



**INDUSTRIAL<sup>ES</sup>**  
ETSII | UPM

Depto. de Ingeniería Energética

## **MOTORES TÉRMICOS**

# **ENSAYO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS EN BANCO DE PRUEBAS**

2023

# Contenido

1.	Objeto .....	3
2.	Introducción a las técnicas de ensayo de motores .....	3
2.1.	Clasificación de ensayos de motores de combustión interna.....	3
2.2.	Frenos dinamométricos .....	5
2.3	Tipos de frenos dinamométricos .....	7
2.4.	Medida de valores de otros parámetros de funcionamiento .....	12
3.	El banco de pruebas del laboratorio de Motores Térmicos .....	19
3.1.	El motor.....	20
3.2.	El freno dinamométrico.....	22
3.3.	Otros instrumentos.....	23
3.4.	La celda de ensayos.....	24
4.	Riesgos y precauciones.....	27
5.	Desarrollo de la Práctica.....	28
5.1	Adquisición de datos .....	28
5.2.	Prestaciones del motor.....	28
5.3	Gasto de aire y parámetros derivados.....	29
5.4.	Balance de energía.....	30
5.5.	Desarrollo del ensayo .....	33
6.	MEMORIA A PRESENTAR.....	35

## 1. Objeto

El lector de este guion de práctica deberá de ser capaz de:

- Identificar los diferentes tipos de ensayo de motores, atendiendo a su objetivo y a la forma de ejecución.
- Entender el concepto de sensor o transductor.
- Conocer e identificar las variables medibles, su tipología (media o instantánea), y los métodos para su medición en un banco de pruebas.
- Identificar los diferentes componentes del banco de pruebas de la práctica.
- Entender los riesgos y conocer las precauciones que se deben de tomar a lo largo de la práctica.
- Conocer los procedimientos de ensayo de motores térmicos en bancos de pruebas.
- Ser capaz de realizar los cálculos adecuados para obtener resultados.

## 2. Introducción a las técnicas de ensayo de motores

Los ensayos en motores de combustión interna alternativos son de vital importancia a todos los niveles de su desarrollo, desde la investigación básica hasta la industria de fabricación de motores.

Durante un ensayo se realizan tres funciones básicas: medir el valor de diversas variables mediante sensores, regular una variable, manteniéndola constante o no a lo largo del ensayo; y registrar las variables instantáneas sincronizadas con una variable temporal, generalmente el ángulo de giro del cigüeñal. Tanto la regulación como el registro implican, obviamente, la medición de la variable.

Los ensayos se realizan en un *banco de pruebas* o *banco de ensayos*, que se suele situar en una *celda* o *sala de ensayos* para controlar el ruido y por razones de seguridad, como la mostrada en la Figura 1.



Figura 1. Celda de ensayos de motores térmicos.

### 2.1. Clasificación de ensayos de motores de combustión interna

Dependiendo del objetivo para el que se realiza un ensayo y de la forma de ejecución del mismo, los ensayos de motores pueden presentar características específicas que determinan diferencias sustanciales en algunos casos. Desde el punto de vista del objetivo del ensayo, caben destacar los siguientes casos:

- *Ensayos de investigación y desarrollo:* Buscan la caracterización de un proceso en un motor sobre el que se está realizando un trabajo de investigación. Esta categoría es muy diversa, y los ensayos requieren en ocasiones de un alto grado de complejidad y equipamiento muy sofisticado.
- *Ensayos de producción:* se realizan al final de las cadenas de montaje para comprobar que el motor cumple las especificaciones básicas dentro de las tolerancias, y no tiene errores de fabricación. Estos ensayos no suelen hacerse en la fabricación de grandes series como es el caso de los automóviles.
- *Ensayos de durabilidad:* Son ensayos largos en los que al motor se le somete a condiciones operativas forzadas o durante períodos de uso haciendo ciclos de grado de carga y régimen muy largos para comprobar su durabilidad.
- *Ensayos de control de calidad:* Tienen el fin de comprobar el acabado y las prestaciones de un motor ya fabricado, antes de venderlo al cliente. Esta categoría puede dividirse a su vez en aquellos ensayos realizados a todas las unidades fabricadas, caracterizados por ser breves y medir pocas variables, y aquellos realizados sobre una muestra reducida, que son más rigurosos y costosos, como la medida de desgaste. Para grandes motores estacionarios o marinos, en series cortas, estos ensayos se sustituyen por los *ensayos de recepción* realizados según cláusulas particulares del contrato de compra-venta a petición del usuario, o basándose en alguna norma internacional.
- *Ensayos de homologación o certificación:* Consisten en la comprobación de características (prestaciones, emisiones, etc.) frente a organismos oficiales siguiendo normas o directivas internacionales (DIN, ISO, SAE, UNE, etc.) en lo que se refiere a metodología y parámetros a medir.
- *Ensayos de ajuste o puesta a punto:* Se realizan para comprobar modificaciones en un motor, como es el caso de preparaciones para competición o después de alguna reparación sustancial en un motor.

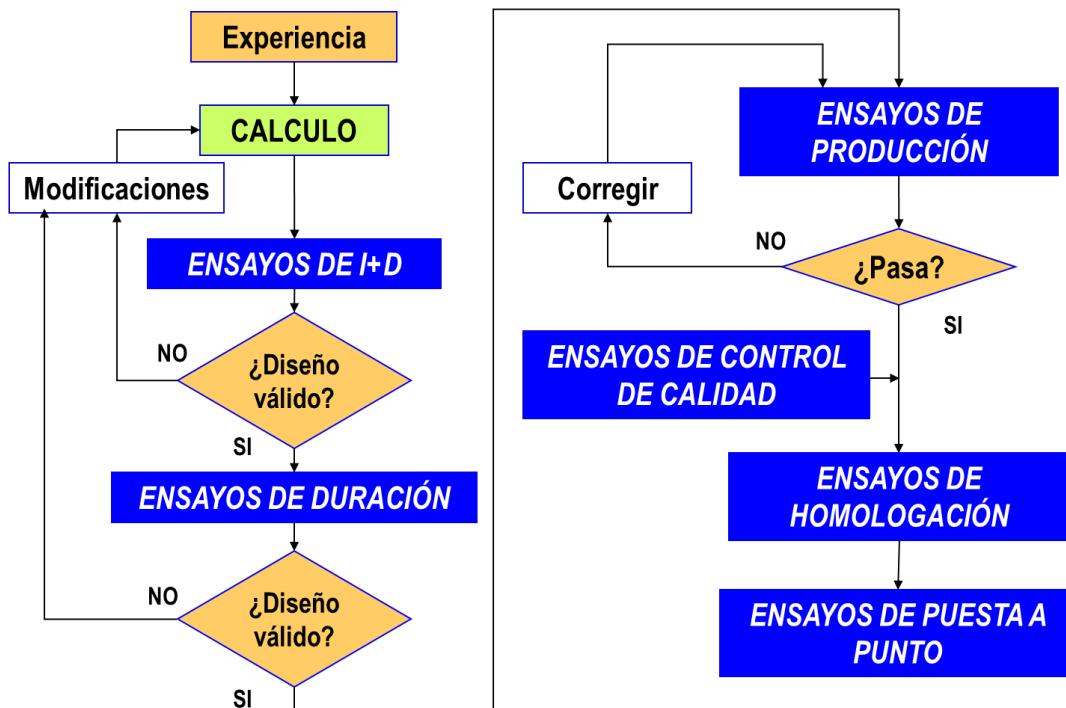


Figura 2.- Tipos de ensayos de motores térmicos.

La práctica que se va a realizar en el Laboratorio de Motores Térmicos de la ETSII no corresponde exactamente a ninguno de los grupos anteriores, pues se trata de un ensayo docente; por un lado se van a comprobar las características del motor, lo cual está asociado con los ensayos de control de calidad,

homologación o recepción, pero por el otro se procede a la medición de otros muchos parámetros, que podría asociarse a ensayos de investigación y desarrollo.

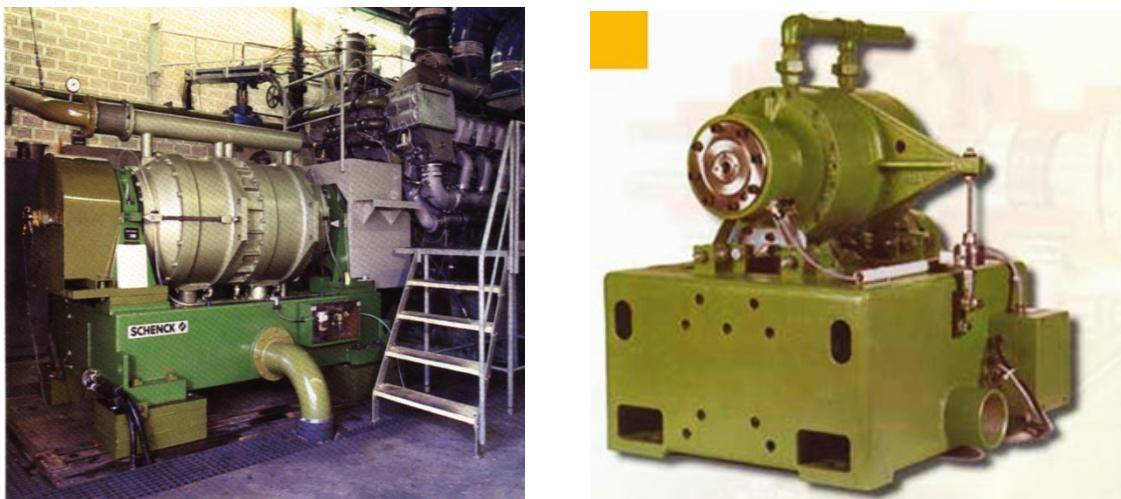
En lo que se refiere a la forma de ejecución, se pueden destacar tres grandes grupos:

- *Ensayos con combustión*: Son ensayos en condiciones de funcionamiento real con combustible y a temperatura de funcionamiento normal. Pueden ser en régimen estacionario o en régimen transitorio, con aceleraciones y deceleraciones y cambios de grado de carga rápidos. La ventaja de este tipo de ensayos es que reflejan fielmente las condiciones reales de uso del motor en el caso de automoción, dando información realista sobre sus características, rendimiento y emisiones
- *Ensayos sin combustión (o en arrastre)*: En este tipo de ensayos el MCIA es accionado por un motor eléctrico. Al no producirse la combustión, ni las condiciones térmicas ni las tensiones sobre los elementos mecánicos reflejan exactamente la realidad, pero son utilizados por su sencillez en la evaluación de pérdidas mecánicas, y por la limpieza de accesos ópticos al cilindro. Necesitan de una máquina eléctrica de accionamiento
- *Ensayos de componentes*: Se trata de ensayos sobre sistemas o elementos concretos del motor que se ensayan por separado, como silenciadores, sistemas de inyección de combustible, flujo en conductos, etc.

La práctica que se va a llevar a cabo en este caso consiste en un ensayo con combustión.

## 2.2. Frenos dinamométricos

Se puede decir que, de forma general, un ensayo con combustión implica la utilización de un elemento unido al eje de salida del motor que **aporta un par resistente y absorbe la potencia del motor**. Este elemento puede normalmente medir la potencia resistente o el par resistente que es igual al del motor. Se denomina normalmente “freno dinamométrico”. En el caso de un ensayo sin combustión, como se explicó anteriormente, sería necesario de un motor de arrastre, normalmente eléctrico.



**Figura 3. Frenos dinamométricos para ensayo de motores térmicos.**

Los frenos dinamométricos consisten en un rotor acoplado directamente al cigüeñal del MCIA mediante una transmisión, y que ofrece un par de resistencia inducido por el estator en el interior del cual gira. Dicho estator está inmovilizado en su posible rotación por medio de una barra conectada a un medidor de fuerza, por ejemplo una célula de carga extensométrica, para medir el par, como se verá más adelante.

La medida de la potencia del motor puede hacerse de dos formas:

- Medida DIRECTA. El motor acciona una máquina que genera potencia que puede ser una máquina eléctrica generadora o un generador hidráulico y se mide la potencia eléctrica generada o la potencia hidráulica producida.

El procedimiento puede ser impreciso porque las pérdidas de la máquina absorbadora de potencia no se conocen con precisión.

- Medida INDIRECTA. El motor acciona un elemento que interpone una resistencia mecánica a su propio movimiento: freno. Este elemento se denomina freno dinamométrico porque no solo frena al motor térmico, sino que puede medir el par resistente de frenado.

La Figura 4 muestra el sistema más simple de medida de potencia en base a un freno de fricción. Las zapatas de frenado oponen una fuerza de rozamiento ( $F_R$ ) que depende de la fuerza normal (N) ejercida sobre la superficie del cilindro rotativo (rotor), lo que genera un par resistente, similar al que se generaría en las ruedas de un automóvil. Pero en este caso las zapatas están montadas sobre una estructura basculante (estator) a la que se impide girar con un brazo de longitud  $b$ , que actúa sobre un medidor de fuerza  $F$ . El producto de  $F \cdot b$  es el par resistente del freno  $M_r$ .

La fuerza normal N es regulable, en este ejemplo con una palomilla de apriete manual: a mayor apriete mayor par resistente. La potencia del motor térmico se disipa en calor en las zapatas, que deberán ser refrigeradas de alguna forma.

La Figura 5 muestra un esquema de un motor térmico acoplado a un freno dinamométrico.

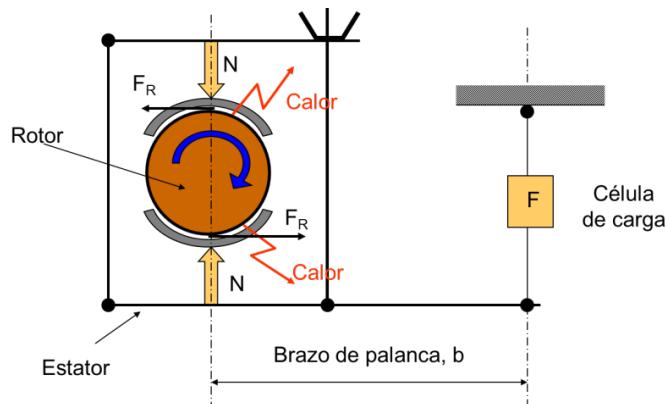


Figura 4. Esquema de un freno dinamométrico de fricción

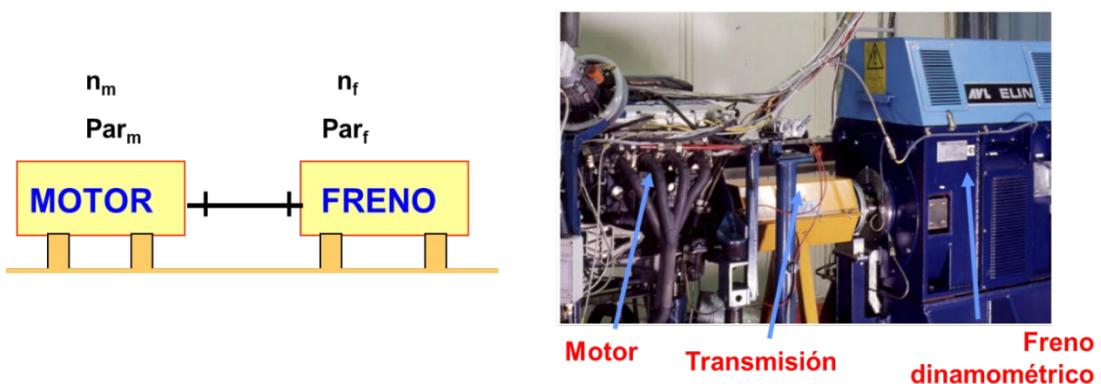


Figura 5. Motor acoplado a freno dinamométrico.

Siempre se cumple que el régimen de giro del motor es igual al régimen de giro del freno,

$$n_m = n_f = n$$

Pero el par motor del motor térmicos  $M_m$  puede ser o no igual al par resistente del freno  $M_f$  según la regulación de carga de cada uno. Pero se debe cumplir que:  $M_m - M_r = I \cdot dn/dt \cdot (2\pi/60)$

Se pueden presentar tres casos:

- Si  $\rightarrow M_m > M_r$  el régimen de giro n aumenta.
- Si  $\rightarrow M_m < M_r$  el régimen de giro n disminuye.
- Si  $\rightarrow M_m = M_r$  el régimen de giro del conjunto se mantiene constante, y son las denominadas *condiciones de ensayo estacionarias*.

En esas condiciones, la potencia efectiva del motor es:

$$\text{Potencia efectiva (kW)} = \text{Par (Nm)} \cdot \text{Vel. Rotación (rad/s)}/1000$$

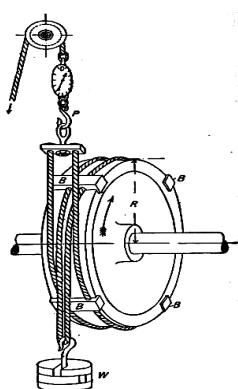
Siendo Rotación (rad/s) = Régimen (rev/min)  $\cdot (2\pi/60)$

Recordad que la potencia efectiva  $P_e$  (kW) =  $P_e$  (CV)  $\cdot 0,7355 = P_e$  (hp)  $\cdot 0,7457$

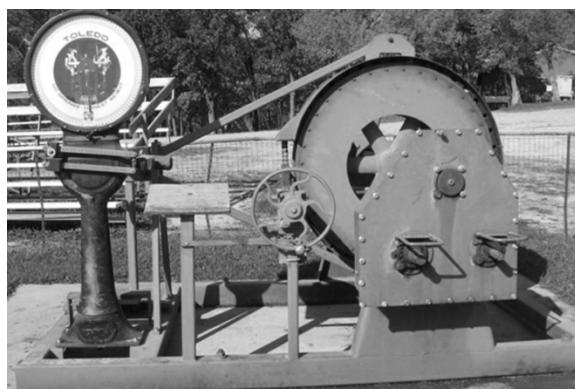
## 2.3 Tipos de frenos dinamométricos

A continuación, se detallan los frenos dinamométricos de mayor importancia histórica y actual:

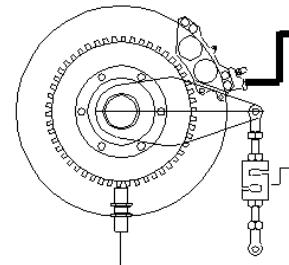
- **Freno de fricción:** El primer freno dinamométrico creado fue el freno de cuerda, a principios del S. XX; este sistema consistía en una cuerda de fricción que rodeaba al rotor, y tensada mediante un dinamómetro y una pesa, ver Figura 6a. Este freno era capaz de dar lecturas de par precisas, pero era extremadamente peligroso por el riesgo de que la cuerda se soltase. Por ello se pasó al freno Prony, Figura 6b, basado en zapatas de fricción; en este caso la medida del par podía realizarse mediante estator basculante equilibrado con una balanza. Las zapatas podían refrigerarse. Ambos frenos están en desuso, quedando como único freno de fricción utilizado con normalidad el disco de freno, generalmente utilizado en ensayos de baja velocidad en donde se disipa la potencia desarrollada por el motor después de la cadena cinemática (reductora y caja de cambios), como en la Figura 6c (donde el vehículo estaría acelerando, y los rodillos frenando).



a) De cuerda



b) Prony



c) De discos

**Figura 6.- Frenos dinamométricos de fricción**

- **Frenos hidráulicos:** Su principio de funcionamiento es similar al de un embrague hidráulico, típicamente utilizado en cajas de cambio automáticas o en frenos de vehículos pesados: el rotor imprime movimiento a un fluido incompresible (aceite o agua) mediante palas o cazoletas, haciendo que dicho fluido actúe sobre otras palas o cazoletas situadas en sentido contrario, lo que generan un par resistente. El elemento que contiene estas palas o cazoletas es el estator, al que se le impide la

rotación con un brazo que transmite el par a la estructura que lo sujeta La Figura 7 muestra un esquema del este tipo de freno y un ejemplo de una realización práctica.

El movimiento altamente turbulento del fluido hace que la potencia se disipe en forma de calor, por lo que el fluido que circula por el freno se hace pasar por un intercambiador de calor para mantener constante la temperatura. Este tipo de frenos pueden ser regulados por mayor o menor llenado de fluido, o por compuertas deslizantes que hacen variar la distancia entre rotor y estator y, por tanto, la fuerza de fricción. La ventaja de este tipo de freno dinamométrico es su sencillez de construcción y mantenimiento. Sin embargo, su regulación y automatización es difícil, y necesita de una presión de agua a la entrada muy precisa y constante.

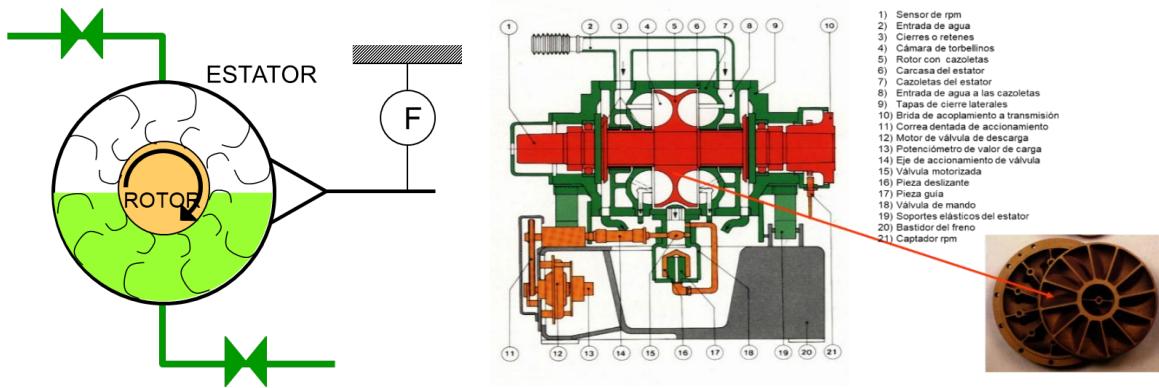
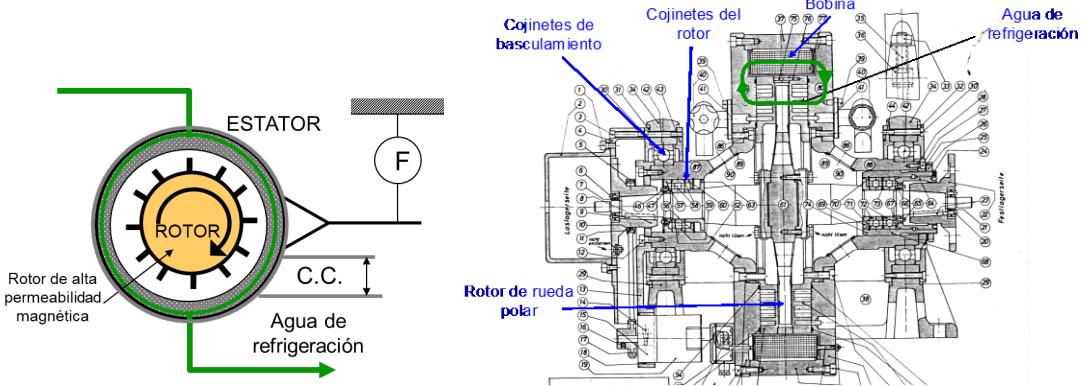
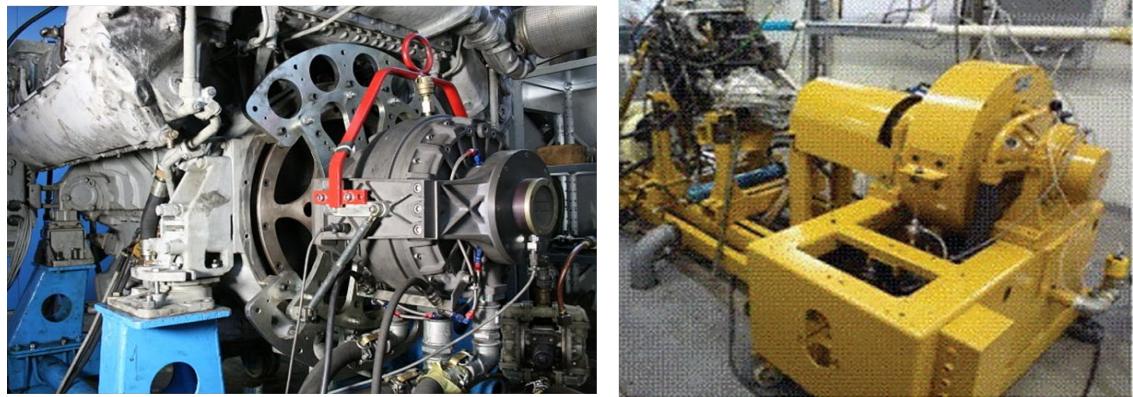


Figura 7- Freno dinamométrico hidráulico

- **Frenos electromagnéticos:** Estos frenos se basan en el principio de corrientes de Foucault, como los frenos electromagnéticos de vehículos pesados usados en bajadas prolongadas. Sin embargo, al revés que en dichos frenos, en el caso de bancos de pruebas las corrientes de Foucault se generan en el estator, y no en el rotor. Los frenos electromagnéticos constan de una rueda polar (con dientes) que gira en el interior de un campo magnético paralelo al eje de giro, creado por una corriente continua en una o varias bobinas contenidas en el estator. Al cortar líneas de corriente del campo magnético el rotor recibe una fuerza de frenado (ver leyes de Lenz) que producen un par de frenado sobre el mismo. De esta manera, el campo electromagnético que ve la rueda es constante, mientras que para el estator no lo es, pues pasa siempre por donde hay dientes de la rueda (menor resistencia electromagnética). Esto se traduce en corrientes de Foucault que generan calor, disipado por una corriente de agua de refrigeración en contacto con el estator, la Figura 8 muestra un esquema de este tipo de freno en la que se ve un corte de las bobinas, el campo electromagnético, la rueda polar de dientes y los dos conjuntos de cojinetes: los de rodadura y los de basculamiento. Como en los casos anteriores, se usa agua de refrigeración del estator para absorber el calor generado por las corrientes de Foucault, que en definitiva es la potencia absorbida por el freno. El par resistente se regula rápidamente mediante la variación de la intensidad que circula por las bobinas, siendo susceptibles de ser automatizados con relativa facilidad. Además, se trata de frenos robustos, simples, y capaces de crear un par de frenado relativamente elevado a bajas velocidades. A cambio, el coste de estos frenos y su mantenimiento es superior que para frenos hidráulicos.

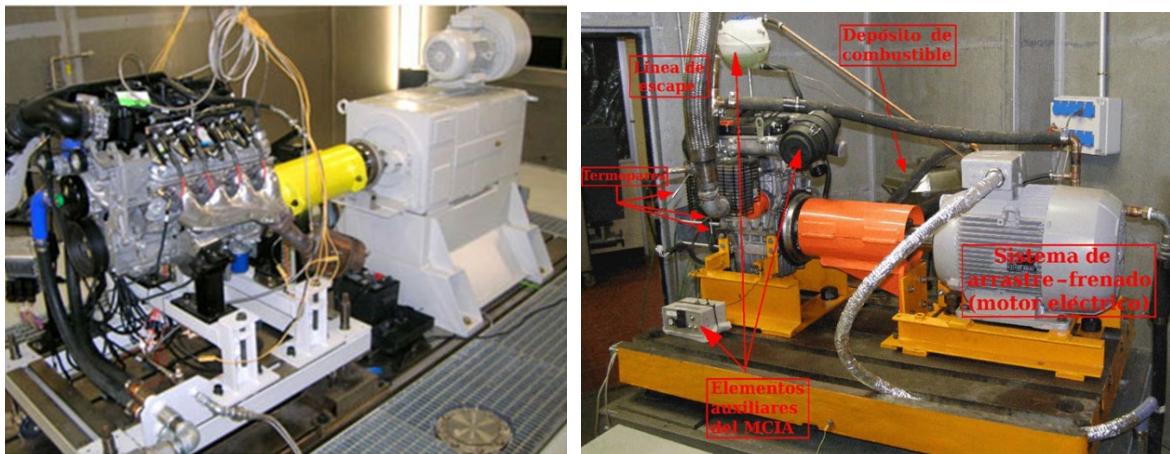


**Figura 8.- Freno dinamométrico electromagnético: esquema de funcionamiento y corte de uno real, en el que el circuito magnético se representa con flechas verdes.**



**Figura 9. Dos ejemplos de frenos dinamométricos electromagnéticos**

- **Frenos dinámicos:** Son máquinas eléctricas de corriente alterna asíncronas reversibles, que pueden funcionar como motor o como generador eléctrico, cuya parte estática (carcasa) está montada basculante, pero con un brazo de palanca que impide su rotación y acciona un medidor de fuerza. Tienen la ventaja con respecto a los de corriente continua (antiguamente eran “dinamo – frenos”) de tener una menor inercia y de no necesitar de escobillas. La velocidad se controla regulando la frecuencia, lo que implica el uso de equipos de electrónica de potencia. La energía eléctrica la consumen de la red y la que producen cuando están en motorización se puede enviar a resistencias eléctricas y disiparla como calor o enviarla de nuevo a la red. Pueden usarse para frenar o para accionar el motor, por lo que adecuadamente controlados permiten simular el uso real de motores en vehículos donde el motor en ocasiones acciona el vehículo y se acelera y en otras frena o decelera. Su principal inconveniente es el precio del equipo y del sistema de control electrónico. La Figura 10 muestra dos ejemplos de este tipo de soluciones.



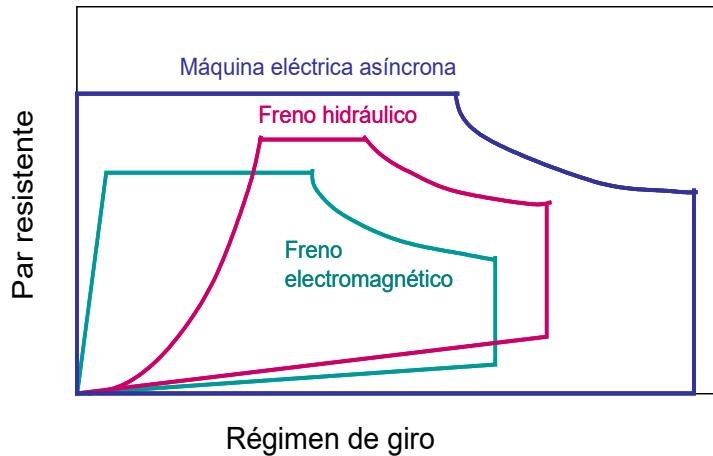
**Figura 10. Frenos dinamométricos dinámicos basados en máquinas eléctricas reversibles.**

Se ha visto que tanto los frenos de fricción, como los hidráulicos y los electromagnéticos, convierten la potencia en generación de calor, el cual es posteriormente disipado en un intercambiador de calor; así, estos frenos dinamométricos no podrán ser usados como motor de arrastre. Sin embargo, en el caso de los frenos basados en máquinas eléctricas sí podrán hacer dicha función, lo que será útil en el caso de los ensayos sin combustión de arrastre o en ensayos de investigación de combustión, para evitar que el motor se pare en un eventual fallo de la combustión.

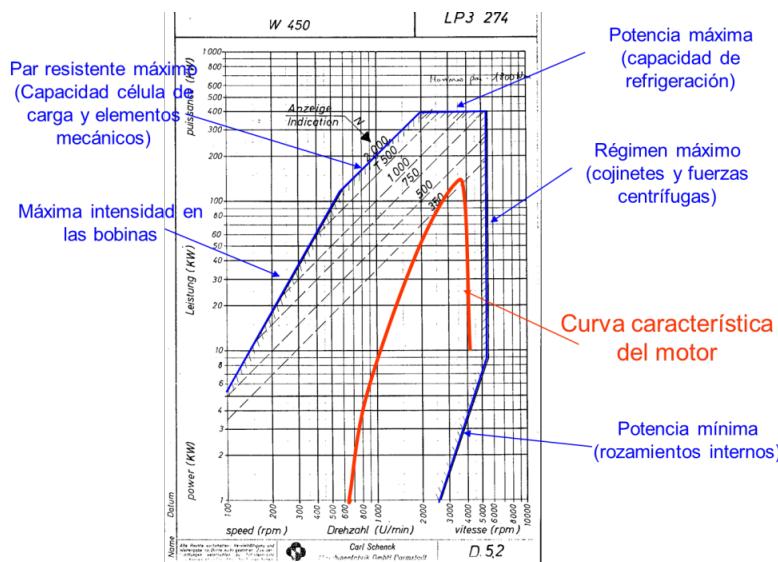
El par resistente en los frenos de fricción depende de la presión de frenado, pero es casi constante con el régimen; en los electromagnéticos el par de frenado depende de la intensidad efectiva enviada a las bobinas y es casi constante con el régimen de giro y en los frenos hidráulicos, para un llenado dado o una presión concreta, su par de frenado depende del cuadrado del régimen de giro lo que produce problemas para trabajar a bajo régimen.

En todos los frenos existe un par resistente máximo que no puede superarse por la resistencia mecánica de las bridas y anclajes. Existe también una zona potencia máxima resistente que depende de la capacidad de dissipación de calor por el sistema de refrigeración, o máxima intensidad en el caso de las máquinas eléctricas. Finalmente, existe un régimen máximo de funcionamiento por limitaciones de los componentes rotativos como cojinetes y retenes y por fuerzas centrífugas de elementos rotativos como dientes y devanados en las máquinas eléctricas. Además, en los frenos hidráulicos hay un mínimo par de resistencia asociado a una presión mínima o llenado mínimo del fluido; en los electromagnéticos ocurre lo mismo, si bien de menor grado, siendo debido a una imantación permanente del material y a la fricción de rodamientos y retenes. La Figura 11, muestra los límites de operación de par de frenado, potencia absorbible y régimen de giro para las diferentes tecnologías anteriormente vistas

Finalmente se ha de tener en cuenta en la elección del freno dinamométrico el acoplamiento de sus curvas características y las del motor. Esto es, asegurarse de que el freno elegido es capaz de ofrecer un par resistente mayor al máximo par efectivo del MCIA para todos los posibles regímenes de funcionamiento, como lo que ilustra la Figura 12 para un caso concreto de freno y motor.



**Figura 11.- Curvas de par - régimen de frenos dinamométricos**



**Figura 12. Curva de potencia máxima del motor (rojo) dentro de la zona de uso del freno.**

En la elección del freno dinamométrico se deberá tener en cuenta las necesidades (un hidráulico puede estar limitado a bajas revoluciones, las máquinas eléctricas permiten funcionar como freno y como motor de arrastre alternativamente, etc.), la idoneidad de generar electricidad en modo de freno, la regulación del ensayo y el precio entre otros factores. Es esencial que la curva de par motor esté contenida dentro de los límites de la zona de par resistente del freno. Dentro de estas características, se tiende a buscar el freno más pequeño (menos sobredimensionado), puesto que generalmente tendrá una mayor precisión para el rango considerado. Además, tendrá un rotor con menor momento de inercia que es mejor para resistir la variabilidad cíclica de par motor y responde mejor en aceleraciones en caso de ensayos dinámicos a velocidades variables.

A la hora de escoger el freno dinamométrico para un ensayo debe prestarse atención a las curvas de par resistente, que tendrán un gran impacto en el control estable del conjunto motor y freno. La mayor estabilidad se obtiene cuando un aumento inesperado de la velocidad conlleva un gran aumento de par de frenado mayor que la variación del par motor, y al revés cuando el régimen disminuye. De esta manera el régimen de funcionamiento estable se puede establecer fijando el par. Si las curvas de par motor y resistente fuesen casi paralelas en el punto que se quiere medir, el sistema no estaría en equilibrio estable y tendría grandes oscilaciones, con lo cual la toma de medidas sería imposible de realizar. Y si la pendiente del par resistente del freno fuese menor que la del motor en el punto, el sistema sería inestable, tiendiendo el conjunto al embalamiento o a la parada. En la Figura 13 se señalan las posibilidades aquí indicadas.

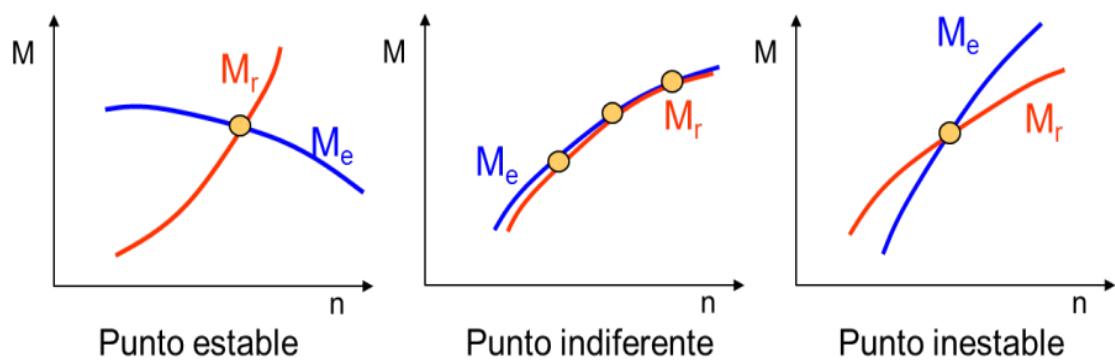


Figura 13.- Estabilidad en el régimen del conjunto motor/freno.

## 2.4. Medida de valores de otros parámetros de funcionamiento

En el ensayo de motores en banco de pruebas se mide el valor de muchos parámetros de funcionamiento del motor

Un **sensor** (también llamado *sonda, transductor, detector o captador*) es un dispositivo o conjunto de dispositivos que permite transformar una magnitud física en otra más manejable y susceptible de medirse. Un instrumento (cadena o sistema) de medida completo está compuesto generalmente, aunque no siempre, de tres etapas:

1. **Detección:** Mediante un sensor en contacto con el sistema físico se mide la variable que interesa. Esta medida se transforma en una señal medible, mecánica (altura de una columna de agua), eléctrica (potencial eléctrico), magnética, etc. Finalmente, esta señal podría ser traducida a una señal eléctrica para su posterior tratado.
2. **Acondicionamiento:** En esta etapa se acondiciona la eventual señal eléctrica proveniente del captador, bien normalizándola, amplificándola, o filtrándola, según las características de la señal entrante y de las necesidades del dispositivo de la siguiente etapa. El acondicionamiento suele realizarse cerca de la medición para impedir la excesiva atenuación de la señal cuando esta es de pequeña amplitud.
3. **Indicación y/o registro:** Esta etapa es muy variable según el tipo y objetivo del ensayo y consta en un sentido amplio de indicación del valor de la señal medida, registro y almacenamiento de dicha medida, y regulación si procede. La indicación en paneles digitales o en pantallas de ordenador es muy útil para el seguimiento y control del ensayo. Las indicaciones en dígitos son buenas para ver un valor, pero la indicación con aguja o nivel son más adecuadas para ver tendencias.

Un instrumento clásico con las tres etapas sería un termopar, en el que el sensor, por efecto de la diferencia de temperatura entre dos uniones soldadas, genera una diferencia de potencial en forma de voltaje. Esta señal ha de ser acondicionada, normalmente mediante un puente de Wheatstone y amplificada para llevarla a la unidad que muestra el valor de la medida y la registra.

Actualmente los sensores más usuales generan señales eléctricas que, tras ser acondicionadas y digitalizadas, se registran en un sistema digital. Pueden ser de dos tipos: activos, cuando generan una señal al variar la magnitud a medir y no necesitan alimentación; o pasivos, cuando necesitan una alimentación (normalmente eléctrica) y la variación de la magnitud a medir hace variar la impedancia del sensor.

Las características principales de los sensores e instrumentos de medida son:

- *Rango de la señal entrante que pueden medir*
- *Sensibilidad:* Definida como la relación entre un incremento de la señal de salida y el incremento de la señal de entrada que lo produce
- *Error de fidelidad:* Es el máximo error que cabe esperar entre la curva de calibración y las medidas efectuadas, debido a diversas variables como holguras, rozamientos, condiciones ambientales, histéresis, etc.
- *Umbral de medida o poder de resolución:* Mínimo valor de la magnitud física medible con una precisión dada
- *Rapidez de respuesta:* Tiempo en proporcionar una señal tras un escalón del 63% de la máxima amplitud de excitación. Se expresa normalmente como T90, es decir tiempo que tarda en dar un valor del 90 % del valor del escalón de la señal.
- *Deriva:* Variación temporal de la referencia dada normalmente por desequilibrios térmicos
- *Respuesta en frecuencia:* Variación de la relación de amplitudes al variar la frecuencia. Esta característica es solo importante en medidas de magnitudes dinámicas. Normalmente los sensores tienen una frecuencia de variación del valor de la magnitud medida, por encima de la cual la respuesta dinámica se distorsiona significativamente.

Los parámetros medibles en ensayos se dividen en dos categorías: *parámetros fundamentales*, que dan información directa de las prestaciones del motor –par motor, consumo de combustible y potencia–; y *parámetros específicos*, que no proporcionan información directa de las prestaciones del motor, pero que dan información cualitativa –gasto de aire, presiones, temperaturas, etc. Esta segunda categoría puede subdividirse a su vez en parámetros específicos medios, que caracterizan aquellos procesos del motor que se pueden considerar estacionarios o cuasiestacionarios, cuya modificación temporal ocurre mucho más despacio que el propio ciclo de combustión, y parámetros específicos instantáneos, cuya magnitud se modifica a lo largo de cada ciclo.

En la Tabla 1 se identifican todos los parámetros medibles que se van a tratar en esta práctica, así como su clasificación, los parámetros que se pueden calcular a partir de ellos, y las diversas instrumentaciones con las que se pueden medir.

**Tabla 1.- Clasificación de los parámetros medibles**

Clasificación	Parámetro a medir	Parámetro derivado	Instrumentación
Parámetros fundamentales	Par efectivo	Presión media efectiva	Balanza, célula de carga
	Régimen de giro	Velocidad lineal media del pistón, potencia efectiva	Tacómetros ópticos, magnéticos, mecánicos
	Consumo de combustible	Consumo específico, rendimiento efectivo	Caudalímetros volumétricos o gravimétricos
Parámetros específicos medios	Temperatura	Control, determinación del gasto máscico de aire	Termopares, termorresistencias, termistores
	Presión	Pérdidas de carga, rendimiento turbocompresor	Columnas de líquido, sensores piezorresistivos
	Gasto de aire	Rendimiento volumétrico, dosado	Toberas, diafragmas, flujo laminar, anemómetros

Contaminantes gaseosos		Espectrométricos, quimioluminiscencia, ionización de llama, etc.
Partículas		Filtros, absorción de radiación luminosa o láser
Opacidad de humos		Opacímetros
Parámetros específicos instantáneos	Presión	En cilindro: presión media efectiva, potencia y rto. indicados, rto. mecánico, presión máxima En colectores: gasto instantáneo
	Ángulo de giro	Variación del volumen del cilindro
		Piezoeléctricos, muelle débil Piezoeléctrico, piezorresistivos Codificadores angular ópticos o magnéticos

A continuación, se detallan los parámetros aquí mencionados:

### Régimen de giro y ángulo de giro

Normalmente los frenos dinamométricos suelen llevar asociado un sensor de velocidad basado en codificador angular que es un captador magnético enfrentado a una rueda fónica (dentada), ver Figura 14, que da una señal de impulsos al abrir y cerrar continuamente el circuito magnético. Este codificador es usado tanto para la toma del régimen de giro como para conocer el ángulo girado en cada instante, pudiendo sincronizar medidas de variables instantáneas del motor (p. ej: obtener el diagrama del indicador) con otra señal única de referencia en cada revolución. En la Figura 14 se ve también una dinamo tacométrica que da un voltaje que es directamente proporcional a su velocidad de rotación.

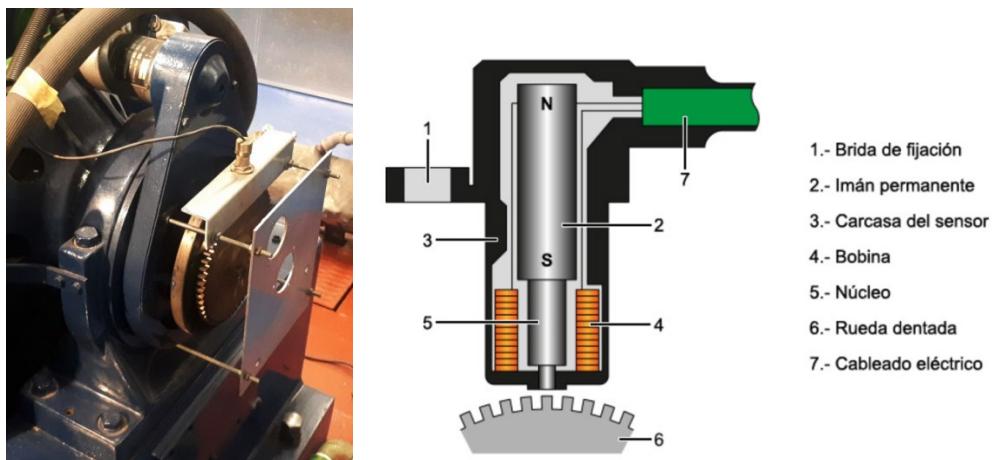


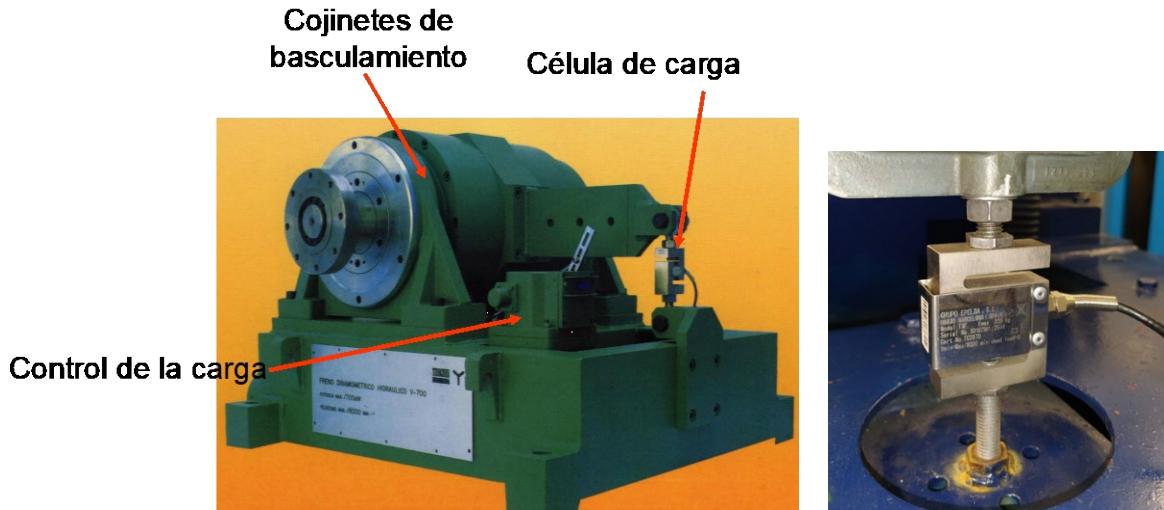
Figura 14.- Medidores de revoluciones por rueda fónica y sensor inductivo y por dinamo tacométrica.

También hay codificadores ópticos, que llegan a tener una mayor resolución y menos problema de ruido y se pueden usar dinamos tacométricas que dan un voltaje proporcional a su régimen de giro.

### Par efectivo

El método más habitual para medir el par efectivo del motor se basa en medir el par resistente del freno y suponer que son iguales. Esto es cierto si la transmisión es rígida y si su rozamiento con el aire es despreciable,. Para medir el par resistente, como se explicó antes, el estator (carcasa) del freno esté montado

basculante, con libertad de giro, pero impedido por un medidor de fuerza (dinamómetro) instalado a una distancia conocida del eje de rotación del freno (brazo de palanca), que impide su giro, como muestra la Figura 15. La precisión de este método depende de la precisión dada por el fabricante en la medida del brazo de palanca, y de la precisión del sensor que da el valor de la fuerza.



**Figura 15.- Medición de par efectivo mediante dinamómetro con un brazo de palanca determinado. A la derecha medidor de fuerza.**

Se pueden usar torsímetros instalados en la unión entre motor y freno dinamométrico para la medida directa del par motor con éste en funcionamiento. Las galgas extensiometrías se sitúan en el eje de transmisión entre el MCIA y el elemento que recibe la potencia (generador eléctrico, transmisión de un vehículo, etc.), que está en rotación. Ello implica una dificultad en enviar la información a la central de toma de datos, teniendo que ser bien por escobillas, bien por ondas cortas de radio. Debido a esta complicación, los torsímetros son utilizados solo en contadas ocasiones o para medir el par del motor en su ubicación real (barcos, grupo electrógenos, etc.).

Finalmente, se puede medir la potencia de frenado necesaria en forma de potencia eléctrica si se utiliza un generador eléctrico. Con la potencia efectiva de frenado y el régimen de giro se puede calcular el par efectivo dado por el MCIA. Sin embargo, este método cuenta con una cierta incertidumbre, por las pérdidas de la generación de electricidad.

A lo largo de la historia se han usado otros tipos de procedimientos como los torsímetros ópticos, consistentes en dos discos separados ligeramente por un elástico que se torsiona más o menos según el par que transmite, habiendo en uno de ellos una ranura con una escala, y en el otro un orificio por el que pasa un haz luz. De esta manera se ve con un espejo y una lupa el valor del par aplicado en función de la torsión producida en el eje.

### Gasto de combustible

El gasto de combustible parece a priori una variable de fácil medición; sin embargo, hacerlo de manera muy precisa implica ciertas dificultades. Un método muy utilizado en ensayos estacionarios consiste en medir el tiempo que tarda el motor en consumir una cantidad determinada de combustible. Este tiempo debe de ser por un lado lo suficientemente largo como para impedir errores importantes de medida, pero por el otro no demasiado, para garantizar el funcionamiento estacionario. Algunos autores aconsejan un tiempo medio entre 30 y 60 segundos. Hay dos métodos básicos para llevar esto a cabo:

- *Método gravimétrico:* Consiste en determinar el tiempo empleado en consumir una masa de combustible almacenado en el depósito de una balanza de alta precisión. Aunque de apariencia sencilla, este método es notablemente costoso.

- *Método volumétrico:* En este caso la cantidad de combustible a consumir es un volumen determinado, siendo su medida mucho más sencilla. Tiene la contrapartida de depender la masa de combustible consumido, y por lo tanto la energía térmica aportada al motor y su rendimiento, de la temperatura del combustible por su influencia sobre la densidad. El combustible que se queda en las paredes del sistema de medición también puede falsear algo la medida, cosa que no se da si el medidor es gravimétrico.

También se usan caudalímetros modernos para combustible que dan un valor más preciso en menos tiempo, pudiendo registrar la variación del consumo en la central de medida como se hace con otras variables. Destacan los caudalímetros de turbina, los de ruedas dentadas o los de tipo acústico basados en la velocidad del sonido en el combustible.

## Presión

La presión se puede medir como media a lo largo de un tiempo, o como variable instantánea. Destaca la presión en el cilindro para el estudio del proceso de combustión, la presión en los conductos de admisión y escape para estudio de pérdidas de carga y gasto, y la presión en auxiliares como los sistemas de lubricación e inyección.

Para la medida de presiones medias o instantáneas se usan los siguientes métodos:

- *Manómetros tipo Bourdon o similares:* Transductor mecánico en el que el fluido reside en un tubo en forma de C y con sección transversal cuadrada. La diferencia de presión con el exterior hace que la sección tienda a curvarse, estirándose como consecuencia el tubo, y haciendo girar finalmente el indicador.
- *Columnas líquidas de fluido:* Transductor mecánico que consiste simplemente en una columna en forma de U, con presión atmosférica a un lado, y presión a medir al otro lado. La diferencia de presiones hace que la columna se desplace, midiendo directamente la presión en milímetros de columna de agua (o de mercurio). Por su autocalibración, sencillez y precio, es el método más utilizado para medición de presiones medias. Sin embargo, cuenta con la desventaja de no poder ser registrada de manera automática.
- *Captador piezorresistivo:* Transductor eléctrico que se basa en la propiedad de los semiconductores de variar su resistencia eléctrica cuando se deforma por la acción de la presión. Poseen alta sensibilidad y frecuencia natural, pero con importantes derivas térmicas. Su temperatura máxima de trabajo es 150 °C, siendo importante su refrigeración. Se usa para medición de variaciones de presión pequeñas a altas frecuencias, i.e. en los colectores de admisión y escape.
- *Captador piezoeléctrico:* Se basa en la propiedad de los cristales de cuarzo de cargarse eléctricamente al ser sometidos a presión. Precisan la normalización de la señal mediante dispositivos costosos, pero a cambio ofrecen una adecuada sensibilidad y linealidad, buena respuesta dinámica, y condiciones de trabajo aceptables hasta 350 °C con no muy alta deriva; por ello se pueden utilizar para medir la presión durante el proceso de combustión y escape. El problema es que no miden presiones absolutas sino diferencias de presión respecto a una de referencia, y pierden la señal si la presión es estacionaria.

## Temperatura

Se trata de una de las variables más difíciles de medir con precisión, debido al tiempo que se necesita para llegar al equilibrio térmico y por la posible variación de propiedades físicas del propio medidor en el rango de temperaturas abarcado. Sin embargo, se trata de una variable fundamental, por lo que se usan, de manera casi universal, termómetros eléctricos para la obtención de valores medios de esta variable:

- *Termorresistencias:* Se trata de resistencias metálicas (platino, níquel, cobre y wolframio) cuyo valor varía linealmente con la temperatura. Tienen una gran precisión y linealidad, pero una muy

baja sensibilidad y lenta respuesta. Además, son caras y requieren de sistemas de alimentación. Recomendables para medidas a bajas temperaturas –admisión, inyección, lubricación.

- *Termopares*: Son los más utilizados por su funcionamiento simple; se basan en la propiedad de los conductores metálicos de generar una fuerza electromotriz ante la diferencia de temperatura entre sus dos uniones. Se clasifican según la composición de sus dos uniones, la cual da rangos de funcionamiento diferentes. Los termopares mayormente utilizados en ensayo de motores son los formados con chromel-alumel, denominados de tipo k, por su mayor linealidad y su rango de funcionamiento. Su coste es relativamente bajo, su tiempo de respuesta corto, y no necesitan fuente de alimentación; sin embargo, son poco lineales, necesitan una referencia y dan poca tensión.
- *Termistores*: Al igual que las termorresistencias, su funcionamiento se basa en la variación de resistencia eléctrica con la temperatura, pero en este caso sobre semiconductores. Esto implica una alta sensibilidad, pero baja linealidad. Sus grandes variaciones con la temperatura, junto a su rapidez de respuesta, lo hacen idóneos para control y seguridad.

Además de estos métodos destacan los pirómetros de radiación y ópticos, que no necesitan contacto y constituyen el único método para medir muy altas temperaturas, como la temperatura de llama, y para medir la temperatura de zonas de difícil acceso como los segmentos.

### Gasto de aire

El gasto o caudal de aire de entrada al motor tiene una gran importancia en la potencia efectiva alcanzada por el motor debido al rendimiento volumétrico, además de afectar al proceso de combustión. Un procedimiento usual de medida se basa en la diferencia de presión entre los dos lados de una singularidad introducida en el conducto (constricción), limitando dicha caída de presión para reducir los efectos intrusivos en el ensayo, y para asegurar condiciones de fluido incompresible, bajo las cuales se puede aplicar la ecuación de Bernoulli. Destacan los siguientes métodos:

- *Tobera calibrada*: Se sitúa una tobera en la admisión de aire atmosférico con un coeficiente de pérdida de presión conocido, y se mide la presión antes y después de la tobera. De esta manera se tiene que el cuadrado del gasto másico es proporcional a la diferencia de presiones por la densidad del fluido, suponiendo el proceso incompresible. Gracias al uso de una tobera, la pérdida de presión de parada es muy baja, o lo que es lo mismo, el coeficiente de descarga es próximo a 1, y además su coste es bajo y su instalación sencilla, por lo que es muy utilizado.
- *Orificio calibrado o diafragma*: Consiste en la instalación de un orificio en el conducto, midiendo la presión antes de la singularidad y en la contracción de vena tras ella, siendo la relación entre el gasto másico y la pérdida de carga del mismo tipo que para la tobera (función cuadrática). Cuenta con la ventaja de ocupar muy poco, siendo fácil de instalar e intercambiar; a cambio, el coeficiente de descarga es del orden de 0.6, lo cual implica ciertas pérdidas de carga.
- *Caudalímetro de flujo laminar*: Se trata de un tubo metálico con un elevado número de conductos separados por paredes delgadas en su interior. El flujo se reparte por estos conductos de pequeño diámetro, asegurándose un flujo sustancialmente laminar. Como consecuencia, según la ley de Poiseuille la diferencia de presiones en sus extremos es proporcional a la velocidad/gasto másico. Esta linealidad tiene ventajas frente a flujos pulsatorios, aunque su instalación es más compleja, y requiere especial cuidado en su mantenimiento para evitar ensuciamientos. Además, el rango de velocidades es acotado debido a la necesidad de mantener el flujo laminar en su interior.
- *Anemómetros de hilo o placa caliente*: Consiste en un hilo conductor en el seno del fluido por el que circula una corriente dada que lo calienta. Según la cantidad de fluido que pase, la transferencia de calor del hilo al fluido variará, cambiando a su vez la temperatura de equilibrio del metal. Esto varía su resistencia eléctrica, que da el valor del flujo del fluido mediante las pertinentes correlaciones. La velocidad multiplicada por la densidad del aire, la sección de paso y un coeficiente

de flujo del equipo da como resultado el gasto másico. Se trata de métodos caros y muy sensibles a la suciedad, por lo que no son muy utilizados.

- *Otros anemómetros como los de tubo de Pitot, el de desprendimiento de vórtices o el de Coriolis,* también pueden utilizarse con los mismos comentarios que en caso anterior.

La ventaja de tener un transductor mecánico lineal frente a una relación cuadrática es que, bajo flujos pulsativos, la medida media de la diferencia de presiones se puede utilizar para medir el caudal medio. Esto no es así con las relaciones cuadráticas, por lo que se debe utilizar un volumen de remanso entre el cilindro y la medida para conseguir caudales constantes en la toma del valor.

### **Emisiones contaminantes en el escape**

Las emisiones contaminantes más importantes en los motores de combustión interna son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (HC), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y las partículas. Cabe destacar que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no debe considerarse como un gas contaminante, puesto que se trata de un gas inerte que es producto de todo proceso de combustión de un hidrocarburo

Los métodos de medida para los diferentes elementos son:

- *Analizador de absorción de radiación infrarroja no dispersivos (NDIR):* Se usa para medir principalmente CO y  $\text{CO}_2$ , aunque también puede dar valores cualitativos poco precisos para  $\text{NO}_x$  y HC. Se basa en la propiedad de ciertos gases de absorber la radiación infrarroja en un estrecho rango de longitudes de onda. Debido a que el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$  absorben radiación en rangos muy parecidos y que el equipo puede dañarse por la condensación de agua en su interior, los gases de escape deben de ser desecados antes de llevarlos al analizador.
- *Quimioluminiscencia:* Sirve para medir emisiones de  $\text{NO}_x$ , y se basa en la emisión de fotones cuando el NO reacciona con ozono ( $\text{O}_3$ ). Así, el  $\text{NO}_2$  debe de ser convertido en NO en un catalizador antes de proceder al proceso de quimioluminiscencia. El ozono se obtiene en el mismo analizador mediante descarga eléctrica o con radiación ultravioleta. Este análisis debe de ser realizado también con gases secos o el equipo debe estar calefactado internamente para evitar la condensación del agua.
- *Detector de ionización de llama:* Sirve para la medición de HC, y se basa en la producción de electrones libres e iones positivos durante su combustión en el interior de una llama de hidrógeno a una temperatura aproximada de 190°C para evitar la condensación de los hidrocarburos. En un campo eléctrico que hacen circular los iones y electrones, siendo la corriente generada proporcional al número de átomos de carbono provenientes de los HC. Por ello estos equipos se denominan “contadores de carbono” y el resultado se suele dar en base metano ( $\text{C}_1$ ) o base propano ( $\text{C}_3$ ) según se calibre con uno u otro gas.
- *Opacímetros* que miden lo opaco que es el gas de escape. Consiste en hacer pasar los gases de escape entre una emisión de luz a un lado y un fotodiodo al otro. La opacidad se mide mediante el porcentaje de luz que atraviesa los gases y llega al diodo. Sirve para ensayos estacionarios y dinámicos.
- 
- *Medidor número de partículas por unidad de volumen:* Se basan en contar las partículas que hay en un cierto volumen de gas de escape, en tamaños desde 10 nm a 1000 nm. Hay diversas tecnologías unas basadas en cargar las partículas y otras en suspenderlas en un aerosol líquido, pero su explicación queda fuera del alcance de este texto.

### 3. I banco de pruebas del laboratorio de Motores Térmicos

La Figura 16 muestra un esquema de los elementos de un banco de pruebas.

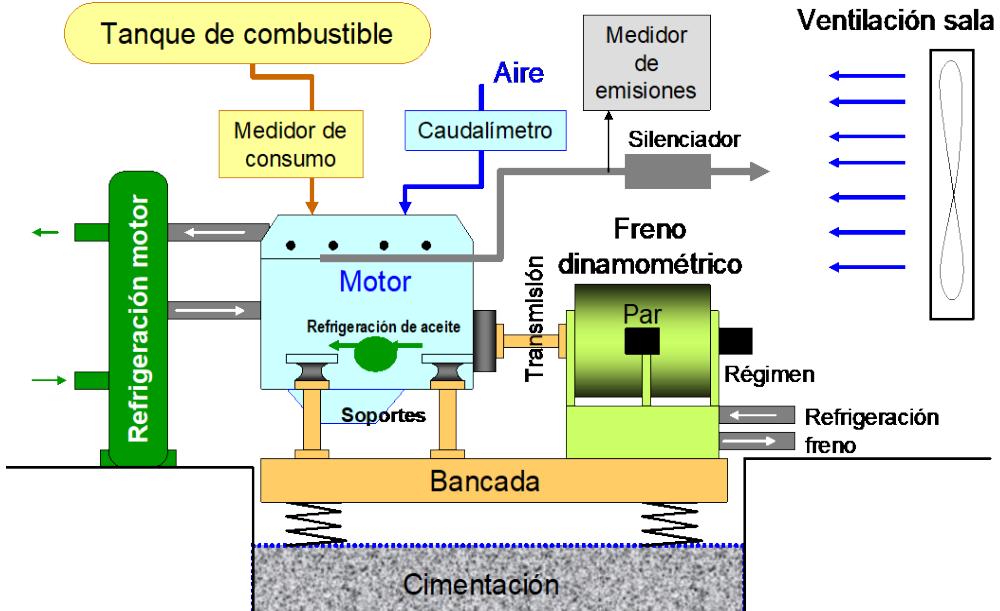


Figura 16- elementos de un banco de pruebas genérico.

Tanto la refrigeración del motor como la del freno dinamométrico se realizan con agua del exterior que viene bombeada desde una alberca situada bajo la explanada enfrente de la cafetería de la Escuela, y es retornada a la misma mediante otra bomba situada en el sótano del Laboratorio.

La ventilación de la celda se hace mediante dos grandes ventiladores de impulsión y extracción situadas en la nave del Laboratorio y disponen de insonorizadores a la entrada y salida de la celda para evitar la salida del ruido del motor al exterior.

El banco de ensayo a usar en esta práctica es la celda nº 5 del laboratorio de Motores Térmicos. Se estructura en una sala insonorizada con una ventana de seguridad y con ventilación de entrada y salida insonorizada. Dispone de una bancada de masa sísmica sustentada sobre muelles que soporta el freno dinamométrico y el motor. Ambos se conectan con una transmisión elástica especial para este tipo de ensayos.





**Figura 17- Sala de control del banco de pruebas. Se ve el motor a través del cristal de seguridad.**

La sala de control dispone de los mandos del motor y de los instrumentos de medida necesarios que, como se ve en la Figura 17, están integrados en el sistema informático de control de la celda. El interior de la celda tiene las paredes insonorizadas y contiene la bancada insonorizada en base a una masa sísmica de 4000 kg a la que se unen el motor y el freno, montada sobre muelles, las entrada y salida de aire como se ve en la Figura 18.



**Figura 18. Motor y freno en la bancada de la celda 5.**

### **3.1. El motor**

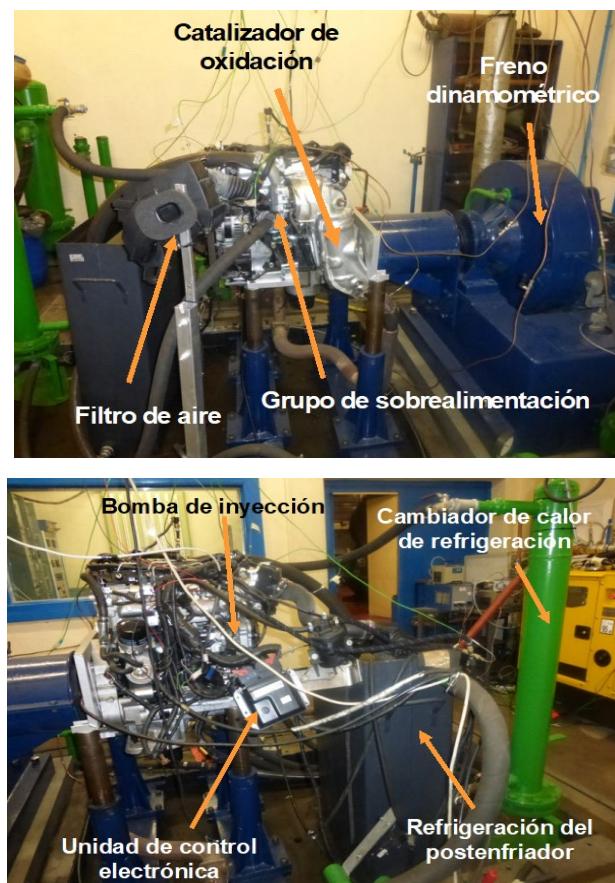
Se va a realizar un ensayo sobre un motor NISSAN diésel de cuatro cilindros turbo-sobrealimentado con post-enfriamiento, cuyos datos son:

- Modelo YD
- Número de cilindros: 4
- Diámetro: 89 mm

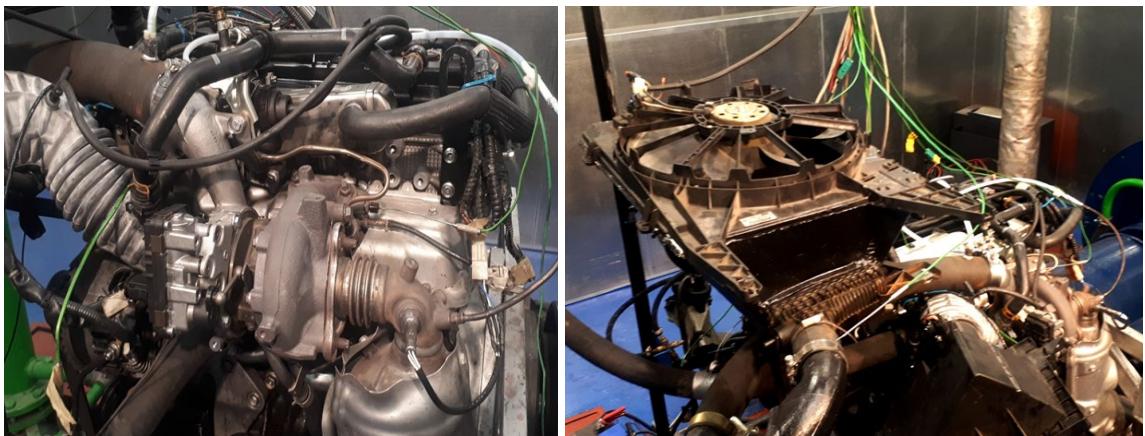
- Carrera: 100 mm
- Relación de compresión: 15
- Potencia máxima: 150 CV a 3000 rev/min
- Par máximo: 390 Nm a 2200 rev/min

Este motor se utiliza en vehículos tipo todo-terreno, furgonetas y pequeños camiones. El control del grado de carga se puede hacer a través mediante una palanca con posicionamiento micrométrico en la sala de control que acciona mediante un cable de acelerador del vehículo situado junto al motor. El pedal del acelerador acciona un potenciómetro que comanda a la Unidad de Control Electrónica del motor, igual que haría el pedal del acelerador en un vehículo. Pero también puede controlarse directamente la corriente del potenciómetro del acelerador por medio del programa de control implementado en el sistema informático de control de la celda mediante un número en la pantalla.

Las figuras 19 a 21 muestran el motor Nissan en el banco de pruebas, con indicación de los elementos principales.



**Figura 19.- Vista del motor Nissan en el banco de pruebas y algunos elementos auxiliares.**



**Figura 20.** Turbo del motor y sistema de refrigeración del postendriador con ventilador en el banco de pruebas



**Figura 21.** Catalizador de oxidación en el escape.

### 3.2. El freno dinamométrico

La sala de ensayos nº 5 del Laboratorio de Motores Térmicos dispone de un freno electromagnético con una célula de carga instalada que envía la señal de la fuerza ejercida para equilibrar el estator a la zona de control de la celda. El freno llevaba originalmente un tacómetro eléctrico (básicamente una dinamo tacométrica). La alimentación eléctrica las bobinas se realiza desde la unidad electrónica en la sala de control. Esta unidad dispone de una función denominada “n = constante”. Mediante un potenciómetro se comanda el régimen de giro al que se desea que se mantenga el conjunto motor – freno. Si el operador del ensayo trata de acelerar, el régimen de giro del sistema subiría, pero la electrónica de control del freno aumenta la intensidad a las bobinas para restablecer el régimen de giro de consigna. Lo contrario ocurre si se desacelera.



**Figura 22.- Freno dinamométrico electromagnético y célula de carga de medida de par.**

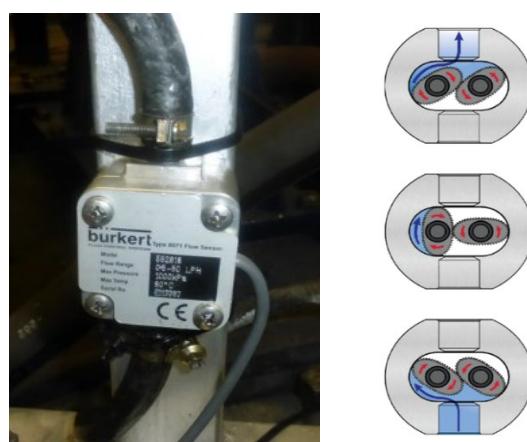
### 3.3. Otros instrumentos

Actualmente la celda 5 dispone de un dispositivo conectado a la salida normalizada OBD (On Board Diagnostics) de motor que permite “leer” algunos parámetros que usa la Unidad de Control Electrónica (ECU) para su funcionamiento, Figura 23. Este dispositivo envía a un ordenador portátil los valores de estas variables que son mostrados por pantalla. Así se mide el caudal de aire, la presión de salida del turbocompresor y las temperaturas en varios puntos del motor. Otras magnitudes se medirán con instrumentos y sensores apropiados en la celda de ensayos.



**Figura 23.- Dispositivo de “lectura” de parámetros de la Unidad de Control por salida OBD.**

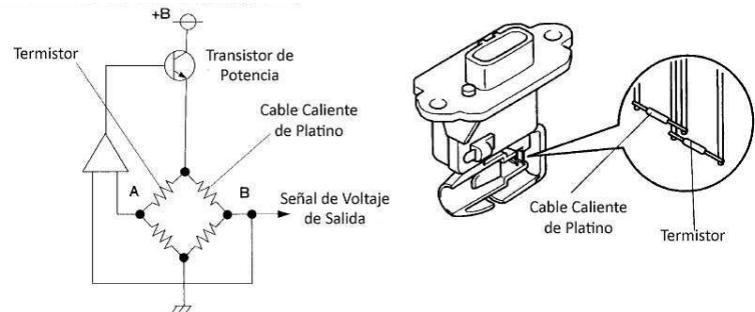
El consumo de combustible se mide por un caudalímetro de émbolos ovales que transmite una señal eléctrica de frecuencia a un indicador digital, Figura 24.



**Figura 24.- Medidor de gasto de combustible volumétrico.**

En cuanto a las temperaturas, todos los termómetros situados en el motor: entre compresor y postenfriador de aire, entre postenfriador y cilindro, entre cilindro y turbina, tras turbina, aceite, refrigerante antes y después del circuito de refrigeración, agua del freno dinamométrico y combustible, son termopares de tipo K, gracias a su gran versatilidad y rango de medida. Además, hay una termorresistencia para la medida de temperatura de la sala.

El gasto de aire se mide mediante el propio caudalímetro del motor que lleva instalado entre el filtro de aire y el turbocompresor, y es de tipo placa caliente, que se ve en la Figura 25.



**Figura 25. Sensor de caudal de aire del motor (Sensor MAF)**

El banco de pruebas tiene también un caudalímetro de refrigerante de tipo ultrasónico que se basa en la generación de ondas sónicas que atraviesan el fluido para medir el caudal, siendo este parámetro dependiente del tiempo que tarda en llegar una onda desde un emisor a un receptor. Está instalado en la tubería de refrigerante que vuelve desde el cambiador de calor al motor, como se ve en Figura 26.



**Figura 26. Caudalímetro ultrasónico en la tubería de refrigerante entrante al motor.**

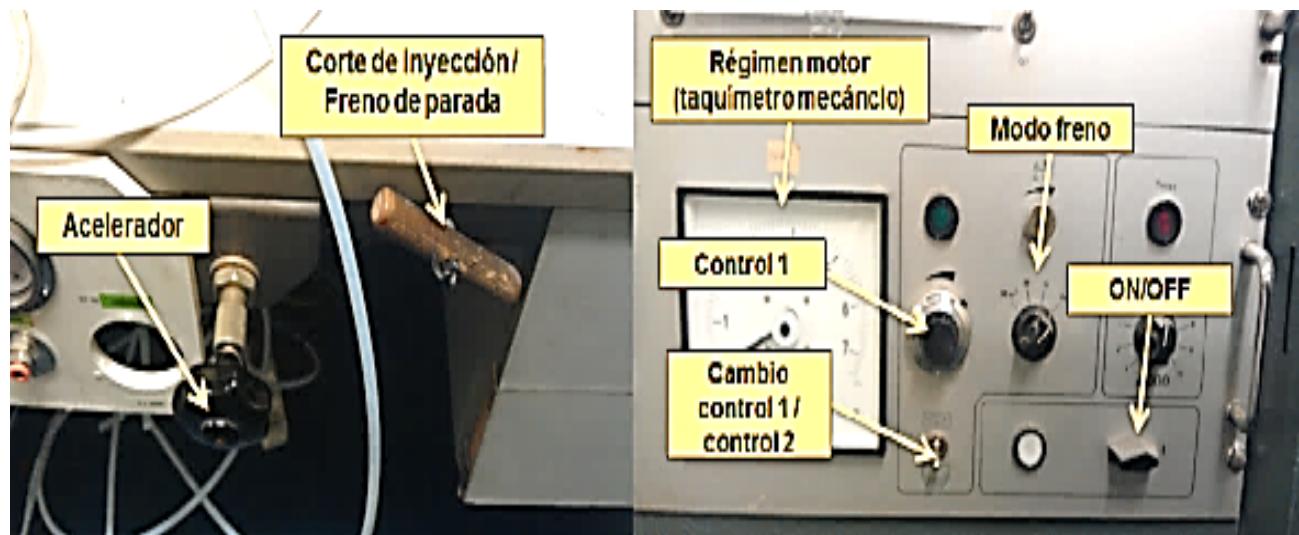
### 3.4. La celda de ensayos

Desde la sala de medidas se controla el funcionamiento del motor, y se toman las medidas de los siguientes parámetros. El control del motor se hace, por un lado, mediante la carga a la que trabaja el mismo (cantidad de combustible inyectado), y por otro, mediante el freno electromagnético. Las paredes y la ventana de control están insonorizadas mediante lana de vidrio y mediante vidrios montados oblicuos respectivamente, y la puerta de acceso es también insonorizada con relleno de fibra aislante, como se ve en la Figura 27



Figura 27. Ventana de control e insonorización de la celda 5.

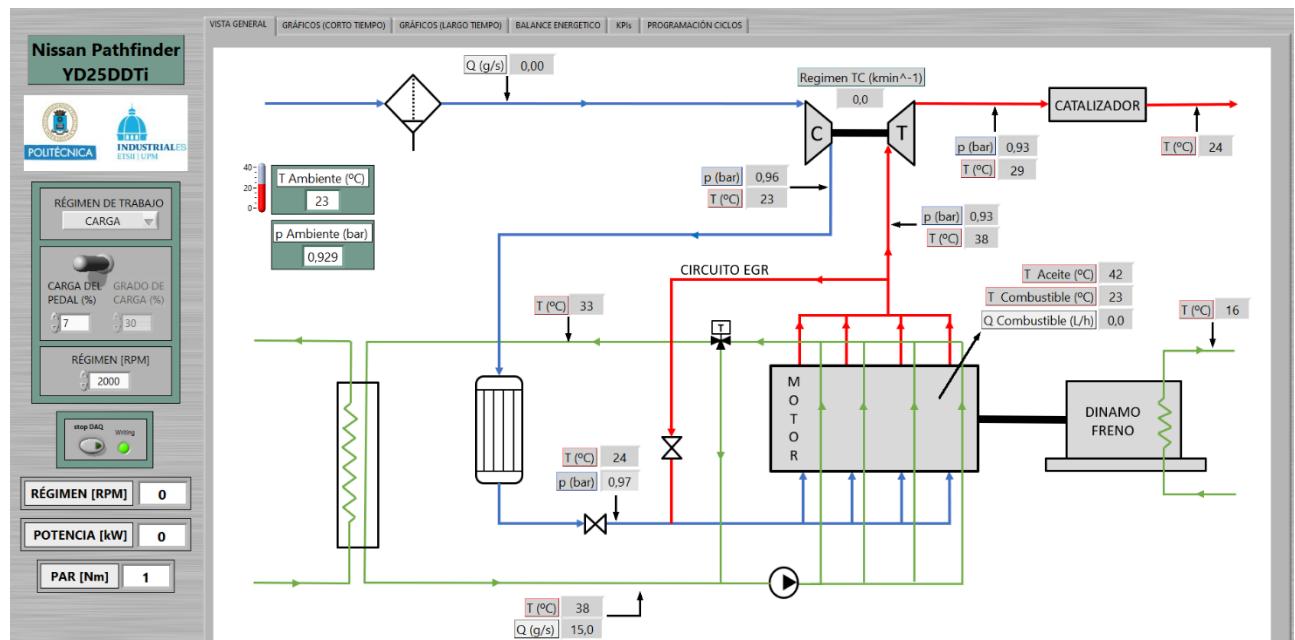
En la Figura 28 se observan los antiguos controles el motor y del freno dinamométrico. El acelerador del motor en el vehículo que equipa este motor Nissan se basa en que al pisar el pedal se hacen girar dos potenciómetros que envían señales a la Unidad de control electrónico (ECU) como se ve en la parte inferior de la Figura 28. En el banco de pruebas estos potenciómetros son simulados desde un programa basado en Labview y mostrados en la pantalla de un ordenador como se ve en la Figura 29.





**Figura 28.- Antiguos controles del motor mediante carga y corte de inyección (izquierda) y freno dinamométrico (derecha), así como el accionamiento del pedal de acelerador mediante un cable.**

El freno dinamométrico electromagnético utiliza una intensidad de alimentación a las bobinas para generar el par resistente. El control del freno dispone de una automatización denominada “ $n = \text{constante}$ ” de manera que cada posición del potenciómetro de control 1 de la Figura 28 corresponde a un régimen de giro de consigna para el freno. Si el motor ejerce un par motor mayor que el freno y el régimen de giro tiende a subir, los controles PID del freno aumentan la intensidad a las bobinas para aumentar el par resistente y volver al régimen de giro de consigna. Y de igual forma reduce la intensidad si el régimen de giro baja. Esto facilita el ensayo del motor a régimen de giro constante. Actualmente el control de ese potenciómetro se hace desde el programa de ordenador basado en Labview, mediante el tecleo del valor de consigna en la parte izquierda de la pantalla, que se muestra en la Figura 29.



**Figura 29. Pantalla de control de mando del motor y medida de variables del ensayo**

El laboratorio de Motores Térmicos cuenta con numerosos equipos con diferentes tecnologías de medida de emisiones contaminantes en los gases de escape del motor y anteriormente se realizó aquí una breve

descripción de todos los equipos. Los sistemas de medida de emisiones gaseosas o de partículas se pueden situar antes del catalizador de oxidación si se quieren conocer las que el motor emite o después del catalizador para poder calcular el rendimiento del catalizador de oxidación. Es importante recordar que los catalizadores de oxidación en los motores diésel que trabajan siempre con exceso de aire en el gas de escape, reducen las emisiones de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos no quemados (HC) y ligeramente la emisión de partículas por ser en parte importante de las mismas el hollín, que tiene una composición formada sobre todo por carbono libre.

El motor se refrigerará mediante un cambiador de calor del refrigerante del motor con agua del exterior como se ve en la Figura 30. El motor usa agua con aditivos como refrigerante que se refrigerará en dicho cambiador y su temperatura se controla por el termostato que tiene el propio motor.

El caudal de agua exterior se controla por una válvula termostática a la entrada desde el exterior (parte inferior de la Figura 30) que abre cuando la temperatura de salida del refrigerante hacia el motor supera un valor de consigna ajustable. El refrigerante está presurizado por lo que puede trabajar a temperatura superior a la de ebullición y en el cambiador de calor hay una válvula de seguridad y una botella de expansión que se ve en la parte superior de la figura 30.

El aceite se refrigerará en un cambiador de calor aceite – refrigerante que forma parte del propio motor y que usa el mismo refrigerante del motor. Se sitúa a la entrada del retorno desde el cambiador de calor, por ser la parte más fría del refrigerante.

El caudalímetro de refrigerante se sitúa en la tubería de retorno desde el cambiador de calor que refrigerará el aceite y el motor.



**Figura 30. Cambiador de calor de refrigeración del motor**

#### **4. Riesgos y precauciones**

Un motor de combustión interna siempre implica el movimiento de muchos elementos a gran velocidad, por lo que se deben de tomar precauciones para evitar accidentes graves en el poco probable caso de que algo falle. Por ello, el control de la instalación no se realiza junto al motor, sino que hay una sala de control separada por un cristal blindado, de manera que uno puede ver el proceso de manera protegida. Hay que tener en cuenta que, al ser un motor de laboratorio, se realizan periódicamente trabajos sobre él, aumentando el riesgo de fallo con respecto a un vehículo, donde el motor se prueba, se instala, y no se vuelve a tocar salvo averías importantes. Por ello es importante mantenerse en todo momento en la sala de control y toma

de medidas. En cualquier caso, sí se podrá abrir eventualmente la puerta de paso a la sala de ensayo ligeramente con el objetivo de escuchar el ruido que hace un motor en funcionamiento al aire libre, ya que tanto el grueso muro de la celda de ensayos, como el cristal que lo separa de la sala de zona de medida, tienen también como objetivo la insonorización de la primera. Si esto se hiciese, los alumnos podrán advertir la importancia que tiene un buen diseño acústico en la carcasa del motor, ya que el sonido en la celda de ensayo es significativamente superior al que puede oírse en un autobús urbano.

Otro riesgo muy característico de los ensayos de motores en salas cerradas es la emisión de productos contaminantes. Por ello es importante, por un lado, conectar el escape directamente con la atmósfera exterior por los conductos pertinentes, y por otro tener una adecuada ventilación de la sala. La primera medida de precaución tiene dos implicaciones en el ensayo: primero, al ser el conducto de mayor recorrido, hay mayores pérdidas de carga, por lo que la potencia efectiva medida podría ser menor que si se realizara el escape a la sala. Además, esto hace que no haya salida de ruido de escape en la propia sala, disminuyendo el ruido del motor con respecto a lo que realmente sería.

En lo que se refiere al cuidado de la instalación, el alumno deberá certificar antes de empezar la práctica que todos los instrumentos están adecuadamente encendidos y mostrando valores nulos, especialmente los caudalímetros, que el intercambiador de calor para la refrigeración del motor está lleno, abrir la válvula del gasóleo, y poner el motor en baja carga. Si el motor se pusiese en funcionamiento sin refrigeración, su temperatura aumentaría pronto a valores no admisibles, produciéndose el fallo del motor. En cuanto a la válvula del combustible, es esencial, puesto que si no la bomba funcionaría en vacío por un breve tiempo (al no inyectar combustible se pararía muy pronto), entrando aire en el circuito, lo que pondría en riesgo al equipo de inyección. Por último, hay que ser conscientes siempre de donde está la palanca de frenado de emergencia (corte de inyección).

## 5. Desarrollo de la Práctica

### 5.1 Adquisición de datos

Los datos adquiridos en la práctica mediante Labview serán suministrados al alumnado una vez finalizada la práctica. Estos datos consistirán en un archivo de texto plano con el registro cada 0.1 s de todas las magnitudes medidas durante el ensayo. Será necesario, por lo tanto, limpiar dichos datos para poder trabajar con ellos y denotar así el punto de operación del motor en cada uno de los ensayos. Adicionalmente, también se podrá mostrar la evolución temporal de cualquier variable medida.

### 5.2. Prestaciones del motor

Teniendo en cuenta que el brazo de palanca de este freno es de 955 mm, la obtención del par efectivo dado por el motor es casi directa:  $M_e = F \cdot b$  (cuidado con las unidades). Una vez que se tiene el par efectivo para un régimen dado, se puede fácilmente obtener la potencia efectiva dada por el motor según la siguiente fórmula:

$$\dot{W}_e(\text{kW}) = M_e \cdot \omega = M_e(\text{Nm}) \cdot \frac{2\pi \cdot N(\text{min}^{-1})}{60} \cdot \frac{1}{1000}$$

Con respecto al consumo de combustible, el caudal másico se obtiene del volumétrico sabiendo la densidad del combustible (0,83 kg/dm<sup>3</sup> en el gasóleo).

En lo que respecta al consumo específico, es inversamente proporcional al rendimiento del motor, y se obtiene dividiendo el gasto entre la potencia efectiva:

$$g_{ef} \left( \frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) = \frac{\dot{m}_f(\text{kg/s}) \cdot 1000(\text{g/kg}) \cdot 3600(\text{s/h})}{\dot{W}_e(\text{kW})}$$

El rendimiento efectivo es la relación entre la potencia efectiva obtenida, y la potencia térmica cedida en la reacción química suponiendo combustión completa del combustible formando CO<sub>2</sub> y agua en forma de vapor. Esto se modela a través del poder calorífico inferior, H<sub>c</sub>, que toma un valor aproximado de 43.200 kJ/kg para el gasóleo:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_e(\text{kW})}{\dot{m}_f(\text{kg/s}) \cdot H_c(\text{kJ/kg})}$$

### 5.3 Gasto de aire y parámetros derivados

Así, ya hemos obtenido los parámetros fundamentales del motor para distintos regímenes y grados de carga, por lo que podemos realizar las curvas características del motor. Con respecto a los parámetros específicos, destaca en primer lugar el gasto másico de aire, puesto que a partir de él se puede obtener el dosado, de gran importancia en el proceso de combustión, y el rendimiento volumétrico, representativo del buen o mal diseño del proceso de renovación de la carga.

El caudal de aire se da directamente por la Unidad de Control Electrónica del motor y el caudal de combustible por el caudalímetro de gasóleo.

Una vez que tenemos el gasto de combustible y de aire, el dosado absoluto se obtiene de manera directa como la relación entre ambos:

$$F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (\text{esta expresión se muestra normalmente como un cociente, } 1/X)$$

El dosado relativo es la relación entre el dosado absoluto, y el dosado estequiométrico, esto es, el dosado necesario para que todo el combustible sea quemado y no quede oxígeno biatómico en los gases de escape. Para el gasóleo, el valor del dosado estequiométrico es F<sub>e</sub> = 1/14,6.

$$F_R = \frac{F}{F_e}$$

El rendimiento volumétrico es la relación entre la masa de aire real introducida en un cilindro, y la que se podría introducir en un proceso cuasiestacionario de admisión desde la referencia sin pérdidas de carga; trata de evaluar la capacidad de llenado del mismo, es decir el mayor o menor aprovechamiento de su cilindrada. Para un motor de 4 tiempos, como es el caso, sigue la siguiente expresión:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a(\text{kg/s})}{V_T(\text{m}^3) \cdot \rho_{a\text{REF}}(\text{kg/m}^3) \cdot \frac{N(r/\text{min})}{2 \cdot 60}}$$

Siendo V<sub>T</sub> la cilindrada;  $\dot{m}_a$  el caudal másico de aire medido a la entrada al compresor, es decir, a la entrada del motor, N el régimen de giro y  $\rho_{a\text{REF}}$  la densidad del aire en las condiciones después del sistema de alimentación (compresor + postenfriador), es decir, a la entrada a los cilindros del motor (presión absoluta y temperatura después de postenfriador). El suponer la referencia tras el compresor y el postenfriador tiene el inconveniente de que las pérdidas de carga a lo largo del conducto hasta ese punto no son tenidas en cuenta. Sin embargo la alternativa, que consistiría en las condiciones que tendría el fluido tras una compresión isentrópica a la presión de referencia y un enfriamiento a presión constante hasta la temperatura de referencia, se antoja demasiado complicada, y en cierto modo arbitraria en el sentido de que la presión de referencia debería de ser dependiente de las condiciones de funcionamiento con un supuesto turbocompresor ideal que aprovechara toda la energía disponible en los gases de escape.

Se pueden realizar ensayos a plena carga (acelerador en su posición máxima) como el de la Figura 28 (a) o a cargas parciales como la Figura 28 (b).

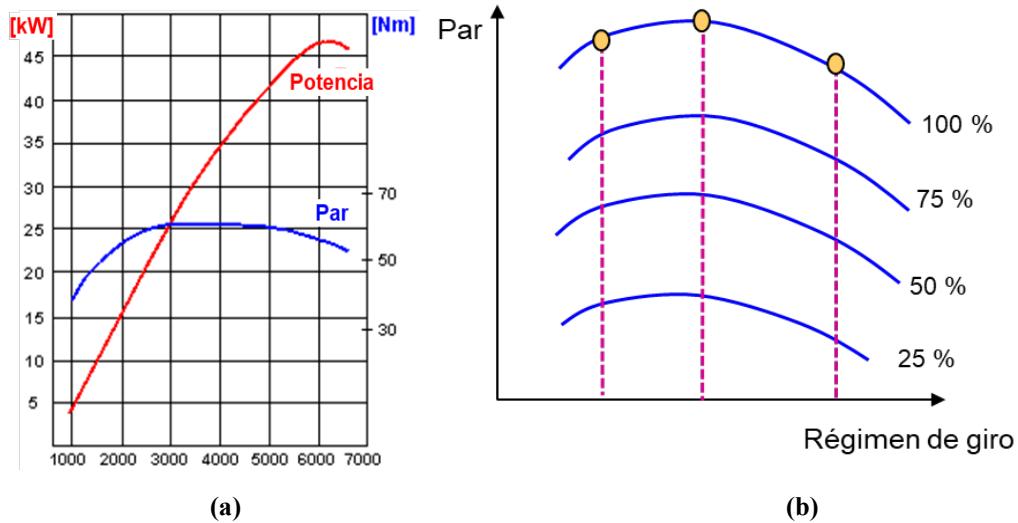


Figura 31. Curvas características a plena carga y a carga parcial.

#### 5.4. Balance de energía

Este análisis consiste en la comprobación de que toda la energía que entra en el motor sale de este en forma de calor o trabajo. Como es sabido, el rendimiento térmico de un motor de combustión interna se aleja bastante de la idealidad, alcanzando valores en la mayoría de los casos menores del 40%. Esto quiere decir que menos de la mitad de la energía que entra en el motor se transforma en trabajo, mientras que el resto se transforma en pérdidas de calor.

A continuación, podemos observar un esquema correspondiente al balance de energía típico de un motor de combustión interna en el que pueden observarse los flujos de energía a la entrada y salida del motor.

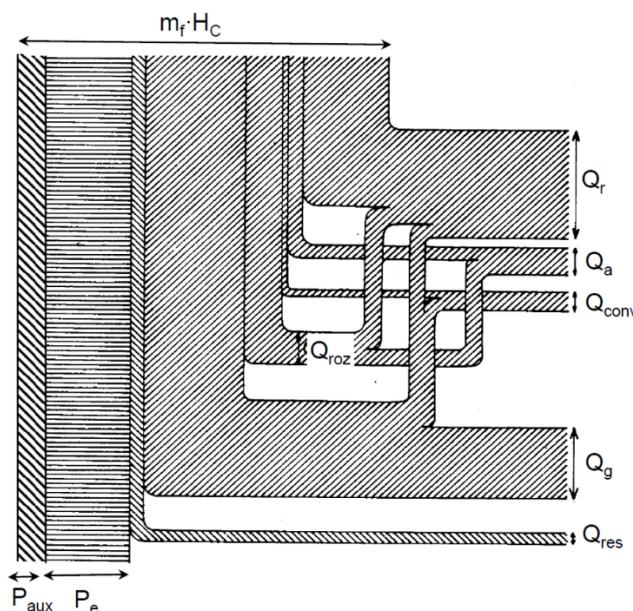


Figura 32. Balance energético de un MCIA

Donde:

$\dot{m}_f$  = Gasto de combustible

$H_c$  = Poder calorífico del combustible

$P_e$  = Potencia efectiva

$P_{aux}$  = Potencia de accionamiento de elementos auxiliares

$Q_r$  = Calor cedido en el sistema de refrigeración

$Q_a$  = Calor cedido en el refrigerador de aceite (si existe)

$Q_{conv}$  = Calor perdido por convección y radiación en las paredes del motor

$Q_g$  = Calor equivalente por la temperatura de los gases de escape

$Q_{res}$  = Calor equivalente a la combustión incompleta

$Q_{roz}$  = Calor equivalente a la fricción en el motor

La ecuación que debe cumplirse correspondiente a este balance es la siguiente:

$$\dot{m}_f \cdot H_c = P_e + P_{aux} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_a + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_g + \dot{Q}_{res}$$

En la siguiente tabla, se puede observar el porcentaje energético a la salida del motor que representa de cada uno de los elementos de la ecuación anterior en un motor de encendido provocado y uno de encendido por compresión:

	$P_e$	$Q_r$	$Q_{conv}$	$Q_g$	$Q_{res}$
MEP	25-28	17-26	3-10	34-45	3-10
MEC	34-38	16-35	2-6	22-35	1-2

Estos valores, sirven como referencia teórica de cómo se distribuye la energía de un motor de combustión interna. Como se observa, para el caso de los motores de encendido por compresión, la mayor parte de la energía aportada por el combustible se transforma en: potencia efectiva, calor cedido al refrigerante y calor equivalente por la temperatura de los gases de escape.

Dentro del balance energético representado en la expresión anterior, hay elementos que representan pérdidas energéticas en el motor que, por su naturaleza, son difíciles de medir. En base al tipo de sensorización instalada en el motor y a los parámetros que se pueden medir con esta instrumentación, se pueden caracterizar los siguientes elementos correspondientes al balance energético:

- Potencia del combustible.
- Potencia efectiva.
- Calor cedido por conducción de las paredes de la cámara de combustión al líquido refrigerante.
- Calor intercambiado en el intercooler.
- Calor equivalente por la temperatura de los gases de escape.

A continuación, se detalla cómo se han calculado, en base a los parámetros obtenidos durante los ensayos, los elementos que intervienen en este balance energético.

#### ▪ **Potencia del combustible**

$$Q_{combustible} = \dot{m}_{combustible} \cdot H_c$$

Donde:

$Q_{combustible}$  = Calor producido por la combustión del combustible.

$\dot{m}_{combustible}$  = Caudal másico del combustible inyectado.

$H_c$  = Poder calorífico del combustible.

El caudal másico de combustible ( $\dot{m}_{combustible}$ ) será un parámetro que se obtenga experimentalmente durante los ensayos, mientras que el poder calorífico ( $H_c$ ) será un dato proporcionado por el fabricante, con un valor de 43,4 MJ/kg.

- **Potencia efectiva**

Como se comentó en apartados anteriores, este parámetro se obtiene de manera indirecta como resultado de multiplicar el par motor por el régimen de giro (Expresión 3.3).

- **Calor cedido al líquido refrigerante**

$$Q_{refrigerante} = \dot{m}_{refrigerante} \cdot c_{p\,refrigerante} \cdot (T_{entrada\,intercamb} - T_{salida\,intercamb})$$

Donde:

$Q_{refrigerante}$  = Calor cedido al líquido refrigerante.

$\dot{m}_{refrigerante}$  = Caudal másico de líquido refrigerante.

$c_{p\,refrigerante}$  = Calor específico del líquido refrigerante.

El caudal másico de líquido refrigerante ( $\dot{m}_{refrigerante}$ ) será un parámetro que se obtenga experimentalmente durante los ensayos, mientras que el poder calorífico ( $c_{p\,refrigerante}$ ) será un dato proporcionado por el fabricante, con un valor de 3600 J/kgK..

- **Calor intercambiado en el intercooler**

$$Q_{intercooler} = \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\,aire} \cdot (T_{entrada\,intercooler} - T_{salida\,intercooler})$$

Donde:

$Q_{intercooler}$  = Calor intercambiado en el intercooler.

$\dot{m}_{aire}$  = Caudal másico de aire.

$c_{p\,aire}$  = Calor específico del aire medido a la temperatura media del entorno.

El caudal másico de aire ( $\dot{m}_{aire}$ ) será un parámetro que se obtenga experimentalmente durante los ensayos, mientras que el poder calorífico ( $C_{p\,aire}$ ) será un dato obtenido de tablas sobre propiedades termofísicas de fluidos. Estimando una temperatura media de la sala donde se realizan los ensayos de 25°C, se obtiene un calor específico de 1007 J/kgK .

- **Calor de los gases de escape**

$$Q_{gases\ escape} = \dot{m}_{gases\ escape} \cdot c C_p \cdot (T_{salida\ turbina} - T_{ambiente})$$

Donde:

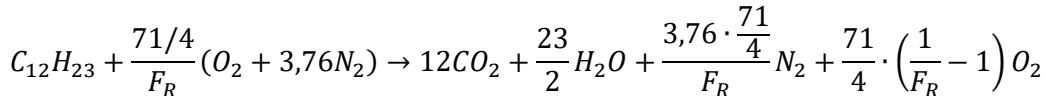
$Q_{gases\ escape}$  = Calor equivalente por la temperatura de los gases de escape.

$\dot{m}_{gases\ escape}$  = Caudal m醩ico de los gases de escape.

$c_p$  gases escape = Calor específico de los gases de escape.

El caudal m醩ico de los gases de escape ( $\dot{m}_{gases\ de\ escape}$ ) será un parámetro que se obtenga sumando el caudal de aire ( $\dot{m}_{aire}$ ) y el caudal de combustible ( $\dot{m}_{combustible}$ ).

Por otro lado, el poder calorífico de los gases de escape ( $C_p$  gases de escape) se obtiene calculando la media ponderada de los calores específicos de las sustancias que componen los gases de escape a la salida del motor. En la cámara de combustión se produce la siguiente reacción:



Donde:

$F_R$  = Dosado relativo. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{aire}}$$

Donde:

$F_e$  = Dosado estequiométrico.

El caudal de combustible ( $\dot{m}_f$ ) y el caudal de aire ( $\dot{m}_{aire}$ ) serán parámetros que se obtengan experimentalmente durante los ensayos, mientras que el dosado estequiométrico se calcula de manera teórica. Atendiendo a la reacción estequiométrica de la reacción y los pesos atómicos de las sustancias que intervienen, se obtiene un dosado estequiométrico ( $F_e$ ) de 0,0685.

Por tanto, conocidos los calores específicos a las temperaturas correspondientes de trabajo de las sustancias que intervienen en la reacción de combustión, se realiza una ponderación msica de los productos de la reacción para obtener el calor específico de los gases de escape.

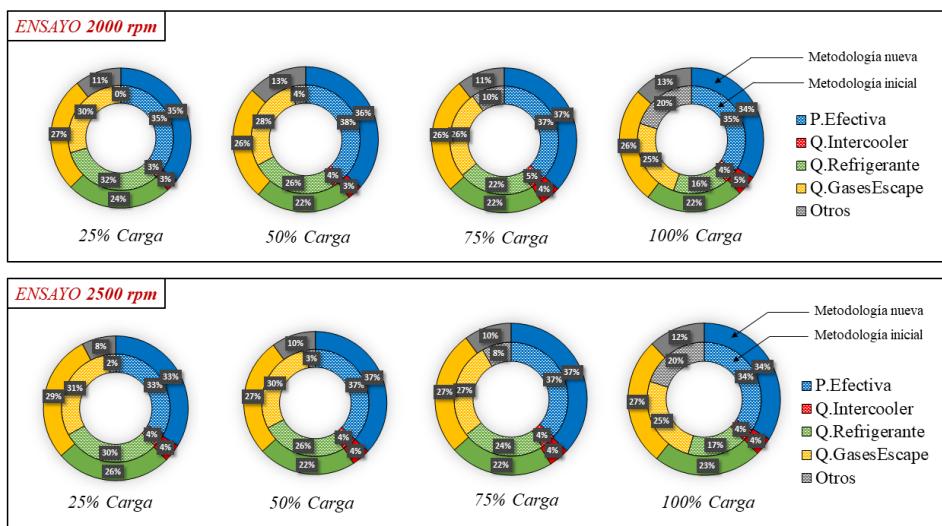
## 5.5. Desarrollo del ensayo

El ensayo se dividirá en tres partes:

### Parte 1.- Arranque en frío, estabilización térmica y análisis del balance energético:

Se procederá al comienzo de la práctica partiendo de la posición de ralentí y llevando al motor a un punto de funcionamiento determinado. Se analizar la respuesta dinámica del motor en frío y se irá apreciando el calentamiento del motor hasta llegar a una estabilización térmica de este. Mientras tanto, se identificarán las principales magnitudes relacionadas en este proceso, como pueden ser temperatura de aceite, de salida de agua o caudal de líquido refrigerante. El objetivo de esta parte será entender el comportamiento del motor

en frío, en transición y en régimen permanente. Una vez esté el motor en una temperatura cercana a la de operación nominal, se llevará a este a un grado de carga más alto.



**Figura 33. Balance energético del motor a diferentes régimenes de giro grados de carga.**

### Parte 2.- Ensayos a régimen de giro constante.

Simula la respuesta del motor al variar el grado de carga a cada régimen de giro, por ejemplo como si fuera un grupo electrógeno. En un régimen fijado por el potenciómetro de control del freno se va variando la posición del acelerador dando la consigna en la pantalla del ordenador, como se ve en la Figura 31.

La posición máxima es el 100 % de carga y a partir de esa se va barriendo al 75 %, 50 %, 25 % y 0% dejando estabilizar en cada condición. La secuencia es la siguiente:

1. Seleccionar un régimen de giro de consigna con el regulador del freno
2. Accionar el mando regulador del freno hasta que el motor alcance ese régimen de giro (se nota por que empieza a subir el par)
3. Ir modificando el mando regulador del acelerador del motor e ir barriendo diferentes grados de carga entre 100 % y 0% (% de par máximo a cada régimen). Por ejemplo:  
100 %, 75 %, 50 % y 25 %
1. Elegir una serie de regímenes de giro del motor y repetir lo mismo, por ejemplo:
  - 1500 r/min, 2255 r/min y 3000 r/min

2. Para cada punto de funcionamiento, llenar la hoja de datos con los valores indicados en los instrumentos.

### Parte 3.- Ensayos a grado de acelerador constante.

Simula la respuesta del motor con el pedal del acelerador en posición fija en un vehículo o máquina móvil. En este caso el acelerador se simula mediante una orden de intensidad comandada desde el programa de Labview. Manteniendo la intensidad constante se simula una posición de la palanca del acelerador en una posición fija. En una posición de acelerador constante, se va variando de control de régimen de giro del

freno mediante la orden de consigna en el ordenador, y se barre un rango de regímenes de giro del motor como indica la Figura 31. En cada punto del ensayo se estabiliza el régimen de giro con lo que el par motor y par resistente son iguales. La secuencia es la siguiente:

1. Seleccionar un grado de carga del motor con el regulador del acelerador (entre 0 a 100 %). Por ejemplo 100 %, 60 % o 30 %)
2. Accionar el mando regulador del freno mediante la orden en el ordenador, hasta alcanzar un régimen de giro deseado.
3. Ir modificando el mando regulador del freno para ir barriendo diferentes regímenes de giro
4. Elegir una serie de puntos de funcionamiento que abarquen el rango de giro del motor, por ejemplo:
  - 1500 r/min, 2000 r/min, 2500 r/min, 3000 r/min y 3500 r/min
5. Para cada punto de funcionamiento, llenar la hoja de datos con los valores indicados en los instrumentos.

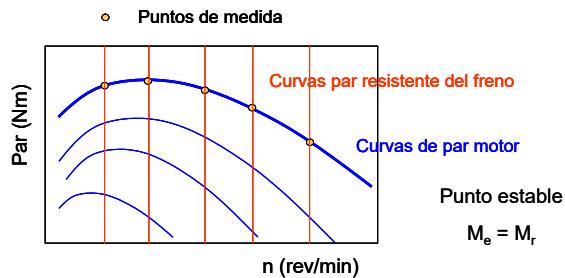
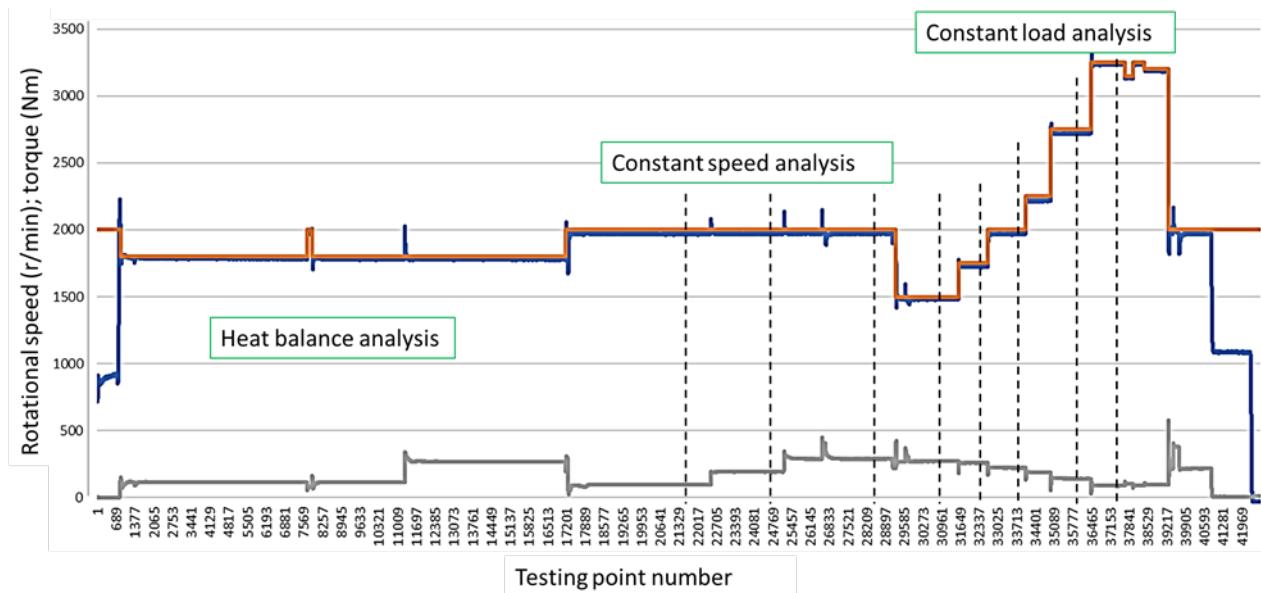


Figura 34. Esquema gráfico del procedimiento de medida de variables a carga constante.

## 6. MEMORIA A PRESENTAR

Procedimiento de determinación de los puntos de medida en los que hacer los cálculos para resultados a presentar en la memoria, a partir de los datos de la base de datos que se entregara al final de las sesiones prácticas



Los alumnos entregarán en Moodle una memoria en formato de informe técnico que contenga los siguientes apartados:

- Breve explicación de lo realizado en la práctica y el procedimiento de ensayo
- Explicación de los cálculos a realizar para determinar: potencia, dosado relativo, rendimiento volumétrico, consumo específico de combustible y rendimiento efectivo.
- Tabla de datos y parámetros medidos en el desarrollo práctico. Se podrá enseñar en función del tiempo la evolución de diferentes parámetros durante cada una de las partes y se enseñará el método de obtención de datos tratados para poder trabajar con ellos.
- Resultados Parte1: mostrar la evolución temporal del balance energético y de temperaturas clave en el proceso de estabilización térmica del motor: temperatura del aceite, del agua de entrada/salida, caudal de bombas, calor evacuado en refrigeración, etc. Finalmente, mostrar el balance energético completo a régimen permanente del último punto de operación medido. Justificar el resultado.
- Resultados parte 2 y parte 3: Mostrar la evolución de parámetros como
  - Par, potencia, pme
  - Dosado relativo y temperatura de escape
  - Gasto de combustible y consumo específico de combustible
  - Gasto de aire y rendimiento volumétrico
  - Rendimiento efectivo

Dibujar gráficas de resultados en función del régimen de giro para grado de carga constante y en función de grado de carga para régimen de giro constante: En la misma grafica se pondrán los diferentes grados de carga y los diferentes regímenes de giro con curvas de diferente color.

- Comentarios a los resultados: Se pedirá un análisis crítico de la evolución de las variables mostradas. Se podrá también enseñar la evolución de cualquier variable tomada para justificar la evolución y/o dependencia de las diferentes variables de estudio.
- Conclusiones

**IMPORTANTE: Se exigirá un correcto uso del lenguaje técnico a la hora de la redacción del informe, así como una correcta comunicación científico-técnica de datos, tanto en tablas como en gráficas. Revisar cifras significativas de los resultados a mostrar, unidades, formato adecuado de gráficas con magnitudes y unidades en cada uno de los ejes, etc.**

## ANEXO 1

Links a videos de interés sobre ensayos de motores en banco de pruebas

<https://www.youtube.com/watch?v=3bYHWvFdsag>

<https://www.youtube.com/watch?v=wcsnfHDv39s>

<https://www.youtube.com/watch?v=IftyD7hnOqs>

<https://www.youtube.com/watch?v=GNPB3RtHN2M>

<https://www.youtube.com/watch?v=RneMNcPGTyA>

