, Motor $\lambda > 1$. En nuestro caso como estamos ensayando un motor de reacción se seleccionará la aplicación **Turbina**

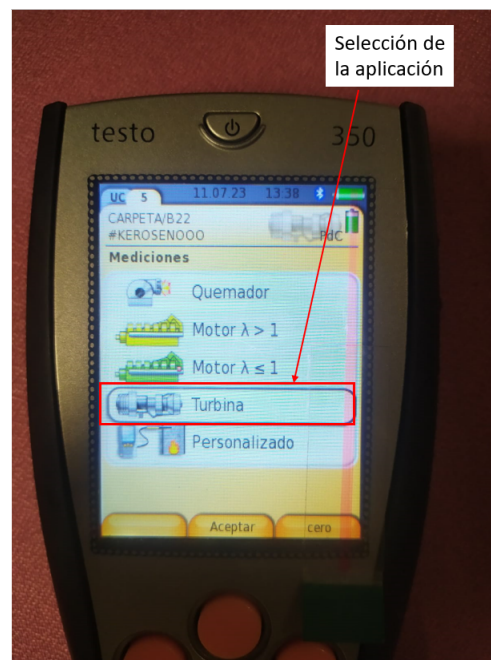


Figura 4.25: Selección de la aplicación

Una vez seleccionado este menú nos aparecerá otro donde se podrá elegir el combustible que estemos utilizando. Testo ya tiene incorporado distintos combustibles. Además de los combustibles

predeterminados se pueden añadir otros distintos, en nuestro caso el queroseno no viene de forma predeterminada por lo que se tuvo que añadir. La selección del combustible no afecta a la hora de realizar la medición de los gases de combustión, esto sirve para que el dispositivo sea capaz de realizar cálculos internos como el rendimiento de la combustión entre otros.

Cuando se seleccionó la aplicación en el paso anterior empezó la secuencia de puesta a cero automática. Durante esta fase los sensores de la caja analizadora se resetean y el valor de O_2 se ajusta al 21 %. Una vez que se ha hecho la puesta a cero se debe quitar la tapa de plástico de la sonda.

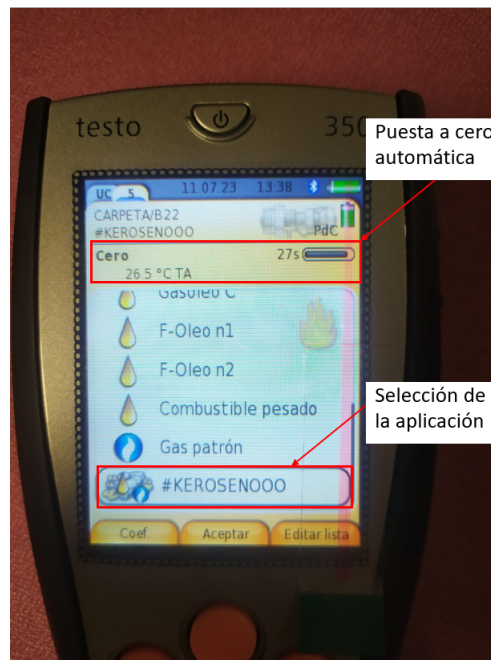


Figura 4.26: Selección del combustible

En el siguiente menú aparecen los distintos modos de medición que tiene incorporado Testo, los cuales son:

- PdC: Se puede realizar una medición de gases de combustión.
- PdC b+a cat: Permite la medición simultánea de las concentraciones antes y después del paso por un catalizador. Para este menú es necesario tener dos cajas analizadoras conectadas entre sí mediante bus de datos.
- PdC + m/s: Se pueden analizar los gases de combustión y simultáneamente se puede medir el flujo mediante un tubo de Pitot.
- PdC + ΔP : Se puede analizar los gases de combustión y paralelamente se puede medir la presión diferencial.

Para nuestro caso se selecciona **PdC**.

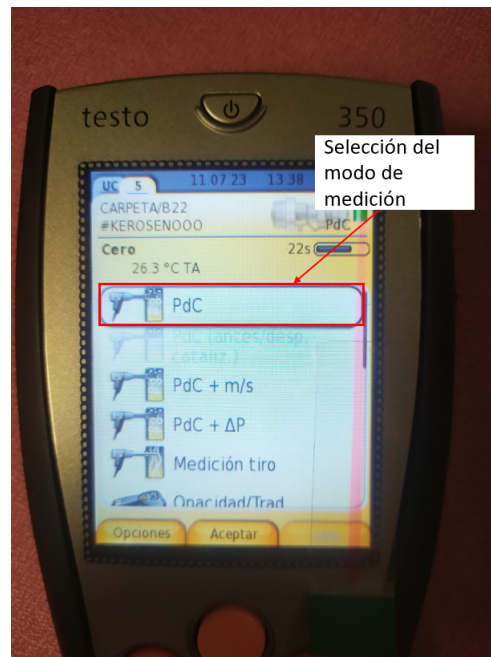


Figura 4.27: Selección del modo de medición

En la siguiente pantalla se mostrará un menú donde aparecen las distintas variables que es capaz de medir Testo. Para empezar con la medición se pulsará el botón de **Play** para que el dispositivo empiece a medir. Esto se debe hacer cuando se haya completado la secuencia de puesta a cero.



Figura 4.28: Menú donde se muestran las variables

Por último, cuando se hayan estabilizado las distintas variables se presiona el botón de **Stop** y se seleccionará el apartado **Opciones** y aparecerá un menú donde habrá la opción de imprimir los resultados con la impresora de la figura 5.12.

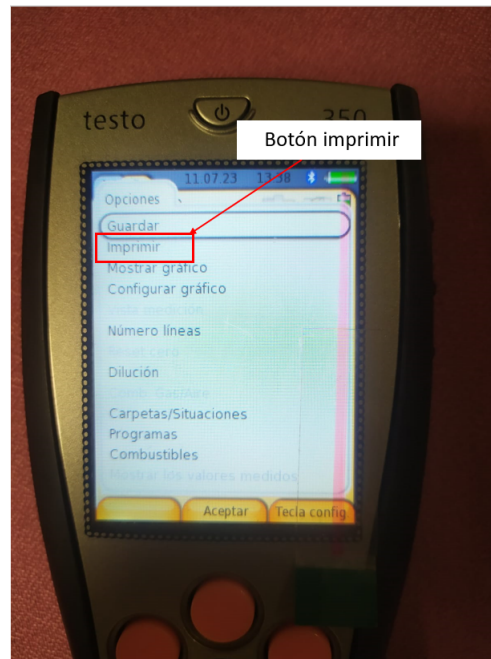


Figura 4.29: Menú para imprimir los resultados



(a) Impresora Bluetooth

testo 350 Box		#D
VI.25		60254079-E
EEE		
23.05.2023	09:32:31	
Situación:		
822		
CARPETA		
Combustible: #KEROSENO00		
O2ref:	3.0 %	
CO2Max:	15.4 %	
PdC Turbina		
17.36 %	O2	
1637 ppm	CO	
9 ppm	NO	
5.3 ppm	NO2	
13.3 ppm	NOx	
24086 ppm	CO2 IR	
0 ppm	HC	
17.0 °C	Temp. Amb.	
492.6 °C	Temp. PDC s	
81.2 %	αA	
269 ppm	H2	
3.0 %	O2ref	
15.4 %	CO2Max	
6.7 °C	Pto. de rocío	
0.97 l/min	Caudal. hom.	
24.3 °C	Temp. instr.	
16.8 %	REN	
Opacidad a		
2.41 %	CO2 IR	
957 hPa	Pabs	
24.3 °C	TSensor	
9440 ppm	CO corregido	

(b) Ticket de los resultados de la medición de los gases de combustión

Figura 4.30: Impresora Bluetooth y resultado de las emisiones para un grado de carga del 30 %

4.7.4. Medición del empuje y consumo de combustible

Otras medidas que se pueden obtener del banco de ensayo son el empuje y el consumo total de combustible. Para este caso el empuje es de 7 kg y el consumo de combustible es de $371 \text{ cm}^3/\text{min}$.



(a) Medición del empuje en Kg

(b) Medición del consumo de combustible total en cm^3/min

Figura 4.31: Mediciones del empuje y consumo de combustible total para un grado de carga del 30 %

Una vez que tenemos las medidas del ensayo, si se quiere hacer otro ensayo simplemente se selecciona con el acelerador el nuevo grado de carga deseado. En el caso de que se haya terminado el ensayo y se quiere apagar el motor, primeramente se coloca el acelerador en la posición de ralentí (mínima) y después se realizan los pasos siguientes para proceder al apagado del motor.

4.8. Proceso de apagado

Para una parada normal del motor deberá seguir los siguientes pasos:

1. Poner el **switch** en la posición intermedia (2) para activar la secuencia de parada automática.
2. La ECU regulará automáticamente el acelerador al 30 % (aproximadamente 60000 rpm) durante 4 segundos y esperará hasta que la temperatura de los gases de escape se estabilice.
3. Después el ECU parará el motor.
4. Por último, la ECU automáticamente encenderá y apagará el motor eléctrico hasta que la temperatura de los gases de escape estén por debajo de 88°C .

Nota: Para realizar otro encendido es necesario que la temperatura de los gases de escape estén por debajo de 88°C . Si esto no es así la próxima secuencia de encendido será abortada.

5. Resultados

Una vez que tenemos las medidas experimentales del ciclo LTO se procede a realizar un modelo matemático para obtener el resto de parámetros de interés a partir de los datos experimentales. A continuación, se explicará el proceso de cálculo. Este cálculo se ha llevado a cabo sobre una hoja Excel.

5.1. Medidas ciclo LTO

Una vez que sabemos como realizar el modelo matemático se procede a obtener las medidas experimentales del ciclo LTO. Este ciclo como se comentó en secciones anteriores consiste en ensayar el motor a distintos grados de carga, los cuales son 7 %, 30 %, 85 % y 100 %. A continuación, se presentarán unas tablas donde se recogen las medidas de temperatura, presión así como las medidas de las emisiones.

5.1.1. Primer ensayo: Grado de carga 7 %

A continuación, se presentará las medidas experimentales para un grado de carga del 7 %. Se mostrará en una tabla las presiones y temperaturas obtenidas a partir de los instrumentos mencionados anteriormente, además de las emisiones y otros datos de interés.

Medidas principales. Obtenidas con el banco de ensayo:

- Temperatura gases de escape (EGT): 515 °C
- Revoluciones: 49 krpm
- Empuje: 2.4 kg
- Consumo de combustible: 200 ml/min

Medidas secundarias. Obtenidas con los termómetros y manómetro.

Presión (bar)	Temperatura (°C)
$PS1 = 0,011$	$Tt1 = 16,4$
$PS3 = 0,185$	$Tt3 = 48$
$PT3 = 0,159$	$Tt4 = 563$
$PT4 = 0,159$	$Tt5 = 507$
$PT5 = 0,034$	$Tt6 = 478$

Tabla 9: Presiones y temperaturas para un grado de carga del 7 %

Emisiones obtenidas con el equipo Testo 350.

O_2	17.33 %
CO_2	2.3049 %
CO	2876 ppm
NO	2 ppm
NO_2	3.9 ppm
H_2	212 ppm

Tabla 10: Emisiones para un grado de carga del 7 %

Una vez que tenemos las medidas experimentales, las comparamos con el modelo matemático.

Rendimiento mecánico eje	0.95
Pérdidas de presión total en C.C	2.4 %
Pérdidas de presión en toma dinámica	2.3 %
Contracción del flujo de gases	9 %
Fracción de combustible para lubricar	0.16
Presión punto 1	0.92515 bar
Relación de compresión	1.373
Rendimiento compresor TT	0.712
Presión punto 2	1.28362 bar
Presión punto 3	1.216 bar
Presión punto 4	0.971 bar
Volumen de humos secos	955
Mezcla aire	1.04364
Rendimiento C.C	0.9115
Flujo de aire	0.1662 kg/s
Flujo de combustible total	0.1683 kg/s
Flujo de combustible quemado	0.00222
Flujo de combustible lubricación	0.16607
Dosado	1/62.657
Rendimiento turbina TE	0.6248
Rendimiento turbina TT	0.7516
Rendimiento térmico	1.675
Pérdida de calor en la tobera	7.3805
Calor del combustible	590,748 kJ/kg aire
Calor aportado al ciclo	538.5 kJ/kg aire

Tabla 11: Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para un grado de carga del 7 %

También se adjunta el gráfico del ciclo termodinámico.

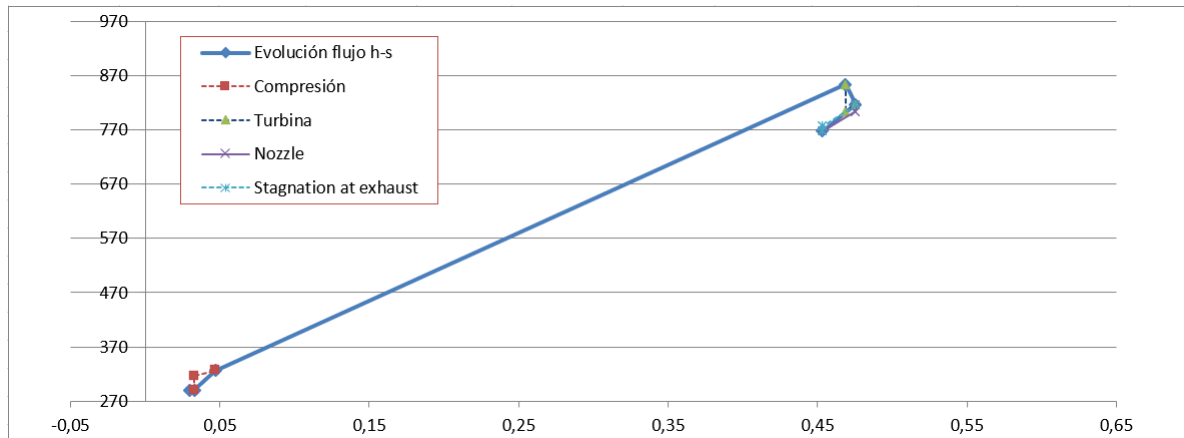


Figura 5.1: Ciclo termodinámico para un grado de carga del 7 %

5.1.2. Segundo ensayo: Grado de carga 30 %

En el segundo ensayo se tomaron las medidas experimentales para un grado de carga del 30 %. Se mostrará en una tabla las presiones y temperaturas obtenidas a partir de los instrumentos mencionados anteriormente, además de las emisiones y otros datos de interés.

Medidas principales. Obtenidas con el banco de ensayo.

- Temperatura gases de escape (EGT): 511 °C
- Revoluciones: 79 krpm
- Empuje: 8.3 kg
- Consumo de combustible: 389 ml/min

Medidas secundarias. Obtenidas con los termómetros y manómetro.

Presión (bar)	Temperatura (°C)
$PS1 = 0,003$	$Tt1 = 16$
$PS3 = 1,207$	$Tt3 = 110$
$PT3 = 1,346$	$Tt4 = 609$
$PT4 = 1,133$	$Tt5 = 483$
$PT5 = 0,248$	$Tt6 = 481$

Tabla 12: Presiones y temperaturas para un grado de carga del 30 %

Emisiones obtenidas con el equipo Testo 350.

O_2	17.36 %
CO_2	2.4086 %
CO	1637 ppm
NO	8 ppm
NO_2	5.3 ppm
H_2	269 ppm

Tabla 13: Emisiones para un grado de carga del 30 %

Una vez que tenemos las medidas experimentales, las comparamos con el modelo matemático.

Rendimiento mecánico eje	0.95
Pérdidas de presión total en C.C	9.2 %
Pérdidas de presión en toma dinámica	2.3 %
Contracción del flujo de gases	5.3 %
Fracción de combustible para lubricar	0.16
Presión punto 1	0.88145 bar
Relación de compresión	2.46
Rendimiento compresor TT	0.769
Presión punto 2	2.2945 bar
Presión punto 3	1.99271 bar
Presión punto 4	1.06 bar
Volumen de humos secos	2335
Mezcla aire	1.00024
Rendimiento C.C	0.8838
Flujo de aire	0.3265 kg/s
Flujo de combustible total	0.3268 kg/s
Flujo de combustible quemado	0.00432 kg/s
Flujo de combustible lubricación	0.32256 kg/s
Dosado	1/62.582
Rendimiento turbina TE	0.7122
Rendimiento turbina TT	0.8717
Rendimiento térmico	5.303 %
Pérdida de calor en la tobera	0.8375 %
Calor del combustible	591.588 kJ/kg aire
Calor aportado al ciclo	522.904 kJ/kg aire

Tabla 14: Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para un grado de carga del 30 %

También se adjunta el gráfico del ciclo termodinámico.

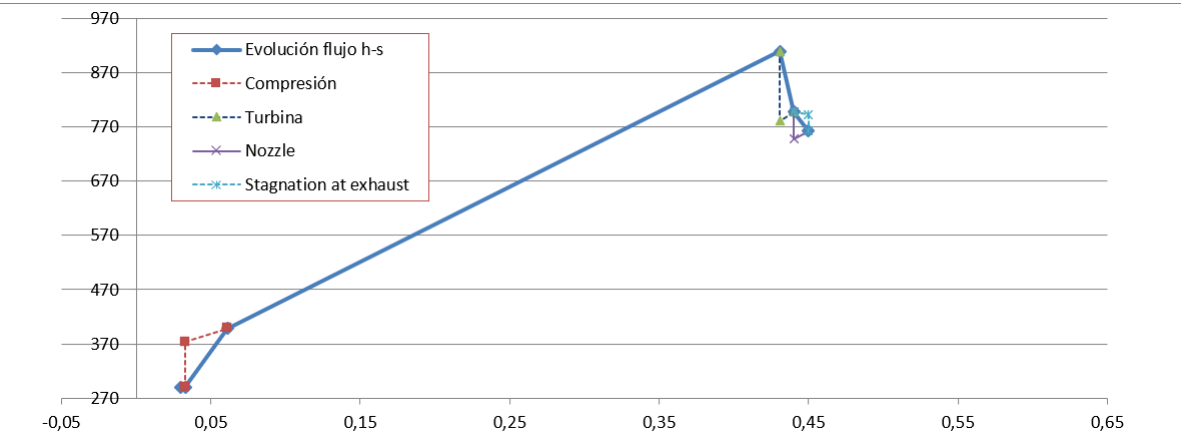


Figura 5.2: Ciclo termodinámico para un grado de carga del 30 %

5.1.3. Tercer ensayo: Grado de carga 85 %

En el tercer ensayo se tomaron las medidas experimentales para un grado de carga del 85 %. Se mostrará en una tabla las presiones y temperaturas obtenidas a partir de los instrumentos mencionados anteriormente, además de las emisiones y otros datos de interés.

Medidas principales. Obtenidas con el banco de ensayo.

- Temperatura gases de escape (EGT): 704 °C
- Revoluciones: 104 krpm
- Empuje: 19.5 kg
- Consumo de combustible: 751 ml/min

Medidas secundarias. Obtenidas con los termómetros y manómetro.

Presión (bar)	Temperatura (°C)
$PS1 = -0,028$	$Tt1 = 15,7$
$PS3 = 2,468$	$Tt3 = 187$
$PT3 = 2,723$	$Tt4 = 832$
$PT4 = 2,459$	$Tt5 = 664$
$PT5 = 0,53$	$Tt6 = 667$

Tabla 15: Presiones y temperaturas para un grado de carga del 85 %

Emisiones obtenidas con el equipo Testo 350.

O_2	17.09 %
CO_2	2.6223 %
CO	1155 ppm
NO	14 ppm
NO_2	6.7 ppm
H_2	113 ppm

Tabla 16: Emisiones para un grado de carga del 85 %

Una vez que tenemos las medidas experimentales, las comparamos con el modelo matemático.

Rendimiento mecánico eje	0.98
Pérdidas de presión total en C.C	7.18 %
Pérdidas de presión en toma dinámica	5.4 %
Contracción del flujo de gases	3 %
Fracción de combustible para lubricar	0.2
Presión punto 1	0.7713 bar
Relación de compresión	4.05
Rendimiento compresor TT	0.698
Presión punto 2	3.65802 bar
Presión punto 3	3.24350 bar
Presión punto 4	1.011 bar
Volumen de humos secos	770
Mezcla aire	1.28037
Rendimiento C.C	0.9514
Flujo de aire	0.4631 kg/s
Flujo de combustible total	0.47112 kg/s
Flujo de combustible quemado	0.0079606
Flujo de combustible lubricación	0.46316
Dosado	1/46.545
Rendimiento turbina TE	0.5744
Rendimiento turbina TT	0.8018
Rendimiento térmico	11.046
Pérdida de calor en la tobera	0.5546 %
Calor del combustible	757.536 kJ/kg aire
Calor aportado al ciclo	720.729 kJ/kg aire

Tabla 17: Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para un grado de carga del 85 %

También se adjunta el gráfico del ciclo termodinámico.

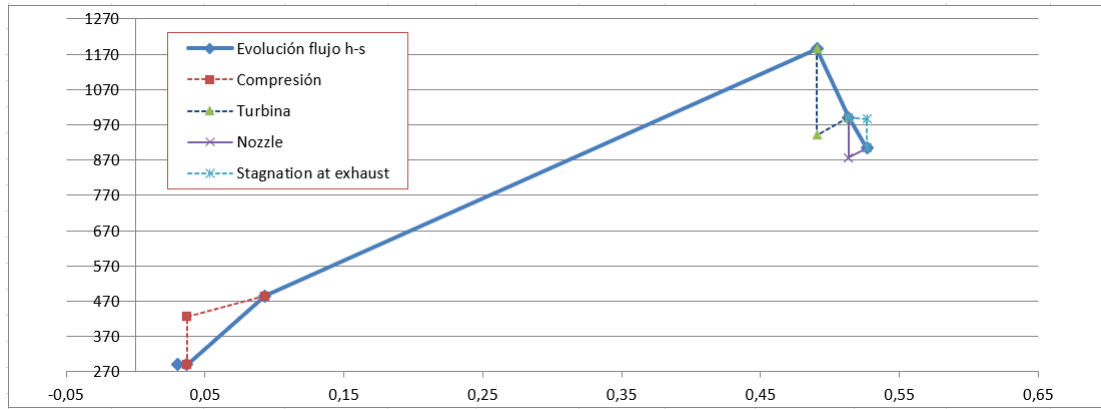


Figura 5.3: Ciclo termodinámico para un grado de carga del 85 %

5.1.4. Cuarto ensayo: Grado de carga 100 %

En el cuarto ensayo se tomaron las medidas experimentales para un grado de carga del 100 %. Se mostrará en una tabla las presiones y temperaturas obtenidas a partir de los instrumentos mencionados anteriormente, además de las emisiones y otros datos de interés.

Medidas principales. Obtenidas con el banco de ensayo.

- Temperatura gases de escape (EGT): 814 °C
- Revoluciones: 108.5 krpm
- Empuje: 22.1 kg
- Consumo de combustible: 876 ml/min

Medidas secundarias. Obtenidas con los termómetros y manómetro.

Presión (bar)	Temperatura (°C)
$PS1 = -0,028$	$Tt1 = 15,8$
$PS3 = 2,746$	$Tt3 = 208$
$PT3 = 2,947$	$Tt4 = 935$
$PT4 = 2,708$	$Tt5 = 741$
$PT5 = 0,623$	$Tt6 = 734$

Tabla 18: Presiones y temperaturas para un grado de carga del 100 %

Emisiones obtenidas con el equipo Testo 350.

O_2	16.76 %
CO_2	2.8069 %
CO	1300 ppm
NO	19 ppm
NO_2	5.8 ppm
H_2	88 ppm

Tabla 19: Emisiones para un grado de carga del 100 %

Una vez que tenemos las medidas experimentales, las comparamos con el modelo matemático.

Rendimiento mecánico eje	0.98
Pérdidas de presión total en C.C	6.1 %
Pérdidas de presión en toma dinámica	4.85 %
Contracción del flujo de gases	2.5 %
Fracción de combustible para lubricar	0.2
Presión punto 1	0.76874 bar
Relación de compresión	4.27
Rendimiento compresor TT	0.68
Presión punto 2	3.88016 bar
Presión punto 3	3.47860 bar
Presión punto 4	0.991 bar
Volumen de humos secos	735
Mezcla aire	1.36263
Rendimiento C.C	0.9538
Flujo de aire	0.47507 kg/s
Flujo de combustible total	0.48435 kg/s
Flujo de combustible quemado	0.0092856 kg/s
Flujo de combustible lubricación	0.47507 kg/s
Dosado	1/40.929
Rendimiento turbina TE	0.5333
Rendimiento turbina TT	0.7835
Rendimiento térmico	11.83 %
Pérdida de calor en la tobera	0.9139 %
Calor del combustible	861.467 kJ/kg aire
Calor aportado al ciclo	821.724 kJ/ kg aire

Tabla 20: Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para un grado de carga del 100 %

También se adjunta el gráfico del ciclo termodinámico.

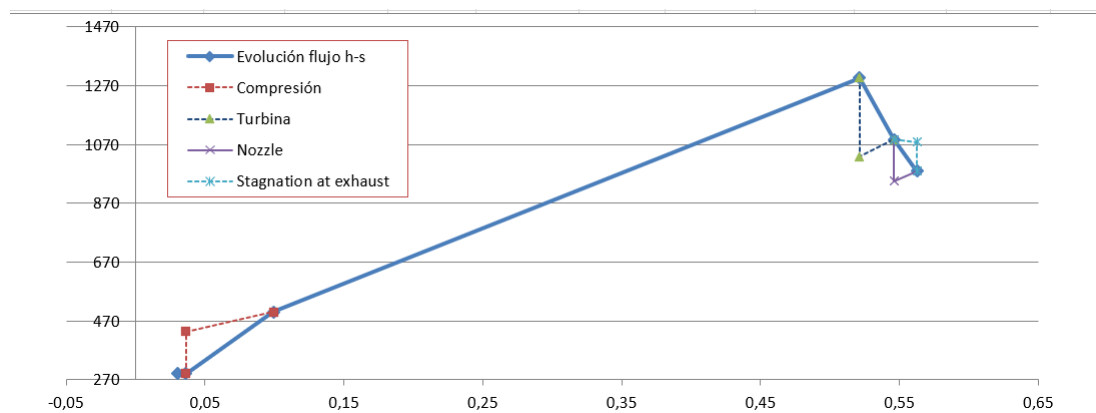


Figura 5.4: Ciclo termodinámico para un grado de carga del 100 %

A continuación, en la figura 4.5 se muestran las propiedades termodinámicas para los cuatro grados de carga ensayados.

Cycle	H ₁ , HO	10	1	20s	20	2	30	3	40s	40	4 (***)	4s	s _s	50	s
T(K)	289,25	289,25	287,9480136	314,572345	324,8150908	324,323187	824,483172	816,4907572	776,780662	788,63	778,808159	767,1063966	776,799736	750,87	741,4355929
p(bar)	0,962	0,939874	0,92515	1,29047	1,29047002	1,28362	1,25947627	1,216	1,01589179	1,01589178	0,971	0,971	0,962	1,006881295	0,962
h(kJ/kg)	290,551625	290,55163	289,2437796	315,98792	326,2767587	325,782641	853,340083	845,0679337	803,967985	816,2305	806,066445	793,9551205	803,9877268	777,15045	767,3858386
s(kJ/kgK)	0,03005247	0,03025273	0,03295273	0,046931013	0,046931013	0,04693101	0,046866361	0,046866361	0,0475468618	0,047546862	0,047546862	0,0468663609	0,0475468618	0,0453160538	0,0453160538
v (m³/kg)	0,85377992	0,883254	0,89377225	0,69962008	0,722400307	0,7251426	1,87877037	1,927079336	2,19448619	2,227961802	2,30193555	2,267348464	2,31749462	2,140269077	2,21197521
rho (kg/m³)	1,17126202	1,1321771	1,119479563	1,42934721	1,384274052	1,3790391	0,53226303	0,518919995	0,45568753	0,448840729	0,43441703	0,441043808	0,431503285	0,467230971	0,452084633
c (m/s)	0	0	51,14382381	0	31,4362052	0	128,6246403	0	142,587553	0	142,587553	211,0778505	156,4884866	546,0629373	139,7469955
a (m/s)	340,911499	340,9115	340,1433696	355,520981	361,2626516	360,988998	572,204439	509,424253	555,40467	559,6248246	556,129036	551,9523433	555,414888	546,0629373	542,6215526
nu (m²/s)	1,48E-05	1,5E-05	1,471E-05	1,74E-05	1,852E-05	1,88E-05	8,87E-05	8,79E-05	8,05E-05	8,25E-05	8,1E-05	7,887E-05	8,05E-05	7,61772E-05	7,4628E-05
Reynolds Nr.	0	0	152993,52	0	0	34052,4	0	32416,17	0	0	42333,2	64228,747	113217,84	0	109059,1491

(a) Propiedades termodinámicas para un grado de carga del 7 %

Cycle	H ₁ , HO	10	1	20s	20	2	30	3	40s	40	4 (***)	4s	s _s	50	s
T(K)	289,25	289,25	283,994515	371,605253	396,3439576	395,480085	878,099399	865,4937345	754,261623	770,14	741,81314	726,5187926	722,124162	766,01	736,0992545
p(bar)	0,962	0,939874	0,88145	2,31209004	2,31209004	2,2945	2,09937776	1,99271	1,21338469	1,21338469	1,06	1,06	0,962	1,110597221	0,962
h(kJ/kg)	290,551625	290,55163	285,2724903	373,277477	398,1275054	397,259745	908,832878	895,7860152	780,66078	797,0949	767,7766	751,9469503	747,3985077	792,82035	761,8627284
s(kJ/kgK)	0,03005247	0,03295273	0,03295273	0,046931013	0,046931013	0,04693101	0,046866361	0,046866361	0,0475468618	0,047546862	0,047546862	0,0468663609	0,0475468618	0,0453160538	0,0453160538
v (m³/kg)	0,85377992	0,883254	0,924685754	0,6127402	0,491982206	0,49467328	1,20042487	1,2465271	1,78404332	1,821600202	2,00849407	1,967083891	2,154362105	1,97951936	2,196054948
rho (kg/m³)	1,17126202	1,1321771	1,081448476	2,16790876	2,032593837	2,02153631	0,83303839	0,802228848	0,5605245	0,54896788	0,49788546	0,508366725	0,464174522	0,505173135	0,455362012
c (m/s)	0	0	102,7534395	0	41,6595802	0	161,5355242	0	242,149955	0	242,149955	300,4927609	315,2662122	248,827738	540,6653198
a (m/s)	340,911499	340,9115	337,8002311	386,407804	399,0626544	398,627518	590,5116673	586,2627333	547,29481	553,0255096	542,759689	537,1353691	535,5083692	551,540672	540,6653198
nu (m²/s)	1,48E-05	1,5E-05	1,431E-05	2,36E-05	2,64E-05	2,6E-05	9,83E-05	9,599E-05	7,67E-05	7,938E-05	7,5E-05	7,22E-05	7,15E-05	7,86891E-05	7,37572E-05
Reynolds Nr.	0	0	315908,09	0	0	31633,6	0	37024,307	0	0	77809,9	99881,719	267257,42	0	204467,604

(b) Propiedades termodinámicas para un grado de carga del 30 %

Cycle	H ₁ , HO	10	1	20s	20	2	30	3	40s	40	4 (***)	4s	s _s	50	s
T(K)	289,25	289,25	275,8969067	424,564521	483,1103448	482,070525	1145,54126	1128,79417	909,613674	956,798	859,351782	816,9729989	847,5943408	953,022	873,5370009
p(bar)	0,962	0,910052	0,7713	3,6857106	3,6857106	3,65802	3,42107658	3,2435	1,48929636	1,48929637	1,011	1,011	0,962	1,316952515	0,962
h(kJ/kg)	290,551625	290,55163	277,1384428	426,475061	485,2843414	484,239842	1185,63521	1168,239866	941,450153	990,28593	889,429094	845,5670539	877,2601427	986,37777	904,1107959
s(kJ/kgK)	0,03005247	0,0369717	0,0369717	0,03697172	0,093326817	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682	0,09332682
v (m³/kg)	0,85377992	0,9121979	1,026609779	0,33060115	0,376189788	0,37822166	0,96101428	0,988756611	1,75290246	1,843830643	2,43950506	2,319201293	2,528685819	2,076895795	2,606082321
rho (kg/m³)	1,17126202	1,0962534	0,974079948	3,02479284	2,65823771	2,64395221	1,04056727	1,00744937	0,5704824	0,54234916	0,40991922	0,431182926	0,395462336	0,481487806	0,383717733
c (m/s)	0	0	163,787587	0	45,7055626	0	186,5226117	0	449,125453	0	449,125453	537,9941935	475,4488138	405,6278444	588,9805822
a (m/s)	340,911499	340,9115	332,9495114	413,025453	440,5834048	440,109006	674,474746	669,508601	601,019848	616,4111044	584,178831	569,5923869	580,1687715	615,1935698	588,9805822
nu (m²/s)	1,48E-05	1,5E-05	1,351E-05	2,98E-05	3,7E-05	3,7E-05	0,000152	0,0001484	0,000104	0,0001131	9,5E-05	8,738E-05	9,277E-05	0,000112337	9,74434E-05
Reynolds Nr.	0	0	533623,4	0	0	24793,6	0	27657,509	0	0	113610	147770,05	318155	0	258420,5333

(c) Propiedades termodinámicas para un grado de carga del 85 %

Cycle	H ₁ , HO	10	1	20s	20	2	30	3	40s	40	4 (***)	4s	s _s	50	s
T(K)	289,25	289,25	275,1787996	431,744388	498,8005707	497,763999	1259,96527	1241,381133	998,857327	1049,99	921,233029	876,3705949	913,6772083	1042,91	946,3196729
p(bar)	0,962	0,915343	0,76874	3,90851461	3,90851461	3,88016	3,67009522	3,4786	1,58842376	1,58842376	0,991	0,991	0,962	1,365815585	0,962
h(kJ/kg)	290,551625	290,55163	276,4171042	433,687238	501,0451733	500,003937	1304,06406	1284,829473	1033,81733	1086,73965	953,476185	907,0435657	945,6559116	1079,41185	979,4408615
s(kJ/kgK)	0,03005247	0,0362491	0,03624915	0,03624915	0,099231541	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154	0,09923154
v (m³/kg)	0,85377992	0,9069251	1,027347549	0,31702744	0,366266416	0,36817623	0,98528788	1,024194749	1,80475803	1,897145696	2,66795035	2,535939257	2,54603382	2,076895795	2,606082321
rho (kg/m³)	1,17126202	1,1026269	0,973380431	3,15430106	2,730253052	2,71609061	1,0149318	0,976376808	0,5540909	0,527107645	0,37481957	0,394007021	0,366860018	0,456313519	0,354205505
c (m/s)	0	0	168,1399898	0	45,634124	0	196,1355885	0	449,125453	0	449,125453	537,9941935	475,4488138	405,6278444	588,9805822
a (m/s)	340,911499	340,9115	332,515927	416,503175	447,6807672	447,215356	707,358558	702,1225067	629,813629	645,7328875	604,846364	589,9350814	602,3608263	643,5521421	613,0265141
nu (m²/s)	1,48E-05	1,5E-05	1,343E-05	3,06E-05	3,902E-05	3,9E-05	0,000178	0,0001737	0,000121	0,0001317	0,00011	9,796E-05	0,0001049	0,000130235	0,000111047
Reynolds Nr.	0	0	550682,57	0	0	23469,1	0	24838,912	0	0	116587	146875,68	316117,17	0	251263,2427

(d) Propiedades termodinámicas para un grado de carga del 100 %

Figura 5.5: Propiedades termodinámicas para los distintos grados de carga.

5.2. Discusión de los resultados

En esta parte se discutirán los resultados obtenidos en los distintos ensayos. Se representarán los parámetros mayor relevancia los cuales se han medido directamente del banco de ensayo y también calculados con la hoja de cálculo. Al igual que ocurre con el flujo de aire la empresa AMT Netherlands nos proporcionó unas curvas donde se representan los parámetros típicos para este tipo de motor, por ello se compararán en distintas gráficas los resultados obtenidos en nuestro banco de ensayo y los proporcionados por la empresa AMT Netherlands.

5.2.1. Curva de calibración del flujo de aire

La empresa AMT Netherlands realizó una serie de medidas para determinar el flujo de aire a distintas revoluciones del motor. En concreto realizaron dos ensayos y se obtuvo la curva de calibración.

rpm		Flujo de aire corregido
rpm/min	Presión negativa	
1000/min	mm de agua	kg/s
36.5	5.0	0.1157
50.0	24.0	0.1679
62.5	44.5	0.2283
71.5	68.0	0.2755
80.5	94.0	0.3289
90.0	130.0	0.3974
100.5	178.0	0.4520
105.0	197.0	0.4704
108.5	211.5	0.4813

Tabla 21: Resultados del ensayo 1 de flujo de aire.

rpm		Flujo de aire corregido
rpm/min	Presión negativa	
1000/min	mm de agua	kg/s
36.5	5.0	0.1157
49.5	22.5	0.1678
60.5	41.0	0.2214
65.0	51.5	0.2384
70.5	60.5	0.2667
75.5	78.0	0.3010
81.0	95.0	0.3390
85.5	113.5	0.3688
90.0	131.5	0.3959
95.0	152.0	0.4255
99.5	171.0	0.4480
105.5	198.5	0.4718
108.5	211.5	0.4813

Tabla 22: Resultados del ensayo 2 de flujo de aire.

Una vez que tenemos las medidas de los dos ensayos se dibuja la curva de calibración, usada en el modelo matemático.

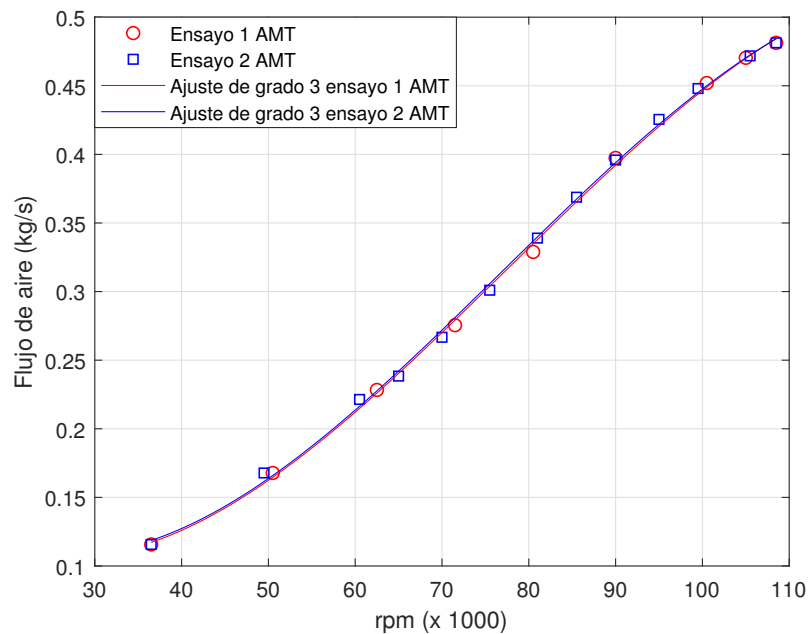


Figura 5.6: Curva de calibración obtenida con los ensayos proporcionados por la empresa AMT Netherlands

Se comprueba que el flujo de aire obtenido de la hoja de cálculo está dentro de un rango aceptable de la curva de calibración. Esto se puede ver en la figura 4.7, en la cual se observa que el flujo

de aire calculado con la hoja de cálculo está muy próximo a la curva de calibración, con lo que podemos decir que el flujo de aire calculado sigue la tendencia de la curva de calibración.

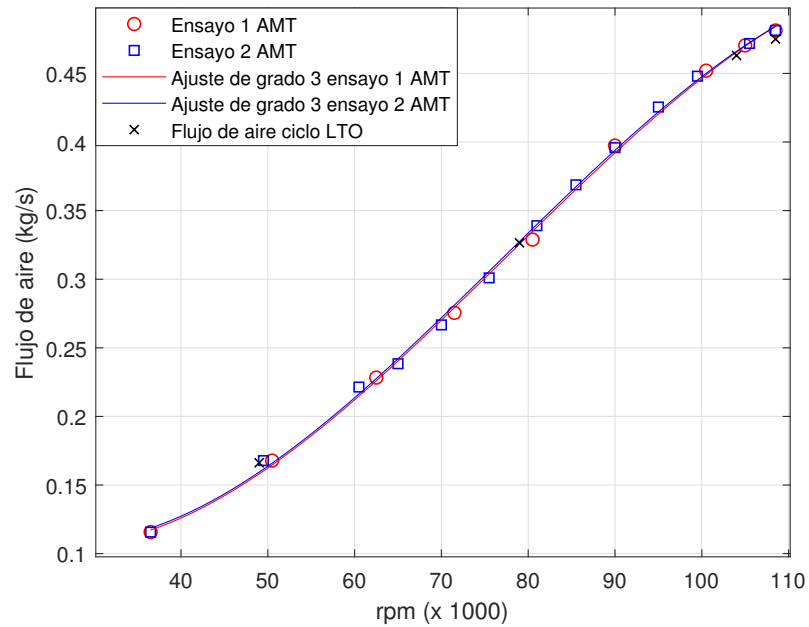


Figura 5.7: Flujo de aire calculado con la hoja de cálculo

5.2.2. Grado de carga frente a rpm

Se representan los datos proporcionados por la empresa AMT Netherlands y los datos medidos en el banco de ensayo. Los datos obtenidos en el banco de ensayos representados en la figura 4.8 son los correspondientes al ciclo LTO.

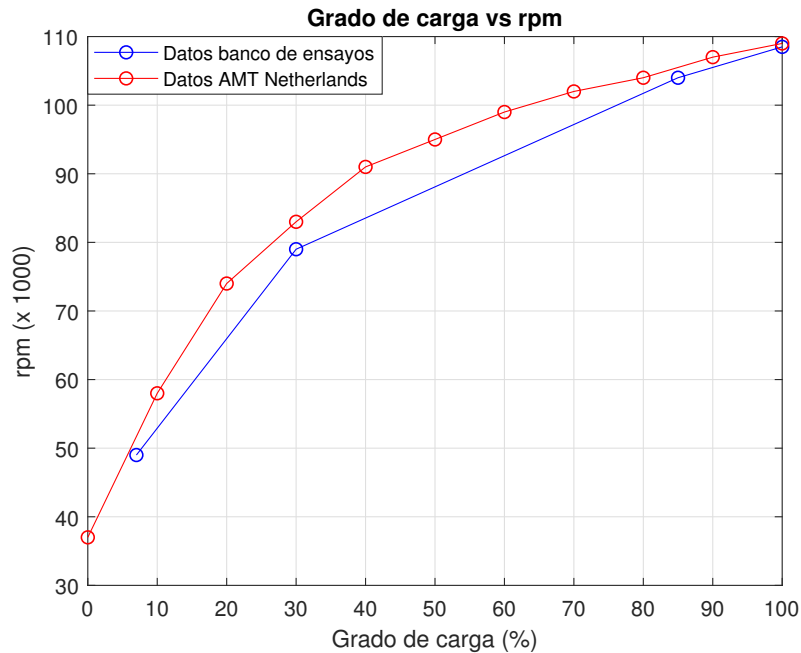


Figura 5.8: rpm vs grado de carga.

5.2.3. Grado de carga frente EGT

Se representan el grado de carga frente a la temperatura de los gases de escape. La temperatura de los gases de escape se obtiene mediante el EDT instalado en el banco de ensayo. Como se puede ver en la figura 5.2 la temperatura de la EGT medida por nuestro banco de ensayo es superior a la medida por la empresa AMT Netherlands, esto puede ocurrir por la localización en donde se hizo el ensayo ya que el clima puede afectar a la temperatura. También puede ser por la calibración de los termómetros como se ha visto en secciones anteriores, en donde hay una diferencia considerable entre la medida real y la medida por el termómetro.

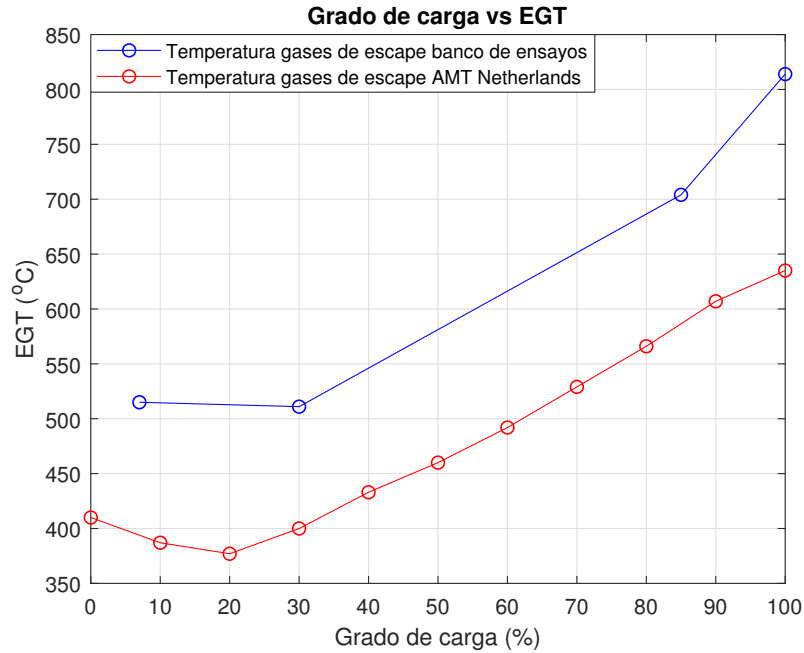


Figura 5.9: EGT vs grado de carga

5.2.4. Grado de carga frente al empuje

También se ha representado el empuje frente al grado de carga. Al igual que con la temperatura de los gases de escape el empuje se ha medido con el banco de ensayos.

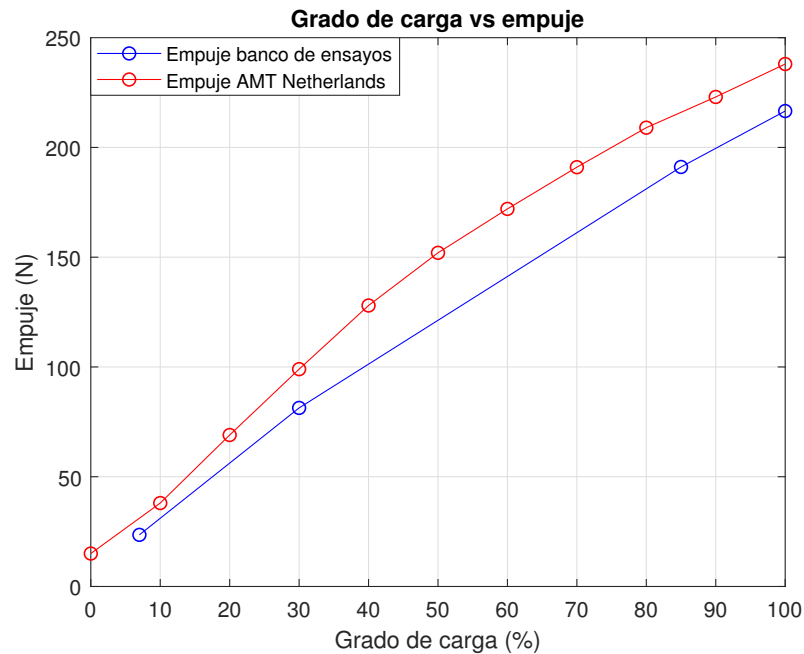


Figura 5.10: Empuje frente al grado de carga

5.2.5. Grado de carga frente al consumo de combustible

Se muestra el consumo de combustible total, el combustible quemado en la cámara de combustión y el combustible utilizado para lubricar el eje del motor, tanto el medido en nuestro propio banco de ensayo como el proporcionado por la empresa AMT Netherlands.

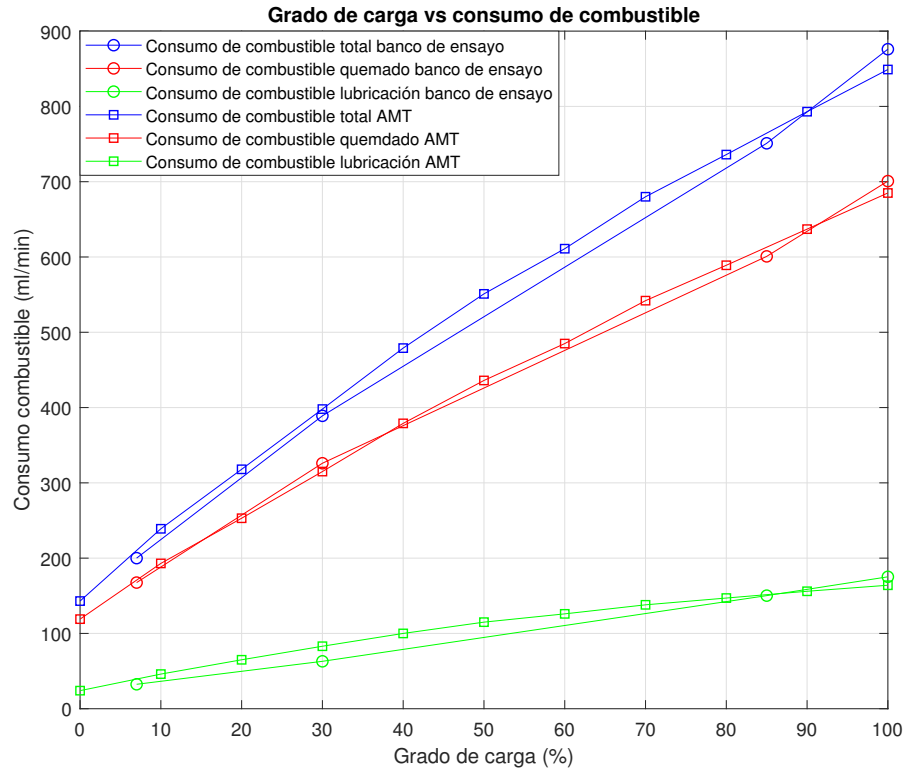


Figura 5.11: Consumo de combustible total, quemado y usado para lubricar frente al grado de carga.

5.2.6. Grado de carga frente al consumo específico de combustible

Se representa el consumo de combustible específico frente al grado de carga.

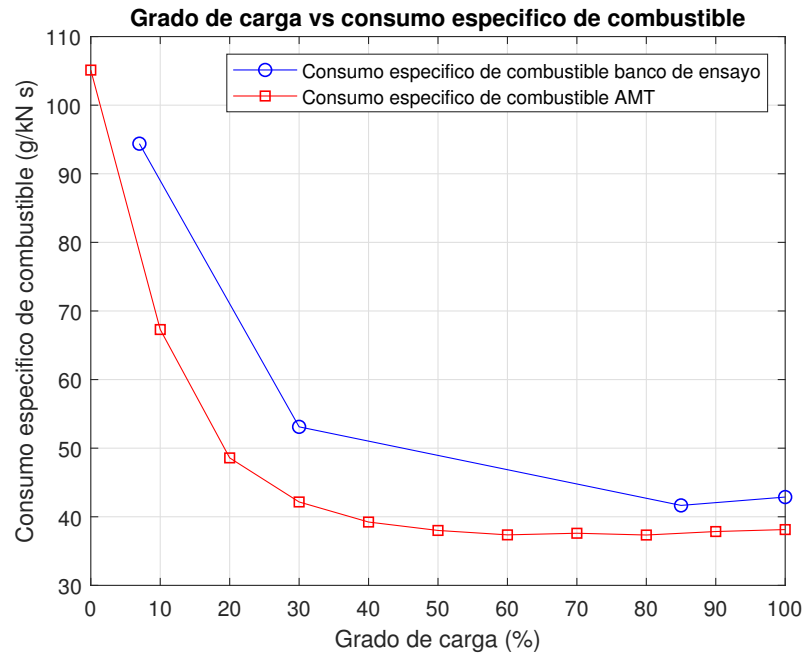


Figura 5.12: Consumo de combustible frente al grado de carga

5.2.7. Grado de carga frente al consumo específico de combustible y el empuje

Se muestra el consumo de combustible específico y el empuje frente al grado de carga.

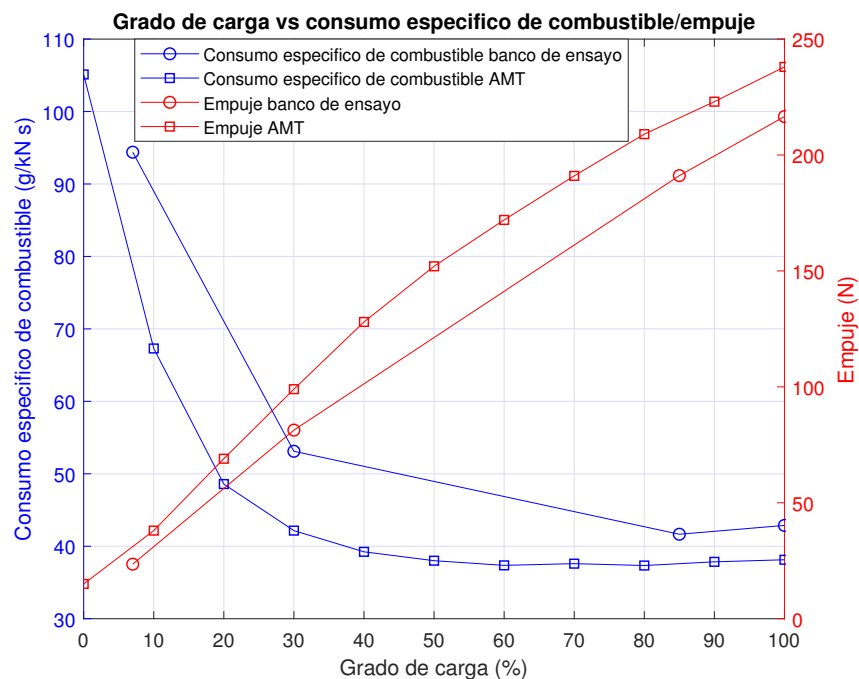


Figura 5.13: Consumo específico de combustible y empuje frente al grado de carga

5.3. Dificultades en el ensayo

Unas de las principales dificultades del ensayo fue obtener la presión a la salida del compresor, ya que al principio se usó el manómetro Airflow DM 3. Este manómetro es útil para grados de carga pequeños, ya que la presión a la que es capaz de comprimir el compresor centrífugo no es superior a 2 bar como se puede ver en la tabla 12 de resultados para el grado de carga del 7 % (1.28362 bar). En cambio, cuando se aumenta el grado de carga la relación de compresión aumenta por lo que la presión puede llegar a superar los 2 bares, esto fue lo que ocurrió para el resto de grados de carga (30 %, 85 % y 100 %). Debido a esto se tuvo que cambiar al manómetro Chauvin Arnoux para poder medir las presiones para el resto de grados de carga del ciclo LTO.

Otra dificultad fue la toma de datos de los hidrocarburos sin quemar con el analizador de humos Testo 350. Tuvimos problemas a la hora de tomar los datos de hidrocarburos sin quemar ya que a la hora de la medición en el lector indicaba que los hidrocarburos sin quemar eran 0. Esto ocurre porque el combustible sin quemar sale totalmente vaporizado, al estar en este estado, el analizador no lo tiene en cuenta ya que el analizador toma las muestras de los humos en base seca, por lo que el combustible sin quemar no lo tiene en cuenta.

Además las medidas de las emisiones se iban a tomar en principio en un tubo de aluminio, el cual estaba centrado con la salida de la tobera. En este tubo se hizo un agujero para poder insertar la lanza y así poder tomar las medidas de las emisiones. El problema fue que la lanza estaba demasiado alejada de la salida de la tobera y esto provocó que los gases de escape se mezclaran con el aire ambiental haciendo que el volumen de oxígeno medido fuese el ambiental, es decir, 21 %. Esto es erróneo ya que como se vio en la sección anterior de resultados, el volumen de oxígeno es menor del 21 %. Para poder tomar la medida lo más fiable posible se colocó la lanza a mano justo en la salida de la tobera y centrada con la misma.

Este proceso se pudo hacer para los grados de carga del 7 % y 30 %, para los grados de carga del 85 % y 100 % la lanza se situó un poco más alejada de la tobera debido a que para estos grados de carga el empuje que llegaba a generar el motor era muy elevado, por lo que no era posible sujetar y mantener la lanza justo a la salida de la tobera.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha explicado como se ha puesto a punto el banco de ensayo para una turbina de reacción. Además a través de un modelo matemático se ha podido obtener otros parámetros que no se pueden obtener de forma experimental. Además se realizó el ciclo LTO que consta de cuatros fases, por lo que se tuvieron que hacer cuatros ensayos. Aunque se han tenido algunas dificultades para la toma de datos, al final el proceso de toma de datos es sencillo ya que la medida de la temperatura se puede obtener fácilmente con los termómetros y con el nuevo manómetro se puede medir la presión en todo el rango de carga que tiene el motor.

- Se ha discutido sobre el poder calorífico obtenido de los distintos ensayos con la bomba calorimétrica. Ya que el primer ensayo el poder calorífico superior era demasiado pequeño y en el segundo ensayo, realizado días posteriores, los resultados se asemejan más a otros valores encontrados. Esto pudo ocurrir por un error en la calibración de la bomba.
- A la hora de medir la presión a la salida del compresor entrada de la cámara de combustión, para un grado los grados de carga superiores al 7 % el manómetro Airflow DM3 daba un error ya que la presión que se alcanzaba en la salida del compresor era superior a la que era capaz de medir el dispositivo. Para solventar este problema todas las presiones se midieron con el manómetro CHAUVIN ARNOUX.
- Para poder medir las emisiones correctamente la lanza del analizador de humos se colocó justo a la salida de la tobera ya que si se colocaba demasiado lejos el aire del ambiente se mezclaba con los gases de escape del motor produciendo un error en la medición del volumen de oxígeno.
- Otro dato importante a comentar es el gráfico del ciclo termodinámico para un grado de carga del 7 %, figura 4.1. En ella se puede ver que la expansión en la tobera se realiza hacia la izquierda en vez de a la derecha, es decir, el punto a la salida de la tobera tiene menos entropía que a la entrada. Esto ocurre porque en la tobera se pierde más calor que el flujo entálpico que sale de la tobera. Por el contrario, para el resto de grados de carga (30 %, 85 % y 100 %) no ocurre este fenómeno. Para estos grados de carga las pérdidas de calor en la tobera son menores que el flujo entálpico que sale de la tobera por lo que se genera entropía.
- El ruido que es capaz de producir la turbina a reacción es muy elevado por lo que fue necesario utilizar protectores auditivos. También debido al elevado ruido y la gran longitud que tiene el chorro de gases de escape (aproximadamente 12 metros) el banco de ensayo tuvo que ser movido al tejado del edificio A3 donde se realizaron todos los ensayos para evitar molestar al resto de edificios.
- La curva de calibración es muy parecida a la obtenida en los distintos ensayos como se puede ver en la figura 6.1.
- Hay una pequeña variación en la temperatura de la EGT obtenida con el banco de ensayo y los datos proporcionados por AMT Netherlands. Esto puede ocurrir debido a la distinta calibración del sensor de la EGT. Esto también ocurre con la célula de carga donde se puede ver que varía el empuje con respecto al proporcionado por AMT Netherlands.

- El consumo de combustible quemado, para lubricación y total es idéntico a los datos proporcionados por la empresa AMT Netherlands. Esto puede sugerir que el caudalímetro utilizado es el mismo en ambos casos y con la misma calibración.

Bibliografía

- [AIRFLOW, 2022] AIRFLOW (2022). Digital-Manometer DM3. <https://www.airflow.de/produkte/messgeraet-serie/digital-manometer-dm3/>.
- [CICT,] CICT. AQ07-Analizador elemental automático CHNS 2. <https://www.ujaen.es/servicios/scai/recursos/aq07-analizador-elemental-automatico-chns-2>.
- [ICAO, 2020] ICAO (2020). *Airport Air Quality Manual*. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION.
- [instrument Company,] instrument Company, P. *6050 Compensated Jacket Calorimeter, Operating instruction Manual*. Parr instrument Company.
- [José, 2015] José, ROVIRA DE ANTONIO Antonio y Marta, M. D. (2015). *Motores de combustión interna*. Editorial UNED.
- [José,] José, M. Palomar Carnicero y Fernando Cruz, P. *APUNTES DE TEORÍA MÁQUINAS TÉRMICAS*. Universidad de Jaén.
- [Lana,] Lana, S. Termómetro industrial Kane KM330. <https://www.lanasarrate.es/tienda/medidores-de-temperatura/termometro-digital-km330/>.
- [Morales, 2021] Morales, J. C. Z. (2021). *ESTUDIO EXPERIMENTEAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE DISTINTOS COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN MCIA*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [Netherland, 2022] Netherland, A. (2022). *Instructions for Olympus HP University test stand October 2022*. AMT Netherland.
- [Netherlands, a] Netherlands, A. *Kerosene igniter replacement instructions*. AMT Netherlands.
- [Netherlands, b] Netherlands, A. *Manual Olympus HP V30C*. AMT Netherlands.
- [Netherlands, c] Netherlands, A. *RPM SENSOR – REPLACEMENT*. AMT Netherlands.
- [Omega, 2023] Omega (2023). ¿Qué es una célula de carga y cómo funciona? <https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>.
- [Saravanamuttoo et al., 2019] Saravanamuttoo, H. I., Rogers, G. F. C., and Cohen, H. (2019). *Gas turbine theory*. Pearson education.
- [Sino-Inst,] Sino-Inst. ¿Qué es el factor K del medidor de flujo? ¿Y cómo calcularlo? <https://www.drurylandetheatre.com/es/what-is-flow-meter-k-factor/>.
- [Tecflow,] Tecflow. *Technical details of the IR-Opflow turbine flowmeter*. Tecflow International.
- [TECPEL,] TECPEL, C. TECPEL. <http://tecpeel.net/DTM-305.html>.
- [testo,] testo. *Manual Testo 350, Analizador de gases de combustión*. testo.

[Tools, 2023] Tools, I. (2023). Speed Probe Working Principle. <https://instrumentationtools.com/speed-probe-working-principle/>.

[WIKA, 2023] WIKA (2023). Termopares. https://www.wika.es/landingpage_thermocouple_es_es.WIKA.

ANEXO: Manual del banco de ensayos

1. Descripción del sistema

En este apartado se describirá como está conectado la turbina con los diferentes sensores del banco. Para ello se mostrará la figura 1.1 como un esquema de como están instalados los sensores principales. En este esquema no vienen como están conectados los termómetros adicionales y el manómetro. Además, viene como están conectadas las tuberías que llevan el combustible del depósito a la turbina.

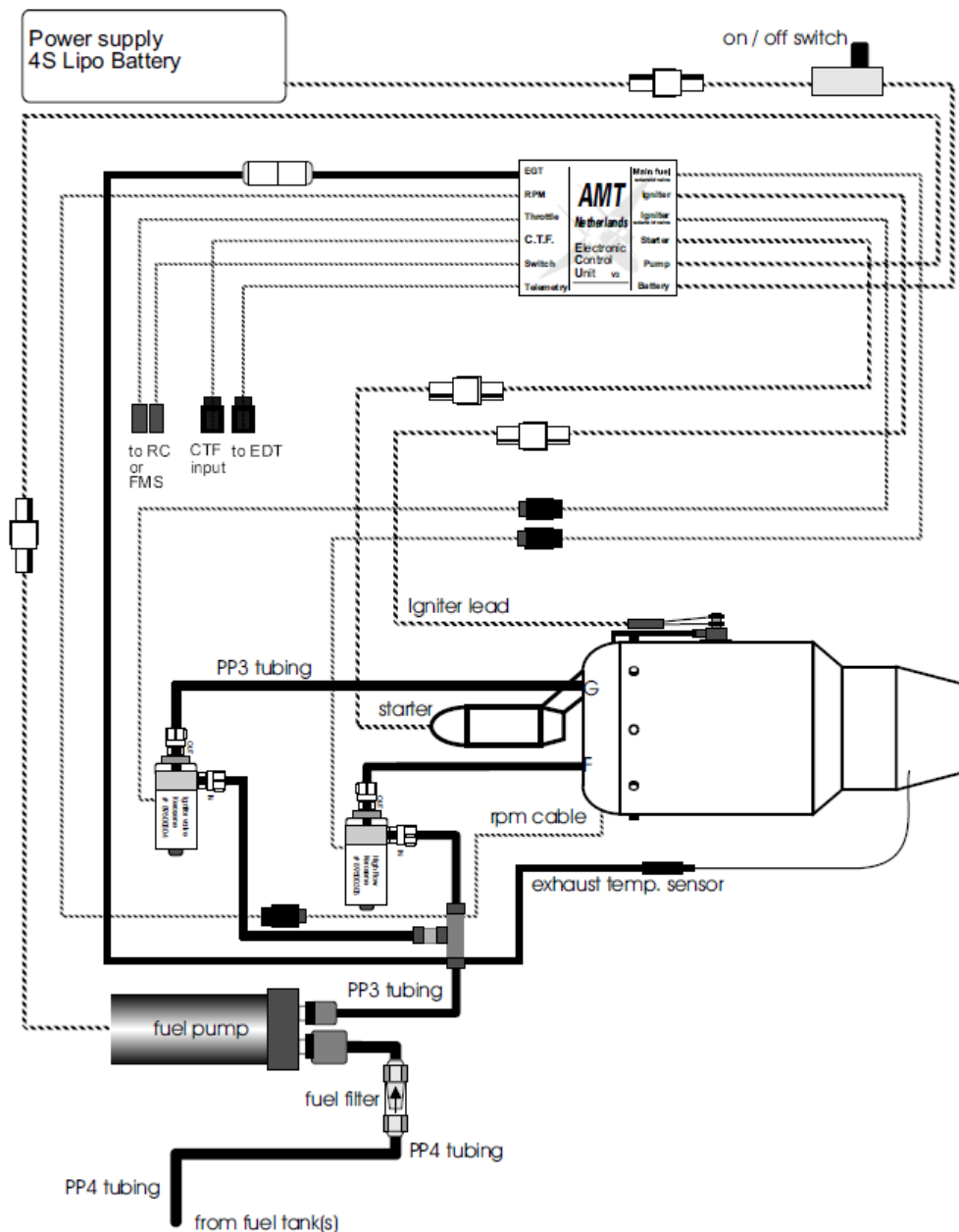


Figura 1.1: Esquema del sistema de sensores

En la figura 1.1 se puede ver como están conectados los sensores que tiene instalados la turbina de forma predeterminada. Este esquema que aparece es en el caso de si nuestra turbina no estuviera sujeta al banco de ensayo. Es decir en nuestro caso, el sistema **CTF input** está conectado directamente a la ECU y se puede activar manteniendo pulsado el botón **CTF** de la unidad de control (figura 2.7) y **to EDT** representa la telemetría, esta se muestra en el EDT o (Engine Data Terminal, figura 1.2). Los otros dos sistemas **to RC or FMS** están conectados al mando de control.



Figura 1.2: Engine Data Terminal

Un esquema donde se muestra lo comentado en el párrafo anterior, se muestra en la siguiente figura:

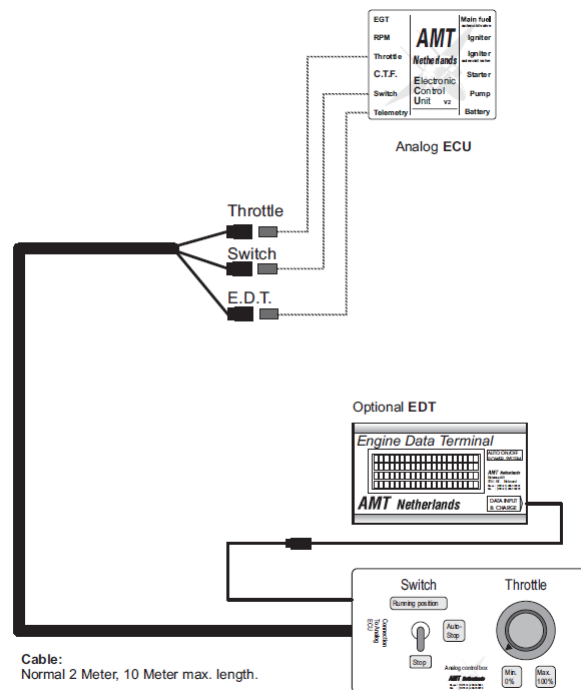


Figura 1.3: Sistema conectado con el mando de control y la ECU

Además en la figura 1.1 aparece una batería con el nombre **Power supply 4S Lipo Battery**. Esta batería no se tiene en cuenta ya que por detrás de la unidad de control tiene una salida para poder enchufarla la red.

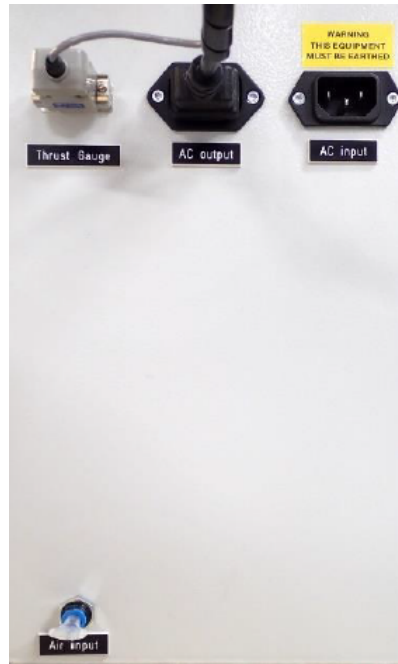


Figura 1.4: Parte trasera de la unidad de control

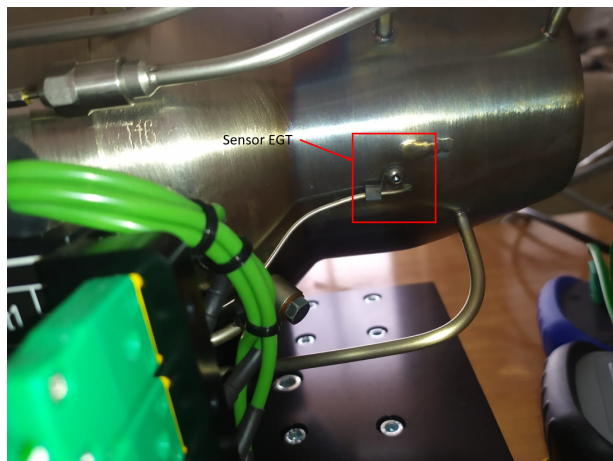
La entradas/salidas de una unidad de control son:

- Entrada AC 220/240 V.
- Salida AC 220/240 V para la medición del flujo de combustible.
- Conector de entrada del medidor de empuje.

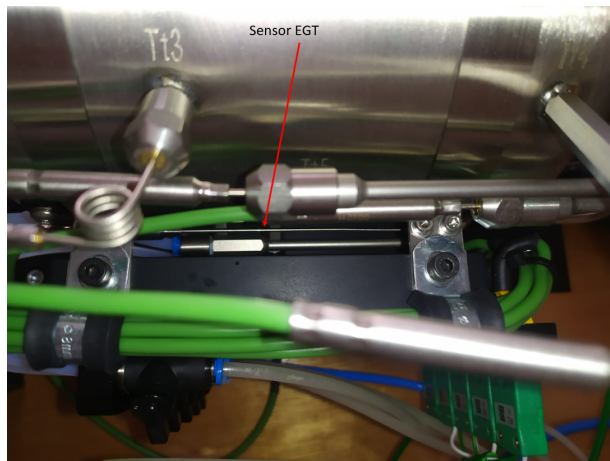
El resto del sistema de tubería que aparece en la figura 1.1 ya están instalados en el banco, situados en la parte inferior de la mesa.

1.1. Sensor EGT

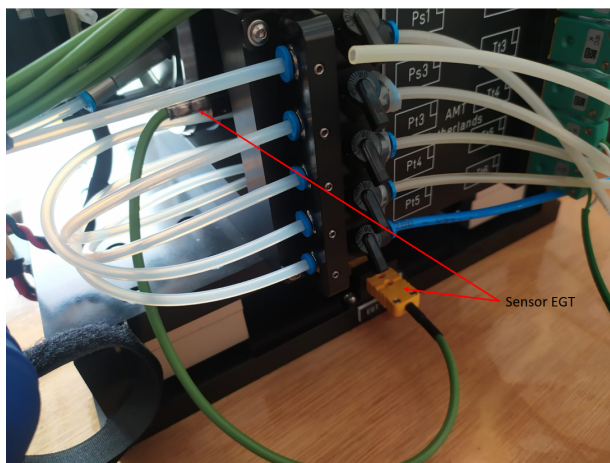
El cable del sensor de la EGT (temperatura de los gases de escape) viene ya instalado. En las siguientes figuras se muestra por donde pasa el cable de la EGT.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.5: Localización del sensor EGT

Ahora se explicará como están conectados los termómetros adicionales para medir la temperatura en puntos concretos de la turbina. Para ello se muestra un esquema donde se muestran donde están ubicados dichos sensores. Los sensores con nomenclatura Tt corresponde a sensor de temperatura y los sensores con nomenclatura Ps, Pt corresponde a presión estática y total respectivamente.

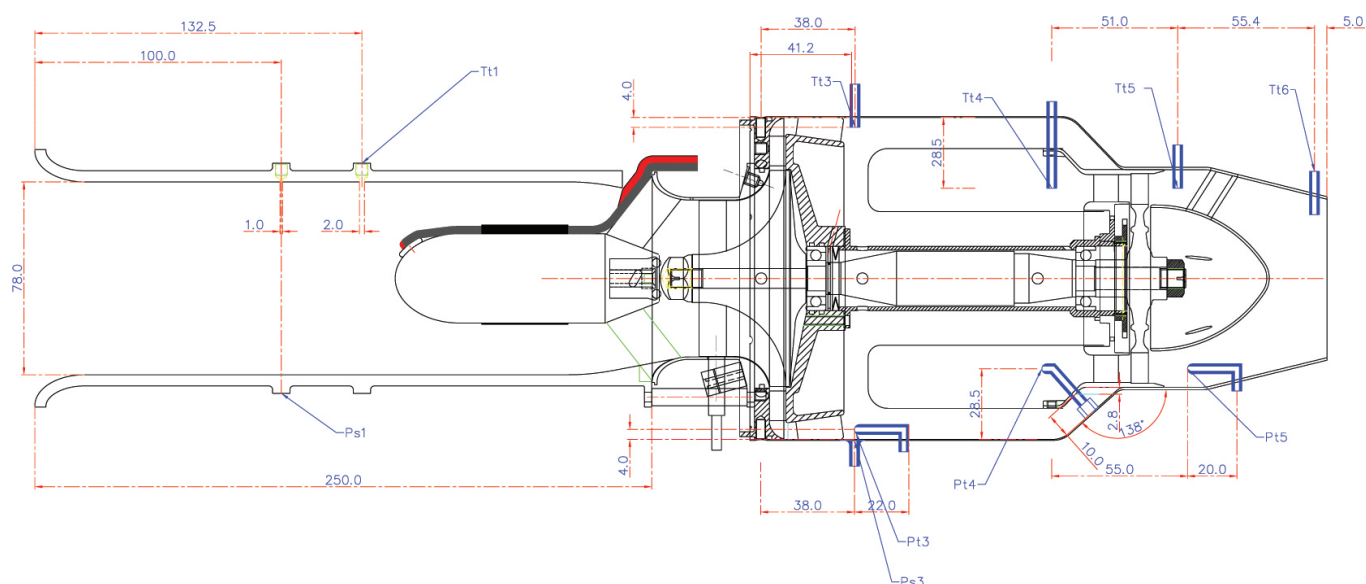


Figura 1.6: Esquema de la localización de los sensores adicionales

1.2. Sensores de temperatura

- Tt1: Temperatura a la entrada del compresor. El conector está fabricado en acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt3: Temperatura a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt4: Temperatura a la entrada de la turbina o salida de la cámara de combustión. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor está hecho con una aleación de níquel y cromo también llamadas aleaciones de inconel. Estas aleaciones se suelen usar en aplicaciones de altas temperaturas. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt5: Temperatura a la entrada de tobera o salida de la turbina. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.
- Tt6: Temperatura a la salida de la tobera. El conector está fabricado en acero inoxidable, el tubo dentro del motor es de acero inoxidable. Es un sensor tipo K de 1.5 mm de diámetro.

Para conectar los termómetros al panel de control se usan unos adaptadores tipo K de la forma que se muestra en la figura 1.6. Cada termómetro tiene una etiqueta que muestra a cuál sensor está conectado y por lo tanto midiendo la temperatura de ese punto en concreto. Para el caso del termómetro TECPEL 307, este tiene dos etiquetas ya que tiene dos salidas en vez de una. Para cambiar de punto simplemente hay que pulsar T1 o T2 para elegir los distintos puntos a los que está conectado. En este caso T1 corresponde con el sensor Tt3 y T2 corresponde con el sensor Tt6.



Figura 1.7: Conexión termómetro al panel de sensores

1.3. Sensores de presión

En la figura 1.5 también se muestra la localización de los sensores de presión. Estos también tienen sus salidas en el panel de sensores. Para medir la presión primero se tiene que unir todas las salidas de presión del panel de sensores a un dispositivo que es el de la figura 1.6.

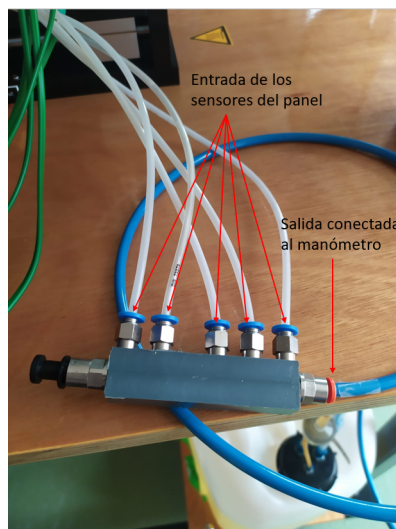


Figura 1.8: Dispositivo para conectar todas las salidas de presión del panel al manómetro

- Ps1: Presión estática a la entrada del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Ps3: Presión estática a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Pt3: Presión total a la entrada de la cámara de combustión o salida del compresor. El conector y el tubo están hechos de acero inoxidable.
- Pt4: Presión total a la entrada a la turbina o de la cámara de combustión. El conector está hecho de acero inoxidable y el tubo dentro del motor está hecho de la aleación de iniconel.
- Pt5: Presión total a la entrada de la tobera o salida de la turbina. El conector está hecho de acero inoxidable y el tubo dentro del motor está hecho de la aleación de iniconel.

1.4. Sensor de velocidad anular

Este tipo de sensor es un sensor inductivo. Durante la operación de trabajo, debido al efecto inductivo, la bobina del sensor produce el voltaje oscilante. Esto es una señal de tipo sinusoidal.

Cuando los álabes del compresor pasan cerca del pin polar del sensor, el campo magnético que rodea la bobina cambia. Como resultado de los cambios en el campo magnético, se induce un voltaje en la bobina, que es proporcional a la fuerza y velocidad de cambio del campo magnético. En la figura 2.33 se muestra la localización del sensor.

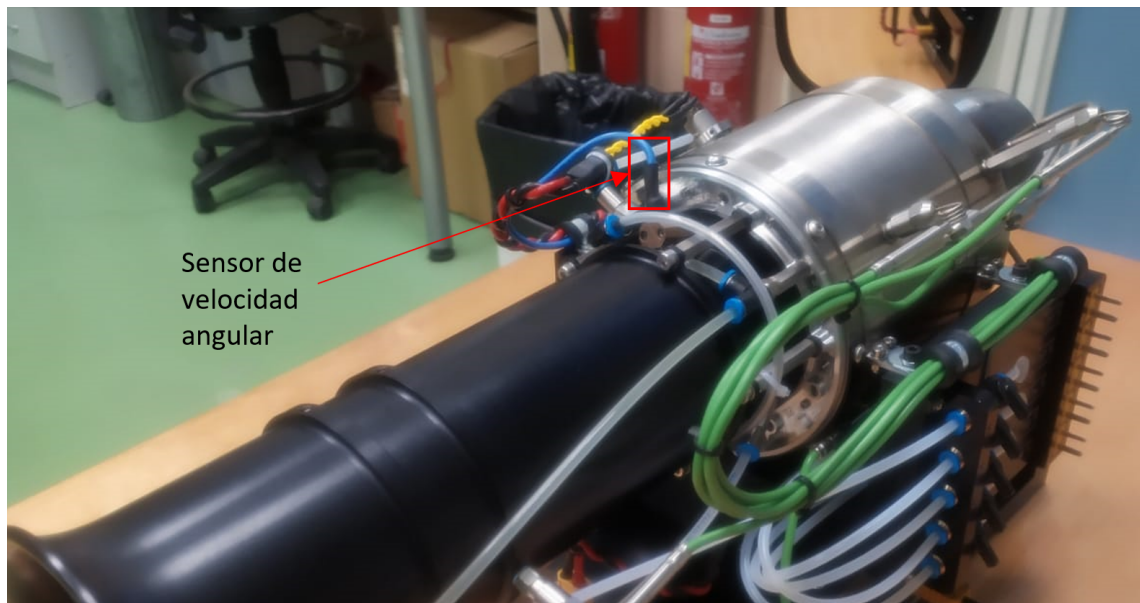


Figura 1.9: localización del sensor rpm

2. Combustible

Se pueden utilizar varios tipos de combustibles. Sin embargo la empresa AMT recomienda usar un solo tipo de combustible una vez elegido. los tipos de combustibles que hay son:

- Jet A-1: Este combustible se usa para aviación comercial.
- JP-4/Kerosene: Este combustible es usado en aviación militar.
- Parafina: Este combustible se utiliza principalmente en estufas.

La Olympus HP también utiliza combustible para lubricación, por lo que el combustible debe mezclarse previamente con 4,5 % de aceite para turbinas Aeroshell 500 antes de su uso. Este aceite se encarga de la lubricación durante las secuencias de encendido y apagado. Cuando se activa un apagado, el flujo de combustible se detiene y cada uno de los tipos de combustible anteriores se vaporizará en la turbina. En ese momento el aceite se encarga de la lubricación. Este aceite restante también lubrica la turbina durante la siguiente secuencia de inicio.

3. Seguridad

Para estar seguros cerca de la turbina hay que dejar un espacio de unos 12 metros detrás de la turbina y un espacio de 15 metros a ambos lados de la misma. También hay que dejar un espacio de 1 metro delante la misma ya que el compresor puede llegar a succionar.

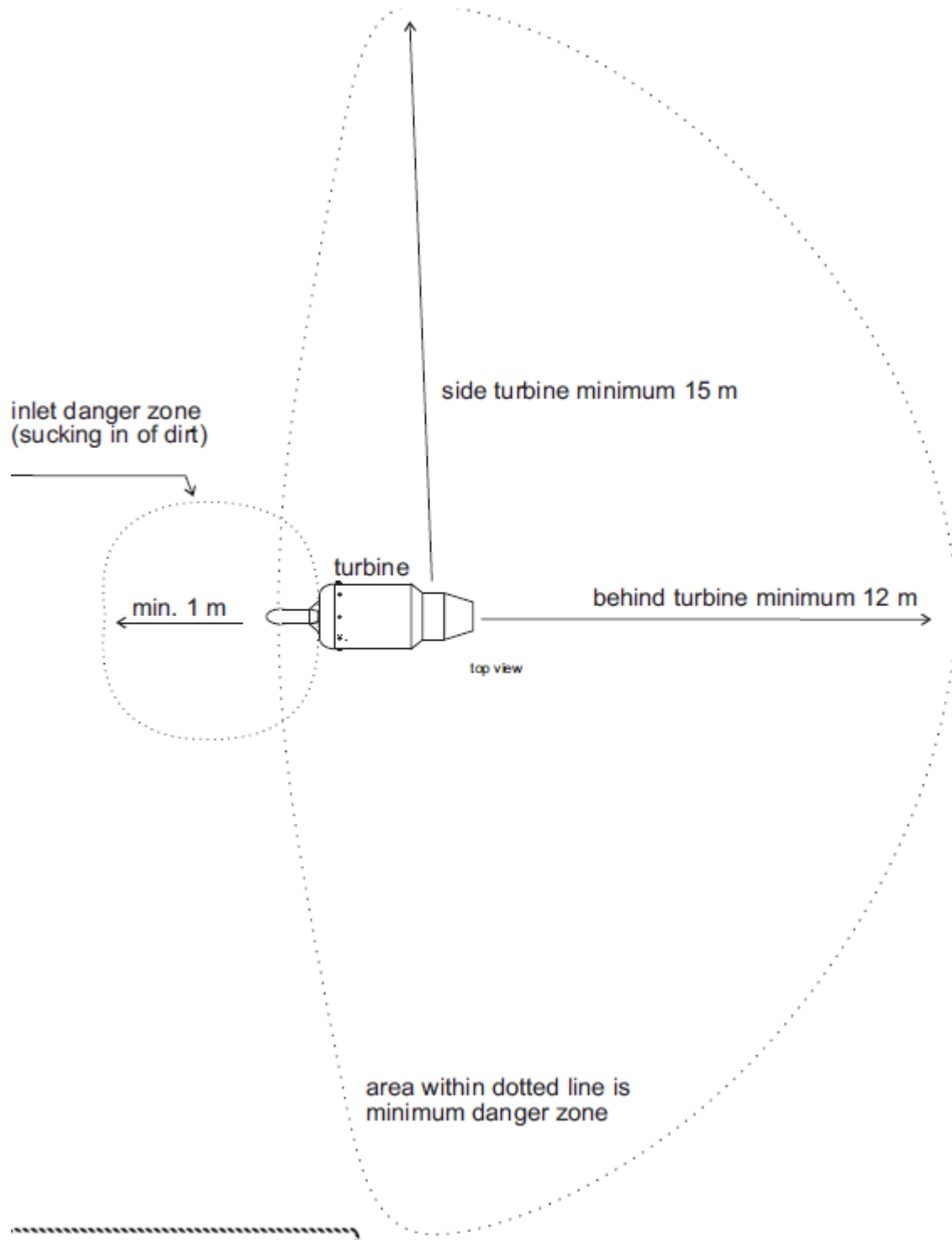


Figura 3.1: Zona de seguridad. Vista superior

4. Mando de control

Para poder controlar la secuencia de encendido y parada del motor así como el porcentaje de carga es necesario utilizar un mando de control.



Figura 4.1: Mando de control

El mando de control cuenta con dos instrumentos de control, **Switch** (interruptor en forma de palanca) situado a la izquierda y el **acelerador** (interruptor en forma de rueda) situado a la derecha.

4.1. Switch

El switch es un interruptor que tiene tres posiciones:

1. Posición de parada de emergencia.
2. Posición de parada.
3. Posición de encendido.

Este interruptor nos permite controlar el encendido y las distintas paradas del motor.



(a) Posición inferior (1) permite la parada de emergencia.



(b) Posición intermedia (2) permite la parada del motor.



(c) Posición superior (3) permite el encendido del motor.

Figura 4.2: Posiciones del switch

4.2. Acelerador

Este interruptor nos permite controlar el grado de carga del motor variando desde 0 % hasta 100 %, por lo que permite aumentar y disminuir las revoluciones del motor. Si el motor está apagado el acelerador nos sirve para poder seleccionar funciones que tiene instaladas la ECU. Estas funciones nos permite realizar tareas de forma automática como por ejemplo el proceso de cebado de las líneas de combustible (este proceso se explicará más adelante), secuencia de enfriado rápido, etc.

5. Unidad central

Esta es la unidad de control del banco de ensayo. En ella está instalada la ecu y tiene distintos elementos para controlar el banco de ensayo. A continuación, se explicará los distintos elementos de la unidad central.

- Interruptor principal: Este interruptor permite el encendido/apagado del banco de ensayo. Para encender o apagar el banco hay que girar el interruptor de la figura 5.1.



Figura 5.1: Interruptor principal de la unidad de control

- Indicador del empuje: En esta zona se puede obtener la medida del empuje que genera el motor. El empuje está en unidades de kg. Está diseñado para una fuerza máxima de 90 kg.



Figura 5.2: Indicador del empuje

- Fusible: El banco cuenta con un fusible principal de 3.15 A.



Figura 5.3: Fusible principal del banco de ensayo

- Interruptor del aire: Este interruptor activa la salida de aire del banco de ensayos. También se puede utilizar para enfriar el motor.



Figura 5.4: Interruptor de aire

- Botón CTF: Este botón se puede utilizar para activar “funciones especiales”. Además también se puede utilizar para recalibrar el acelerador y las señales del interruptor del mando de control.



Figura 5.5: Botón CTF

- Salida del mando de control: En esta zona se conecta el mando de control o un cable dedicado para la descarga/programación de la ecu.



Figura 5.6: Salida del mando de control

6. Engine Data Terminal

El EDT o Engine Data Terminal tiene distintas pantallas dependiendo del estado de funcionamiento del motor. Estos pueden ser:

6.1. Motor apagado

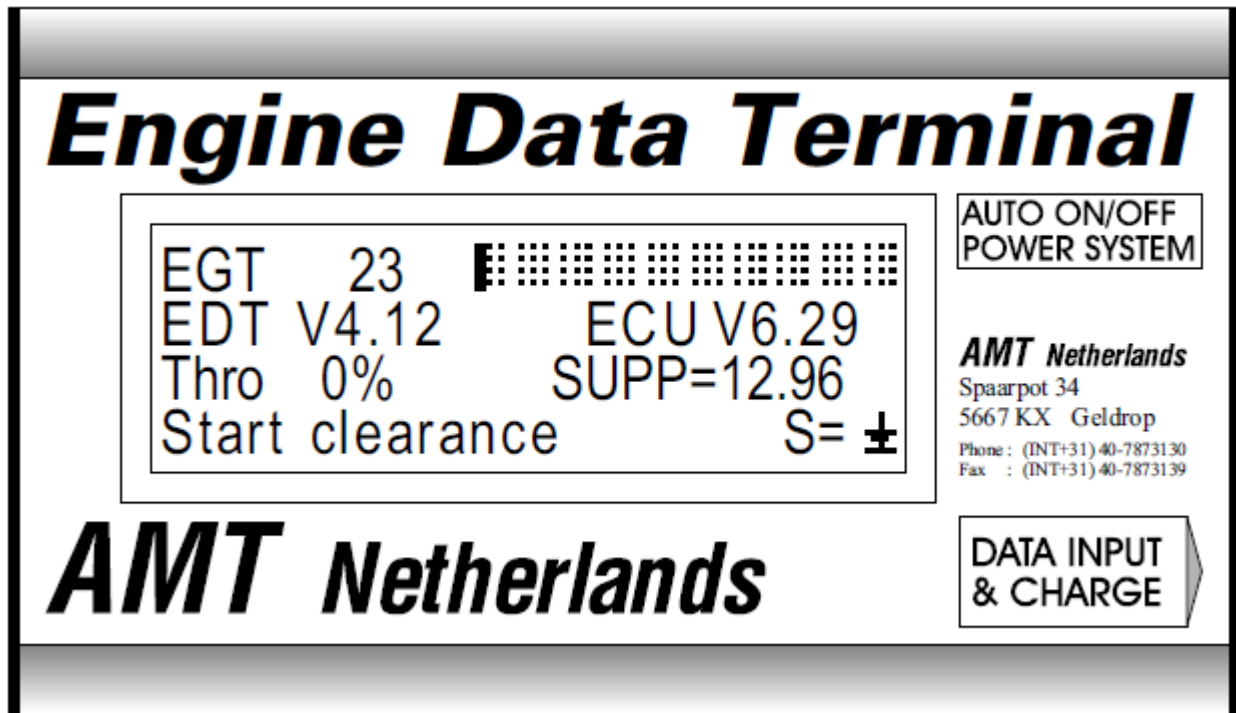


Figura 6.1: Pantalla EDT motor apagado

- Primera línea: Temperatura de los gases de escape en °C (EGT)
- Segunda línea: Versión del software de la ECU y versión del software del EDT.
- Tercera línea: Posición del acelerador (grado de carga) y voltaje suministrado a la ECU.
- Cuarta línea: Texto adicional y posición del switch.

6.2. Secuencia de apagado

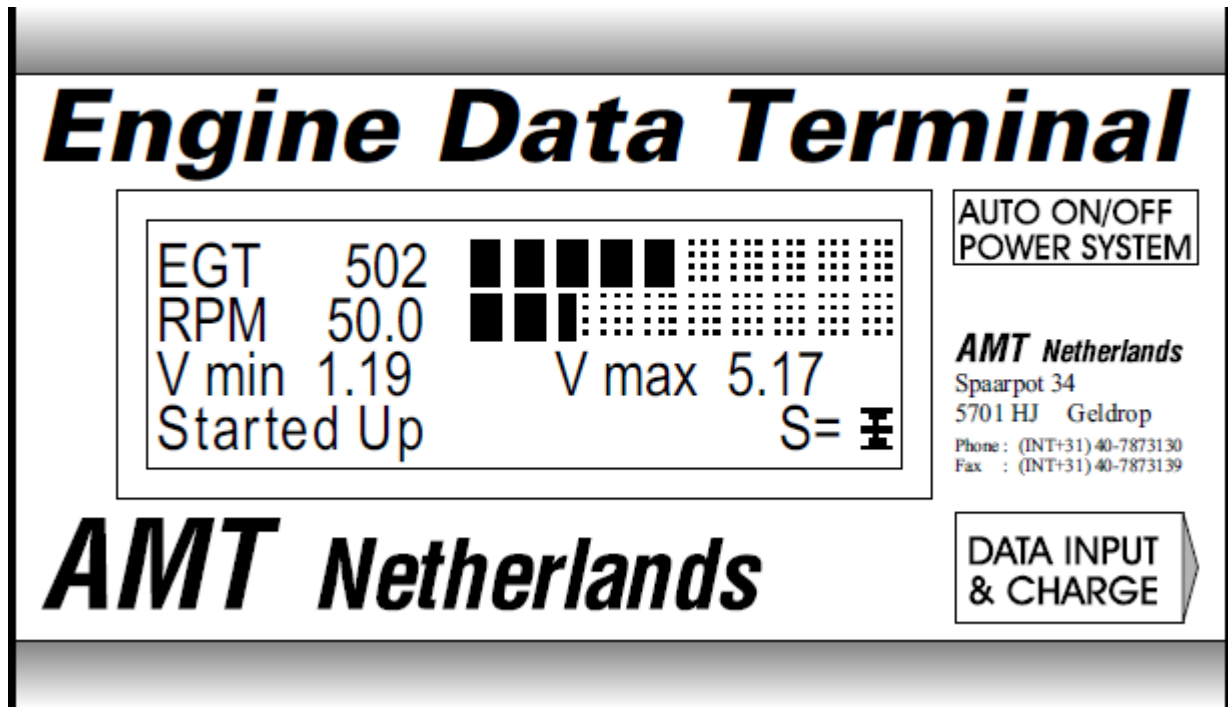


Figura 6.2: Pantalla EDT secuencia de apagado

- Primera línea: Temperatura de los gases de escape en °C (EGT)
- Segunda línea: Revoluciones del eje (RPM).
- Tercera línea: Voltaje de la bomba en ralentí y a máximas RPM.
- Cuarta línea: Texto adicional y posición del switch.

6.3. Secuencia de encendido y motor arrancado

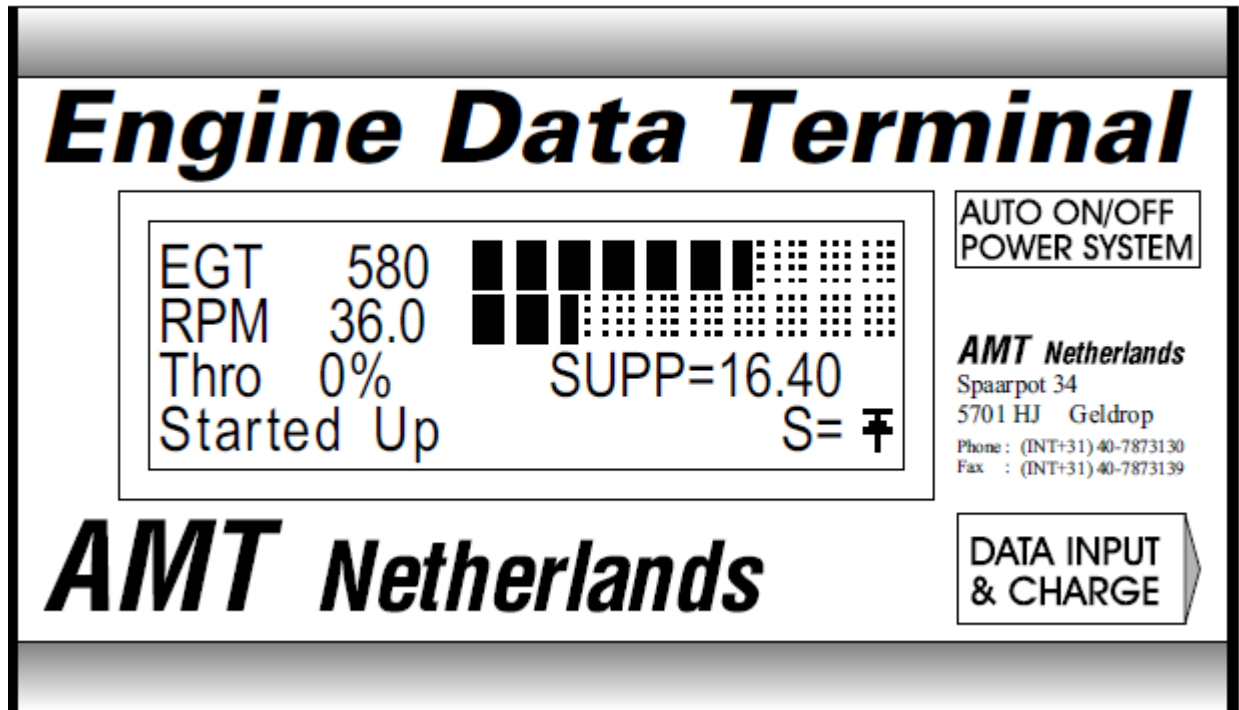


Figura 6.3: Pantalla EDT secuencia de apagado

- Primera línea: Temperatura de los gases de escape en °C (EGT)
- Segunda línea: Revoluciones del eje (RPM) y voltaje actual de la bomba (V out).
- Tercera línea: Posición del acelerador (grado de carga) y voltaje suministrado a la ECU o texto adicional.
- Cuarta línea: Texto adicional y posición del switch.

7. Proceso de cebado

Para que el arranque del motor sea exitoso es necesario que las líneas de combustible estén completamente llenas de combustible y sin la presencia de burbujas de aire. Para poder realizar esta operación se recurren a unas funciones que tiene instaladas la ECU para poder realizar el proceso de forma automática.

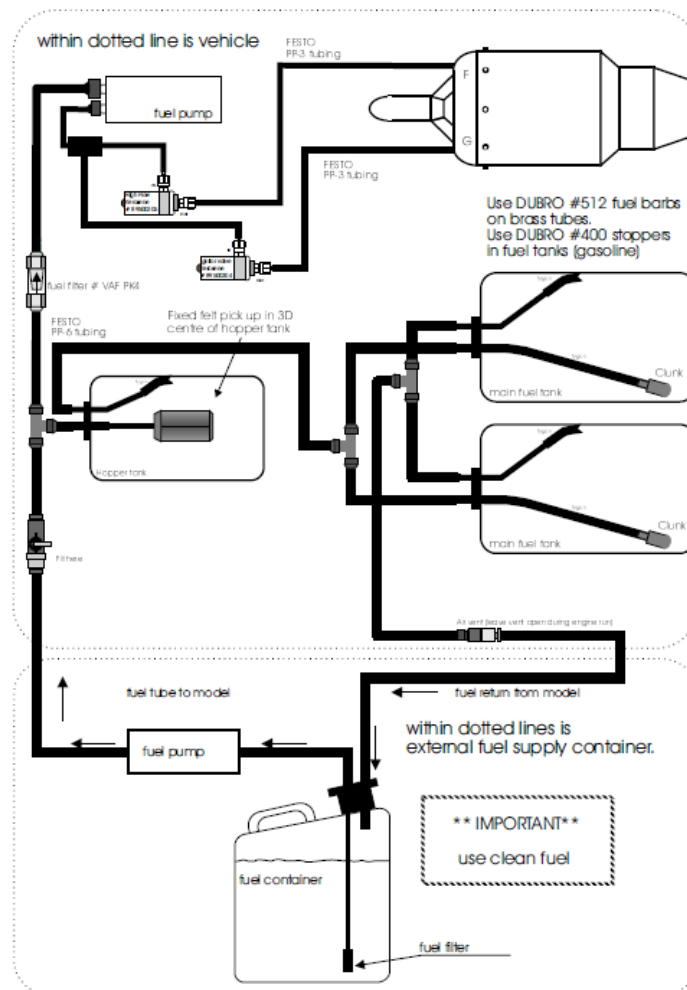


Figura 7.1: Esquema del sistema de combustible

7.1. Cebado de la línea de combustible

Para poder seleccionar una función es necesario seleccionarla con el mando de control.

El mando de control permite controlar la secuencia de encendido y apagado del motor mediante el **Switch** (para el proceso de cebado no es necesario utilizar el switch por lo que asegúrese de que está puesto en la posición (1), (posición de parada)).

El otro elemento que tiene el mando de control es el acelerador, este elemento permite aumentar o disminuir el grado de carga del motor. Con él se puede aumentar y disminuir las rpm cuando el motor está encendido. Mientras que el motor está apagado y la ECU está encendida se puede usar

para seleccionar las distintas funciones que esta tiene instaladas.

7.2. Selección de funciones

El acelerador permite seleccionar las distintas funciones que tiene instaladas la ECU. A continuación se muestran las distintas funciones que presenta la misma.

- 10 % No está en uso en este momento.
- 20 % No está en uso en este momento.
- 30 % **Enciende el encendedor.**
- 40 % No está en uso en este momento.
- 50 % **Función de cebado** (línea F, línea principal de combustible).
- 60 % **Función de cebado**(línea G, sistema de encendido).
- 70 % No está en uso en este momento.
- 80 % **Activa el motor eléctrico.**
- 90 % **Comprueba el embrague.**¹
- 100 % **Función de enfriado rápido.**²

Para seleccionar una de las funciones anteriores se gira el acelerador hasta que en el terminal de datos del motor (*EDT* por sus siglas en inglés), aparezca el porcentaje deseado. Por ejemplo, si se quisiera usar la función de *enfriado rápido*, el acelerador habría que girarlo hasta que en el *EDT* aparezca **100 %**. Una vez que tenemos el acelerador en la posición deseada habría que pulsar el botón **CTF** situado en la caja blanca del banco de ensayo.

¹Activará la comprobación del embrague, encendido/apagado durante un intervalo de 0.5 segundos

²Al activar la función *enfriado rápido*, el motor eléctrico mantendrá el eje de la turbina girando continuamente, incluso si el botón CTF está liberado, hasta que se alcance la temperatura de enfriamiento.



Figura 7.2: Situación del botón CTF

7.3. Cebado de la línea de combustible G

El primer cebado es en la línea de sistema de encendido (línea G), para realizar el cebado en esta línea, se tiene que colocar el acelerador en la posición del 60 % (función 60 %). Es **muy importante** que la línea esté desconectada del motor y conectada al sistema de retorno de combustible, ya que si no se desconecta del motor el combustible entrará en la cámara de combustión provocando un arranque peligroso.

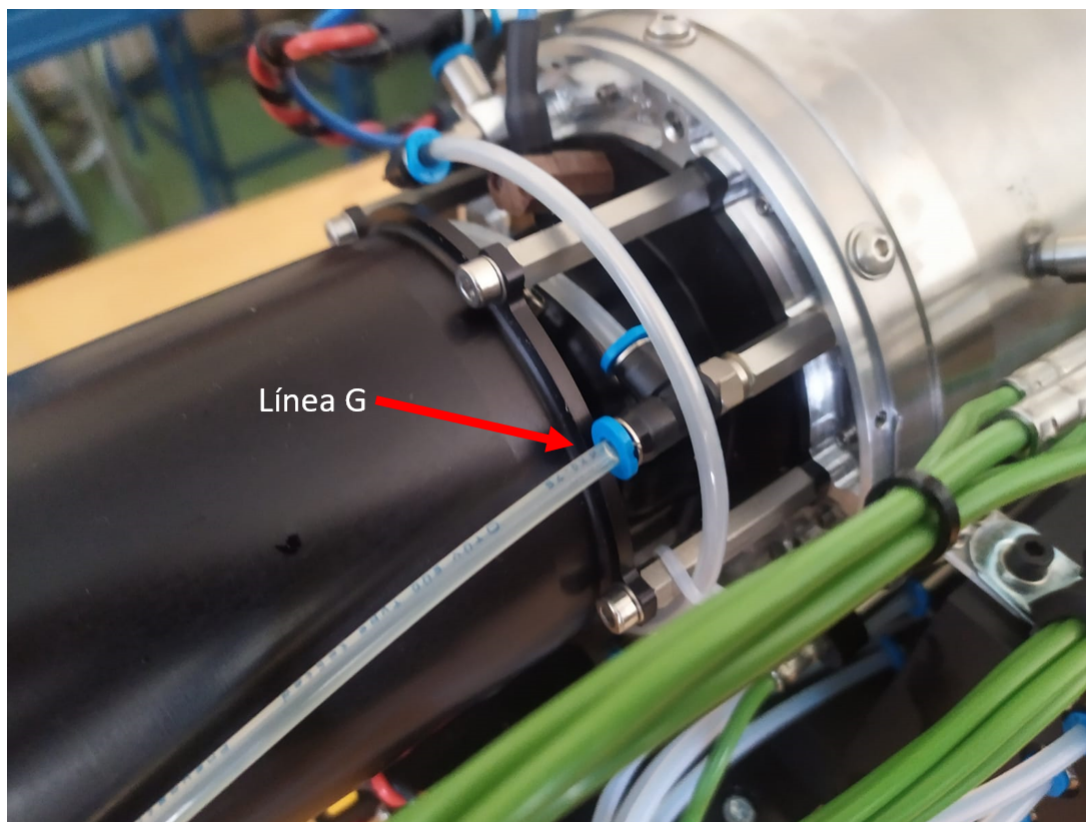


Figura 7.3: Línea de combustible G

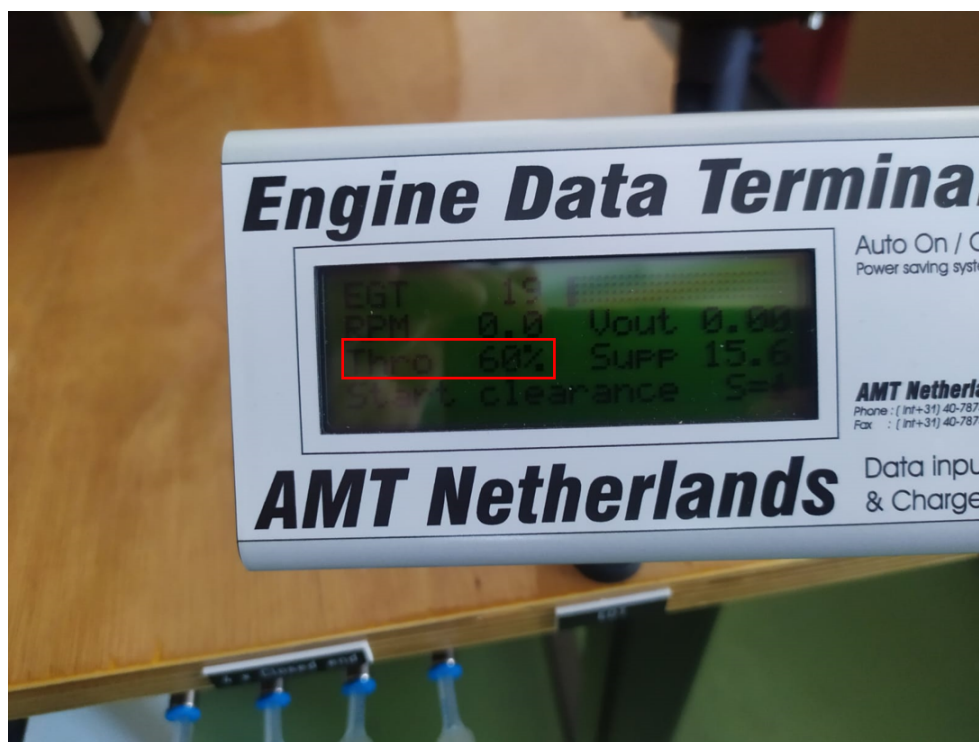


Figura 7.4: Posición del acelerador en el EDT

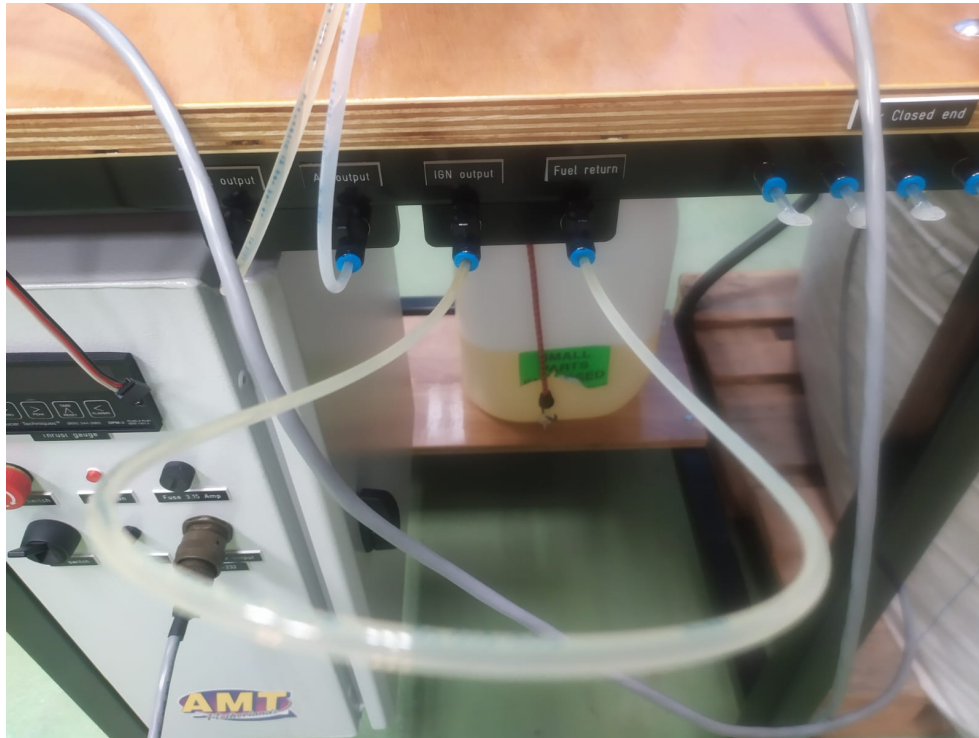


Figura 7.5: Conexión de la línea G al retorno de combustible

Una vez que tenemos puesto el acelerador en la posición deseada y hemos extraído la línea de combustible del motor y la hemos conectado al retorno de combustible, pulsamos (y mantenemos) el botón **CTF**, durante 2 segundos no ocurrirá nada. Pasado ese tiempo la válvula de arranque se abrirá y la bomba de combustible se activará. Este proceso de cebado de la línea continuará hasta que se deje de pulsar el botón **CTF**, una vez que se deje de pulsar el proceso parará.

Una vez que este proceso ha terminado es recomendable revisar que las líneas de combustible no tienen burbujas de aire en su interior, si esto ocurriera se volverá a realizar el mismo proceso hasta que desaparezcan.

7.4. Cebado de la línea de combustible F

El segundo cebado es en la línea principal de combustible (F), para realizar el cebado en esta línea, se tiene que colocar el acelerador en la posición del 50 % (función 50 %). Es **muy importante** que la línea esté desconectada del motor y conectada al sistema de retorno de combustible, ya que si no se desconecta del motor el combustible entrará en la cámara de combustión provocando un arranque peligroso.

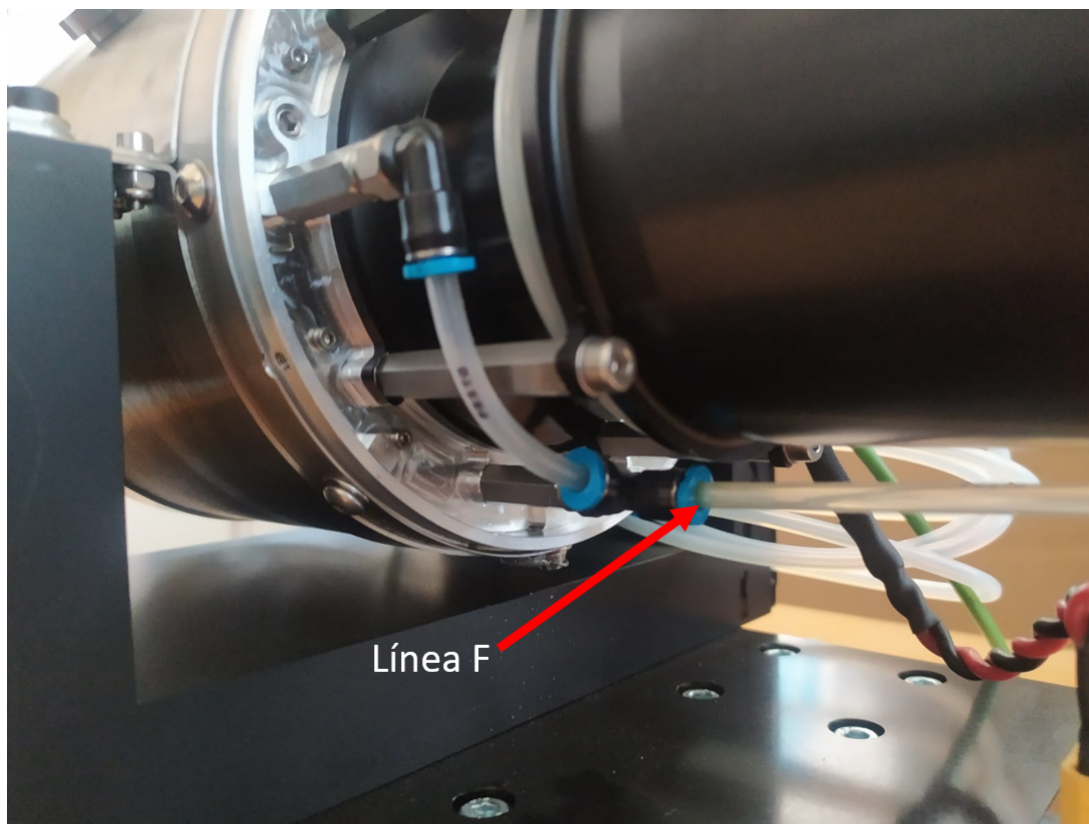


Figura 7.6: Línea de combustible F

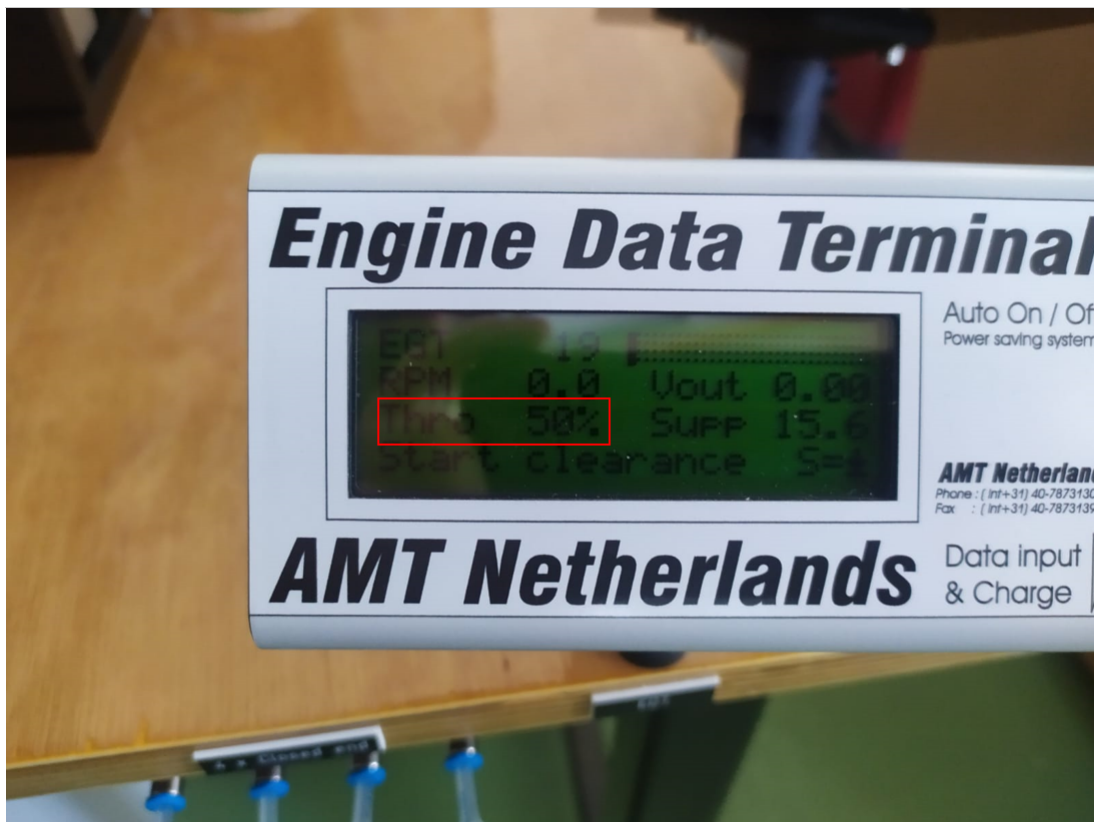


Figura 7.7: Posición del acelerador en el EDT

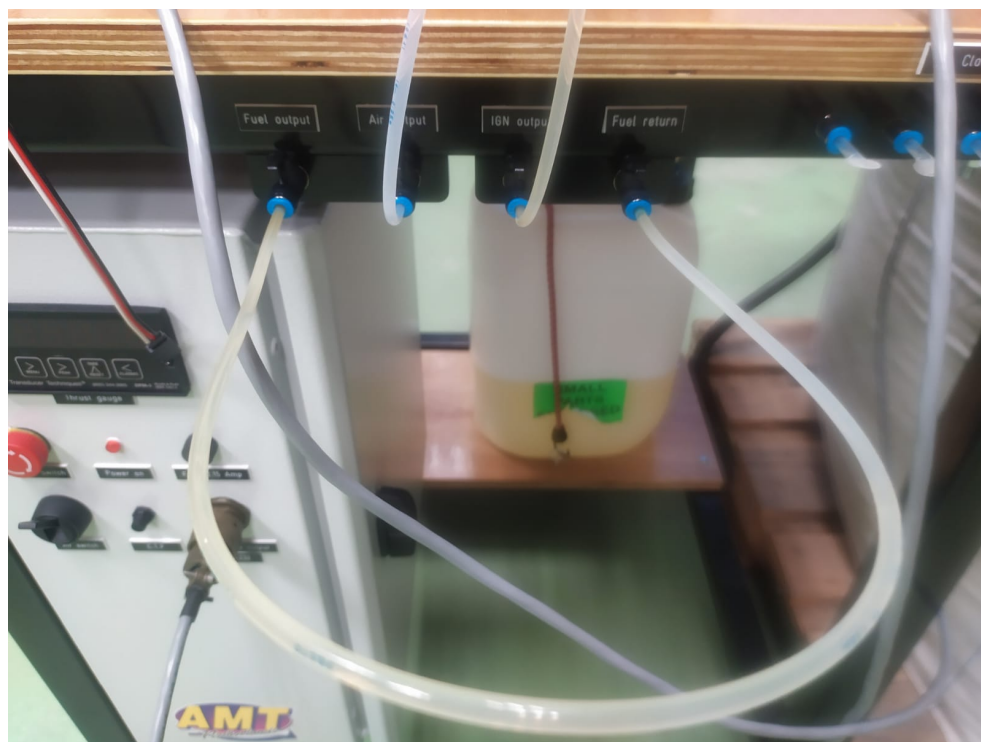


Figura 7.8: Conexión de la línea F al retorno de combustible

Una vez que tenemos puesto el acelerador en la posición deseada y hemos extraído la línea de combustible del motor y la hemos conectado al retorno de combustible, pulsamos (y mantenemos) el botón **CTF**, durante 2 segundos no ocurrirá nada. Pasado ese tiempo la válvula de combustible principal se abrirá y la bomba de combustible se activará. Este proceso de cebado de la línea continuará hasta que se deje de pulsar el botón **CTF**, una vez que se deje de pulsar el proceso parará.

Una vez que este proceso ha terminado es recomendable revisar que las líneas de combustible no tienen burbujas de aire en su interior, si esto ocurriera se volverá a realizar el mismo proceso hasta que desaparezcan.

8. Proceso de encendido

Después de asegurarnos de que las líneas tienen combustible y no tienen burbujas de aire en su interior es momento de iniciar la secuencia de encendido. Para realizar esta secuencia hay que seguir los siguientes pasos.

1. Es necesario que el **Switch** del mando de control esté en la posición inferior (posición de parada de emergencia) y el **acelerador** esté en la posición mínima.
2. Para iniciar la turbina coloque el **switch** en la posición superior (3). Ahora escuchará 5 pitidos de la ECU, y después la secuencia de encendido comenzará y el motor eléctrico empezará a girar la turbina.
Si inicia la secuencia de encendido y escucha altos pitidos de forma continuada en intervalos pequeños, eso quiere decir, que la temperatura de los gases de escape es demasiada elevada para poder iniciar la secuencia de encendido y la secuencia será abortada.
3. Después de la cuenta atrás de 5 pitidos la ECU engranará el motor eléctrico y subirá las revoluciones a 3000 rpm, la bomba de combustible empezará a funcionar y la válvula solenoide se abrirá.
4. Cuando la temperatura de los gases de escape se incrementen en 5°C desde el momento en el que se encendió el motor, la válvula de combustible principal se abrirá y el motor eléctrico girará a las máximas revoluciones.
5. La ECU acelerará automáticamente hasta las 50000 rpm, es el punto de calibración, y las mantendrá durante 2 segundos. Luego pasado estos 2 segundos bajará hasta las revoluciones mínimas (36000). Y el punto de ralentí estará calibrado.
6. Después de esto ya tiene el control de la turbina y podrá controlarla con el acelerador.

Nota: Si acelera al máximo por primera vez justo después de encender el motor, el motor estará limitado al 95 % durante 1-2 segundos hasta que la ECU termine la calibración interna.

Después de que ocurra esto, en el **EDT** aparecerá un mensaje de este tipo “Revoluciones máximas establecidas”. Esta es la confirmación de que la próxima vez que acelere al máximo conseguirá la máxima potencia.

9. Realización del ensayo

Una vez que el motor está encendido y está a ralentí ya se puede usar el acelerador, situado en el mando de control, para seleccionar el grado de carga deseado para realizar el ensayo. Una vez que se tiene seleccionado el grado de carga se pueden obtener las medidas principales del banco mediante el panel EDT, donde se puede ver la temperatura de los gases de escape, las revoluciones del motor y el porcentaje del grado de carga al que está. Además con los termómetros se puede obtener la medida de la temperatura de los distintos puntos de la turbina, estos se pueden ver en la figura 2.17.

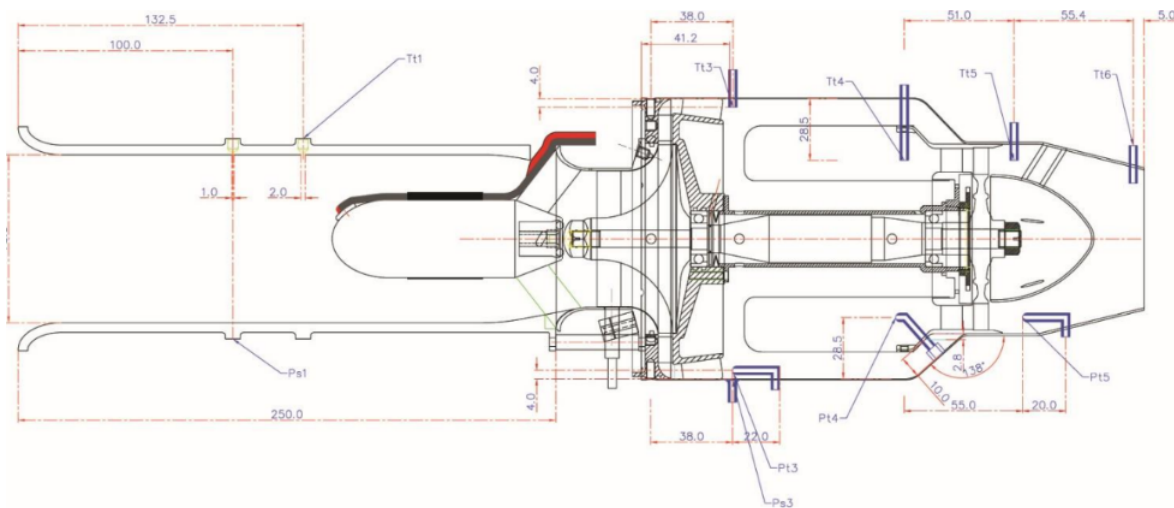


Figura 9.1: Plano del motor a reacción. Modelo Olympus HP

Para medir la presión se tiene que conectar el manómetro a la salida del dispositivo de la figura 2.18.

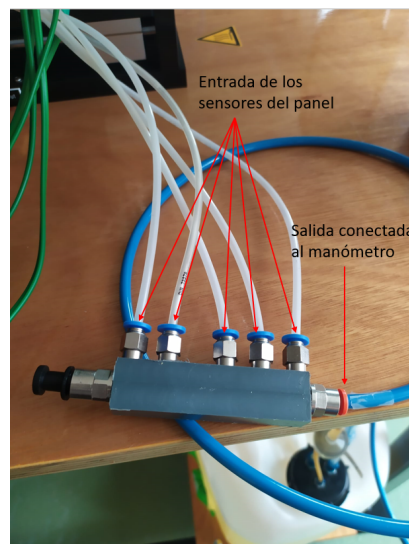


Figura 9.2: Dispositivo para conectar todas las salidas de presión del panel al manómetro

Para medir las presiones de un punto en concreto por ejemplo el punto 1 que corresponde en el panel con Ps1 se debe hacer de la siguiente forma: Primero se abre la llave del punto elegido y se toma la lectura del manómetro. Para medir otro punto se debe primero cerrar la llave del punto anterior y después abrir la llave del nuevo punto donde se quiere hacer la medición. Esto quiere decir que si primero medimos la presión del punto 1 y después queremos medir la presión del punto 4, lo que debemos hacer es cerrar la llave del punto Ps1 y después abrir la llave del punto Pt4.

También se puede utilizar el analizador de humos para hacer un análisis de las emisiones. El analizador se utiliza de la siguiente manera.

Para medir las emisiones de los gases de combustión se utilizará el analizador de humos Testo 350. Para medir las emisiones primeramente se debe encender el dispositivo y seleccionar el menú de **Mediciones**.

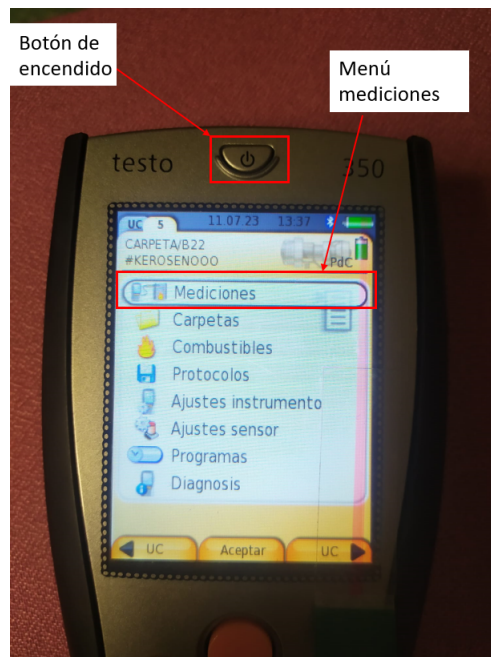


Figura 9.3: Encendido y menú de mediciones

Seleccionado el menú de mediciones aparecerá un menú con distintas aplicaciones: Quemador, Turbina, Motor $\lambda > 1$, Motor $\lambda < 1$. En nuestro caso como estamos ensayando un motor de reacción se seleccionará la aplicación **Turbina**

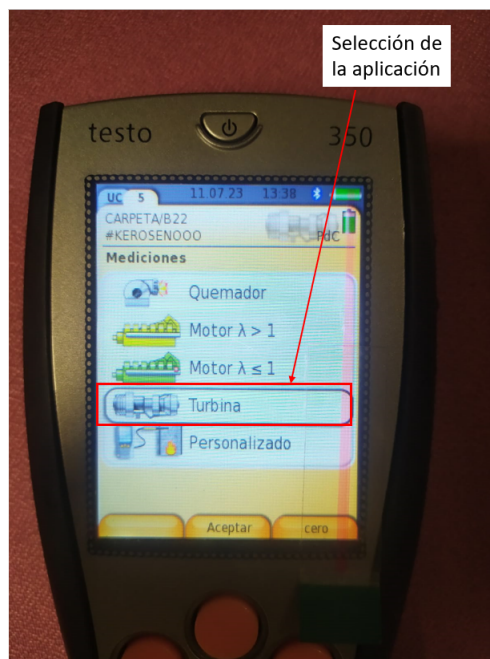


Figura 9.4: Selección de la aplicación

Una vez seleccionado este menú nos aparecerá otro donde se podrá elegir el combustible que estemos utilizando. Testo ya tiene incorporado distintos combustibles. Además de los combustibles predeterminados se pueden añadir otros distintos, en nuestro caso el queroseno no viene de forma predeterminada por lo que se tuvo que añadir. La selección del combustible no afecta a la hora de realizar la medición de los gases de combustión, esto sirve para que el dispositivo sea capaz de realizar cálculos internos como el rendimiento de la combustión entre otros.

Cuando se seleccionó la aplicación en el paso anterior empezó la secuencia de puesta a cero automática. Durante esta fase los sensores de la caja analizadora se resetean y el valor de O_2 se ajusta al 21 %. Una vez que se ha hecho la puesta a cero se debe quitar la tapa de plástico de la sonda.

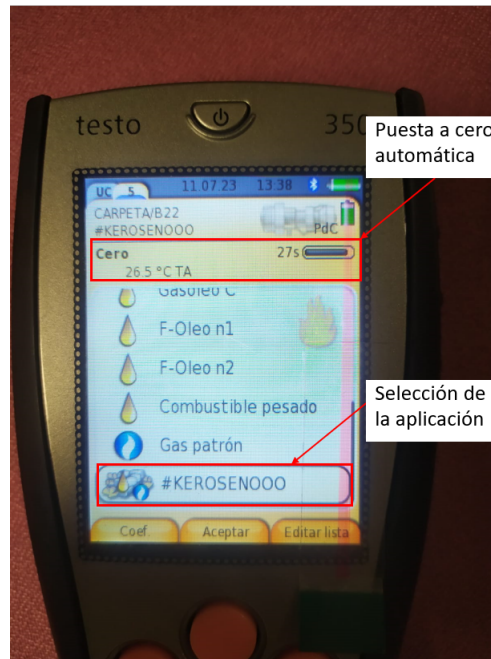


Figura 9.5: Selección del combustible

En el siguiente menú aparecen los distintos modos de medición que tiene incorporado Testo, los cuales son:

- PdC: Se puede realizar una medición de gases de combustión.
- PdC b+a cat: Permite la medición simultánea de las concentraciones antes y después del paso por un catalizador. Para este menú es necesario tener dos cajas analizadoras conectadas entre sí mediante bus de datos.
- PdC + m/s: Se pueden analizar los gases de combustión y simultáneamente se puede medir el flujo mediante un tubo de Pitot.
- PdC + ΔP : Se puede analizar los gases de combustión y paralelamente se puede medir la presión diferencial.

Para nuestro caso se selecciona **PdC**.

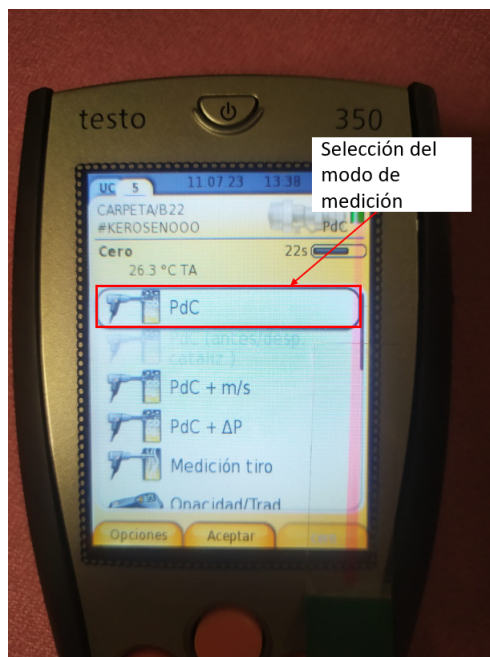


Figura 9.6: Selección del modo de medición

En la siguiente pantalla se mostrará un menú donde aparecen las distintas variables que es capaz de medir Testo. Para empezar con la medición se pulsará el botón de **Play** para que el dispositivo empiece a medir. Esto se debe hacer cuando se haya completado la secuencia de puesta a cero.



Figura 9.7: Menú donde se muestran las variables

Por último, cuando se hayan estabilizado las distintas variables se presiona el botón de **Stop** y se seleccionará el apartado **Opciones** y aparecerá un menú donde habrá la opción de imprimir los resultados con la impresora de la figura 5.12.

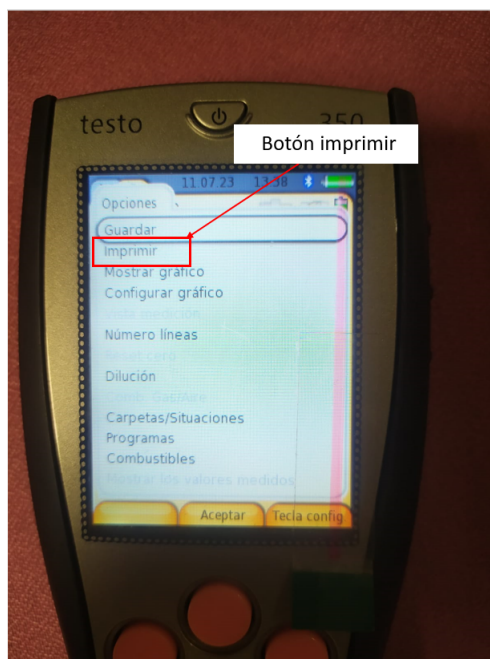
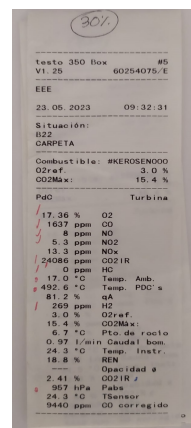


Figura 9.8: Menú para imprimir los resultados



(a) Impresora Bluetooth



(b) Ticket de los resultados de la medición de los gases de combustión

Figura 9.9: Impresora Bluetooth y resultado de las emisiones para un grado de carga del 30 %

10. Proceso de apagado

Para una parada normal del motor deberá seguir los siguientes pasos:

1. Poner el **switch** en la posición intermedia (2) para activar la secuencia de parada automática.
2. La ECU regulará automáticamente el acelerador al 30 % (aproximadamente 60000 rpm) durante 4 segundos y esperará hasta que la temperatura de los gases de escape se estabilice.
3. Después la ECU parará el motor.
4. Por último, la ECU automáticamente encenderá y apagará el motor eléctrico hasta que la temperatura de los gases de escape estén por debajo de 88°C .

Nota: Para realizar otro encendido es necesario que la temperatura de los gases de escape estén por debajo de 88°C . Si esto no es así la próxima secuencia de encendido será abortada. Además es recomendable que el motor esté en ralentí para su parada.

11. Cambio de la bujía

En esta sección se indicarán los pasos a seguir para poder reemplazar la bujía del motor. Las herramientas necesarias son una llave inglesa, y un alicate, como se muestra en la figura 6.1.



(a) Llave inglesa.



(b) Alicates.

Figura 11.1: Herramientas necesarias para reemplazar la bujía

Nota: La llave inglesa está disponible con el número de pieza de AMT 05030103.

Los materiales necesarios serán la nueva bujía y una brida como se muestra en la figura 6.2.



(a) Bujía.



(b) Brida.

Figura 11.2: Materiales necesarios.

Nota: La bujía que se muestra en la figura 6.2 (a) es la pieza de repuesto AMT 07031009, esta parte viene sin la tuerca de seguridad. Cuando se necesite la pieza que incluye la “tuerca de bloqueo”, el número de la pieza de AMT es 07031011.

A continuación, se muestran los pasos para poder reemplazar la bujía. Las imágenes que se muestran son del motor modelo Titan, pero los pasos son idénticos para reemplazar la bujía del motor modelo Olympus HP.

1. Cortar la brida antigua que mantiene el cable en su posición con unos alicates.



Figura 11.3:

2. Girar la tuerca de seguridad con la llave inglesa en sentido contrario al de las agujas del reloj.



Figura 11.4:

3. Desconectar el tubo Festo PP2 de 2 mm de la conexión rápida. Tirando suavemente del tubo negro y a la vez empujar para dentro el anillo azul de bloqueo para liberar el tubo de la conexión rápida.



Figura 11.5:

4. Girar el cable de encendido unas 5-7 vueltas en sentido antihorario hasta que la bujía salga del motor. Revisar que el sello de cobre sale también del motor.



Figura 11.6:

5. Retire la tuerca del bloqueo de la bujía.

Nota: La pieza de repuesto AMT 07031009 viene sin tuerca de seguridad.



Figura 11.7:

6. Monte la tuerca de bloqueo existente sobre la bujía de repuesto completo en el sentido de las agujas del reloj.

Nota: Si es necesario, ponga un poco de grasa sobre el anillo de Viton.



Figura 11.8:

7. Coloque el repuesto en el orificio de la bujía, no olvide poner el nuevo sello de cobre. Ponga la bujía lo más profunda posible.



Figura 11.9:

8. Alinee el tubo Festo PP2 negro con el Festo Quick, conecte e inserte el tubo en la conexión rápida hasta que se bloquee.



Figura 11.10:

9. Apriete la tuerca de bloqueo con la llave inglesa en el sentido de las agujas del reloj sosteniendo la bujía en su lugar.

Nota: En lugar de utilizar la llave inglesa de 2 x 2 mm aprox. Se pueden utilizar pasadores de acero de 40 mm de largo insertados en los orificios de las tuercas de bloqueo para soltar y apretar la contratuerca. Coloque los dos pasadores de acero opuestos entre sí en la tuerca de bloqueo para tener el máximo agarre.



Figura 11.11:

10. Asegurar el cable de la bujía con una brida.

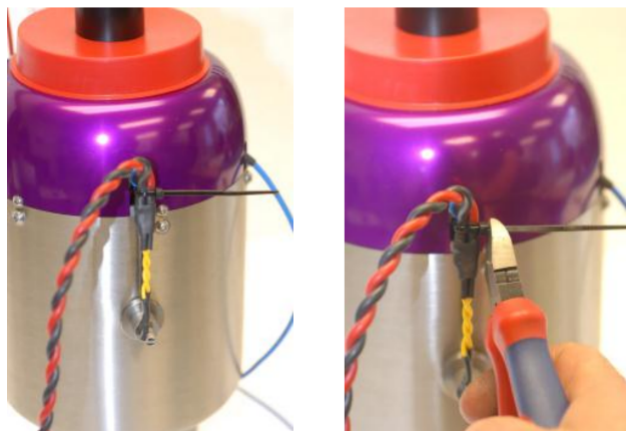


Figura 11.12:

12. Cambio del sensor de velocidad angular

En esta sección se mostrarán los pasos para poder cambiar el sensor de rpm. El reemplazo de este sensor es igual para los modelos Mercury, Pegasus, Olympus, Titan, Nike y Lynx, lo único a tener en cuenta es el espacio entre la cara del sensor y el borde los álabes del compresor ya que para cada modelo la distancia es distinta. No se necesitan herramientas especiales, solamente es necesario unas galgas métricas y una llave hexagonal para los pernos M2 o M3 (Nike & Lynx).

El espacio libre entre el sensor y el borde de los álabes del compresor deben ser las siguientes para cada modelo:

- Mercury (HP): 0.15* - 0.20 mm.
- Pegasus (HP), Olympus (HP), Titan, Nike y Lynx: 0.20 - 0.25* mm

(* Distancia preferible del sensor al álabe del compresor)

A continuación, se muestran los a pasos a seguir para cambiar el sensor rpm.

1. Retire el sensor de rpm antiguo aflojando los dos pernos M2/M3 en el bloque de montaje y extraiga el sensor del bloque de montaje.
2. Inserte el nuevo sensor de RPM a través del orificio en el bloque de montaje y el orificio en la entrada, hasta que quede al ras con la superficie interior de la entrada. Apriete un poco los tornillos M2/M3.
3. El borde de todos los álabes del compresor se mecanizan solo al frente con el orificio del sensor de rpm en la entrada y la medición del espacio entre el sensor y los álabes se debe realizar en este punto, con la galga a 90° con respecto a la cara de los álabes del compresor. Con una galga métrica, mida el espacio entre la cara frontal del sensor de rpm y la parte maquinada de los álabes del compresor, verificando todos los álabes del compresor. La galga métrica debe estar bien ajustada. Si el espacio es demasiado grande, empuje suavemente el sensor de rpm hacia adentro hasta que se alcance el espacio requerido. Tenga cuidado de no dañar la parte delantera del sensor con la galga.



Figura 12.1: En esta figura se muestra la posición correcta de la galga.

4. Cuando el espacio sea correcto, apriete los dos pernos M2/M3 con un par de 24 N/cm para pernos M2 y 60 N/cm para pernos M3. NO use Loctite™, o equivalente, en estos pernos, de lo contrario será imposible quitarlos en el futuro.
5. Si tiene un EDT y una ECU versión 1 o 2, puede conectar el sensor a la entrada de RPM de la ECU y hacer girar el compresor para verificar que el sensor de RPM funcione correctamente.