



## **PRÁCTICA 1 DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS:**

### **INDICADOR DE CICLO EN UN MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

**Autores: A. Lecuona, P. Rodríguez, C. Vereda.**

#### **1. INTRODUCCIÓN**

Un indicador de ciclo es un conjunto de aparatos que permite registrar la evolución de la presión en el interior del cilindro con el ángulo de giro del cigüeñal a lo largo del ciclo completo de trabajo del motor, es decir que proporciona la información necesaria para construir el diagrama P- $\alpha$ . De este diagrama se obtiene también inmediatamente el diagrama P-V sin más que conocer la geometría elemental del motor.

Interpretando los dos diagramas mencionados se puede obtener mucha información acerca del funcionamiento del motor. Por ejemplo se puede analizar el proceso de renovación de la carga con vistas a juzgar el diseño de los sistemas de admisión y escape y el diagrama de la distribución, o bien se puede estudiar la evolución de la combustión comprobando por ejemplo si el adelanto a la inyección es apropiado.

Además de analizar directamente la lectura de presión cabe la posibilidad de realizar multitud de cálculos en base a ella y seguir obteniendo información. Es inmediato por ejemplo obtener el trabajo indicado y con él la potencia y el par indicados, imposibles de medir de otra manera (habitualmente se obtienen de los efectivos, medidos en el eje, utilizando correlaciones para las pérdidas mecánicas). Utilizando un modelo termodinámico sencillo es posible también deducir la forma en que se libera calor en el motor e incluso aproximar la ley de masa quemada, lo cual ayuda mucho a la hora de analizar la combustión.

Toda la información que se puede conseguir con el indicador de ciclo resulta de gran utilidad, tanto para estudiar el funcionamiento de una unidad de serie trabajando en condiciones nominales como para experimentar modificaciones en los parámetros de operación y diseño o



nuevos sistemas. Es, no obstante, un sistema complejo cuyo correcto manejo y aprovechamiento requiere personal cualificado por lo que su uso suele restringirse a los centros de investigación.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

El banco de ensayos que contiene el indicador de ciclo se compone de los siguientes sistemas:

- El conjunto mecánico formado por un motor, una transmisión y un freno electromagnético.
- Los sistemas de control del motor y el freno, compuestos por los correspondientes mandos, reguladores y actuadores.
- Los sistemas de instrumentación, que actualmente se componen del indicador de ciclo y los sensores de velocidad y par del freno electromagnético.

El freno de este banco es capaz de absorber un máximo de 25kW, por lo que el motor que se ha montado en él es un pequeño motor Diesel monocilíndrico de inyección directa y 377 cm<sup>3</sup> de cilindrada. La ecuación que rige el giro del accionamiento mecánico es la siguiente:

$$I \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{motor} - M_{freno}$$

donde  $I$  es el momento de inercia del conjunto,  $\omega$  la velocidad angular,  $M_{motor}$  el par generado por el motor y  $M_{freno}$  el par resistente que provoca el freno. Siempre que  $M_{motor} = M_{freno}$  el sistema alcanza un régimen permanente caracterizado por una determinada velocidad  $\omega$  y un determinado grado de carga, esto es correspondiente a un cierto punto de funcionamiento del motor.

Los sistemas de control son los que nos permiten regular el conjunto para que el motor trabaje en el punto de funcionamiento que nos interesa. Actuando sobre el mando de carga del motor, que actúa sobre la posición de la cremallera de inyección, controlamos el par que este proporciona ( $M_{motor}$ ) y actuando sobre el mando del freno, que actúa sobre su excitación, regulamos el par resistente que este opone ( $M_{freno}$ ).

Respecto a los sistemas de instrumentación y excluyendo el indicador que se comentará después, actualmente se reducen a los dispositivos de medida de par y velocidad de giro. Los correspondientes captadores vienen montados con el freno.



Las medidas que proporcionan a través de los correspondientes displays digitales se emplean para tener una referencia del punto de trabajo en el que nos hemos situado actuando sobre los mandos del motor y el freno y además complementan a la información que proporcionará el indicador a la hora de interpretar y procesar los resultados.

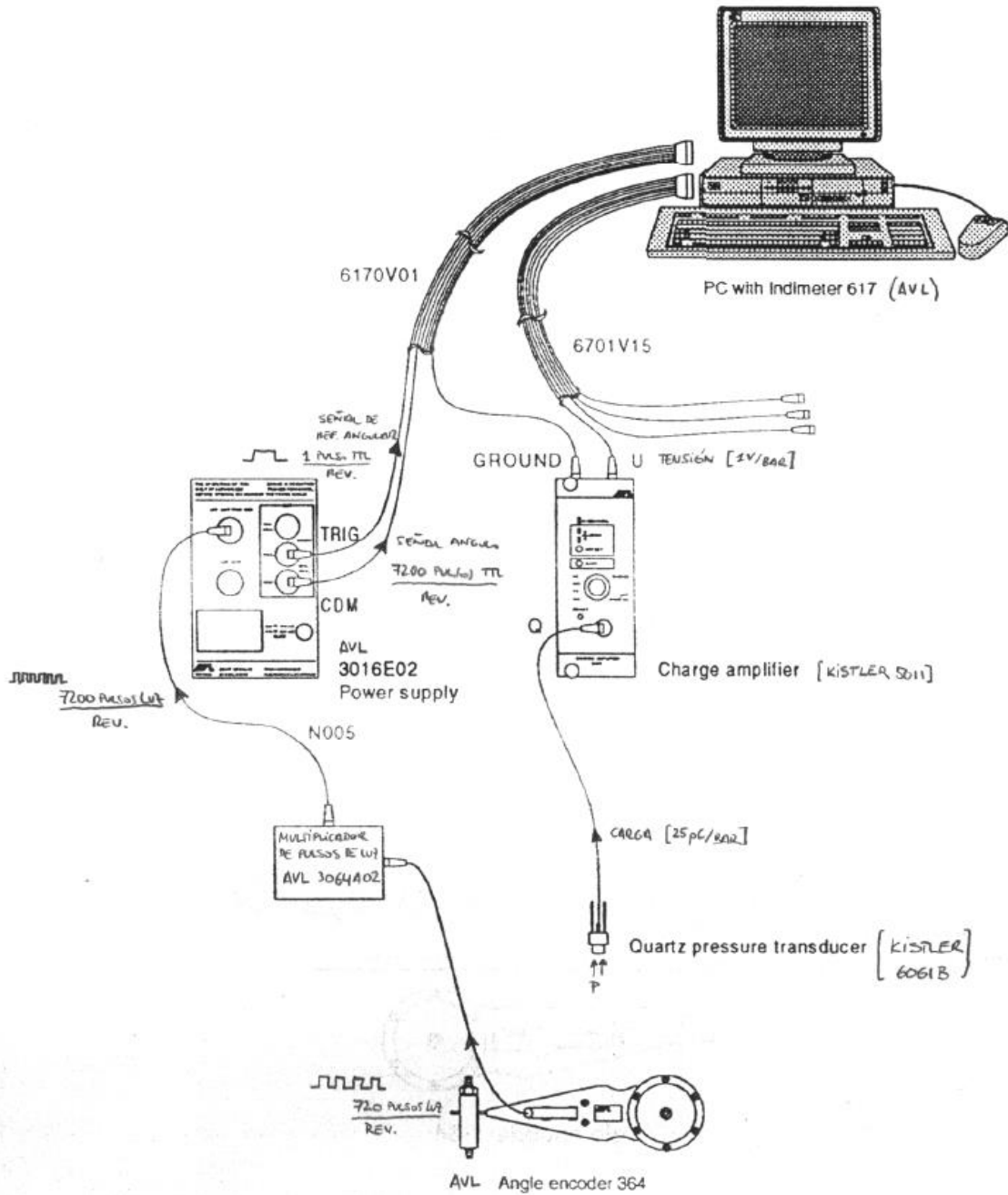
### 3. SISTEMA INDICADOR DE CICLO

El indicador de ciclo debe tomar medidas precisas y muy rápidas de la presión en el interior del cilindro y de la posición angular del motor y registrarlas para su posterior utilización. Para ello se precisan los siguientes elementos:

- Un captador de presión con respuesta lineal en un rango de presiones lo suficientemente amplio como para cubrir todos los valores que se pueden dar en el ciclo de un motor alternativo de combustión interna y preparado para soportar las extremas condiciones de trabajo que se tienen en el interior de un cilindro. Este captador tiene que estar debidamente alojado en la culata contando con un correcto sistema de refrigeración.
- Un sensor de posición angular adaptado para trabajar en condiciones adversas y capaz de proporcionar la resolución requerida. Normalmente se emplea un codificador angular montado especialmente para tomar este tipo de medidas.
- Los pertinentes sistemas de acondicionamiento de señal para los captadores (transductores, amplificadores, filtros, procesadores de señales digitales, etc.).
- Un sistema informático de adquisición y almacenado de datos y un software adecuado para controlar la toma de medidas y realizar un primer procesado de los datos.

En el banco del laboratorio se utiliza un sistema indicador de ciclo preparado por el fabricante austríaco AVL que concreta los elementos anteriores como se explica a continuación (Figura 1).





**Fig. 1:** Esquema del sistema indicador de ciclo

El captador de presión es un cristal piezoeléctrico KISTLER 6061B con apantallamiento térmico y refrigeración directa diseñado especialmente para este tipo de medidas. Los cristales piezoeléctricos tienen la propiedad de generar una carga eléctrica proporcional a la fuerza que se aplica sobre ellos, en este caso se tienen 25 picoculombios por bar con un tope de 250 bares.

Las especiales características de este sensor permiten montarlo directamente en la pared de la culata (a 45°) provocando con ello una escasa variación en la relación de compresión del motor y reduciéndose los errores derivados de la utilización de conductos intermedios de protección. La refrigeración requerida es de unos 2 litros de agua por minuto que se consiguen a través de una bomba y un depósito intermedio presurizado que se encarga de amortiguar las pulsaciones que la bomba pueda inducir en el elemento sensible falseando las medidas.

Una peculiaridad de los sensores piezoeléctricos es que no tienen una referencia fija de presión, con lo cual sus medidas solo son válidas como diferencias de presión dentro de cada experimento. Para tener valores absolutos es necesario conocer por otros medios la presión absoluta en un punto del ciclo y a partir de ahí sumar variaciones. Esto deberá ser tenido en cuenta en el procesado de los datos que se recogerán en la práctica.

La señal procedente del captador de presión se acondiciona en un amplificador de carga también de la firma KISTLER (modelo 5011) que traduce los picoculombios a una tensión entre -10 y 10 voltios. Se trata de un dispositivo sofisticado con amplias opciones de configuración que permiten adaptarlo para que trabaje de forma óptima con el sensor y el sistema de adquisición de datos empleados. Además ofrece la posibilidad de pasar la señal por un filtro pasabajo para eliminar ruidos. De cara a la comprensión de la práctica lo único que nos interesa es que está ajustado para recibir la entrada de un captador que dé 25 pC/bar proporcionando 1 voltio por cada 250 picoculombios, es decir una salida con escala de 0.1 V/bar que da un rango de 200 bares con los 20 voltios que hay entre -10 y +10 V. No se filtrará la señal en el amplificador.

En cuanto a la medida de ángulo (y velocidad aunque no se utilizará) se utiliza un conjunto de codificador angular AVL 364 y fuente AVL 3016E02. El principio de funcionamiento es el siguiente: la fuente genera luz infrarroja y la envía a través de uno de los hilos de un par de fibra óptica a proyectarse sobre la superficie de un disco solidario al eje del motor que tiene 720 marcas reflectantes en su perímetro. Cuando una marca pasa por enfrente de la fibra la luz se refleja y es recogida por el otro hilo del par retornando a la fuente, con lo cual en cada vuelta del motor se recoge un tren de 720 pulsos de luz que permite medir el ángulo. El sistema dispone además de otro par de fibra óptica que se enfrenta al disco a una distancia del centro en la que sólo hay una marca recogiendo así un pulso por vuelta que se usa para tener una referencia angular. Además de generar la luz y recoger los pulsos, la fuente se encarga de traducirlos a ondas cuadradas TTL de 720 pulsos por revolución para la medida de ángulo y 1 pulso por revolución para la referencia angular.



La resolución del codificador y su fuente es como puede verse de 0.5 grados y se mantiene hasta 15.000 r.p.m., pero puede aún mejorarse utilizando un convertidor de pulsos de luz. En el banco se utiliza uno de estos aparatos, el modelo AVL 3064A02, que permite resoluciones de hasta 0.05 grados. Para la práctica se le utilizará en la posición en la que da 0.1 grados por pulso, con lo cual se realizarán 7.200 medidas de ángulo (y otras tantas de presión) por ciclo.

El sistema de adquisición que se utiliza consiste en una tarjeta de adquisición AVL Indimeter 617 instalada en un PC 486 con el correspondiente software corriendo bajo el sistema operativo MS-DOS. La tarjeta dispone de entradas digitales y analógicas (8 canales) con las que puede recibir la señal de ángulo acondicionada (pulsos TTL) y la señal analógica procedente del amplificador de carga que da la presión.

La configuración necesaria para medir se realiza por software y se resume en los siguientes puntos:

- Indicación de la señal de presión que va a recibir (canal y calibración (V/bar)).
- Programación de la medida en base a la señal del codificador angular (tipo de captador, resolución (grados/pulso), número de ciclos a registrar, etc.).
- Datos del motor (básicamente los necesarios para dibujar el diagrama P-V y para calcular la ley de masa quemada si se pide) y ajuste del PMS (la referencia angular del codificador no tiene por qué coincidir con él y por tanto es preciso decirle dónde está).

Una vez configurado el software se pueden realizar medidas de forma automática y se ofrece la posibilidad de ver los resultados en distintos gráficos (P- $\alpha$ , P-V, logP-logV, etc.) así como de calcular la liberación de calor. Cualquiera de los gráficos se puede muestrear y guardar en un archivo ASCII para ser tratado en otros programas.

#### 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la sesión de prácticas se comenzará describiendo detenidamente el equipo de medida y el software de control. Posteriormente se arrancará el motor y se esperará a que alcance una temperatura de funcionamiento adecuada mientras se muestra cómo se controla el punto de funcionamiento del motor actuando sobre su control de carga y la excitación del freno.

Una vez se tenga el motor preparado se procederá a tomar medidas de presión a lo largo del ciclo. Se visualizarán los resultados obtenidos y se grabará el diagrama P- $\alpha$  en un archivo.



Además del archivo de datos se proporcionará una hoja de Mathcad®, que procesa los datos recogidos en la sesión y proporciona gran cantidad de información acerca del funcionamiento del motor. El cálculo más destacado que realiza es la determinación de la ley de masa quemada, tomando como dato de entrada la presión.

La forma en que se debe utilizar la hoja y los resultados a presentar se detallan a continuación:

1. Importar en la hoja de Mathcad los datos de presión y ángulo del archivo generado por el software del indicador siguiendo para ello las instrucciones que se dan en el punto 1.3 de dicha hoja.
2. Comentar lo que se considere destacable de la evolución de la presión a lo largo del ciclo (incluir las gráficas que sea preciso para apoyar los comentarios).
3. Ajustar en la hoja de Mathcad los valores de los parámetros de operación con los recogidos en la sesión de prácticas: velocidad de giro ( $n$ ) en r.p.m. y par efectivo ( $C_{em}$ ). Con los datos tomados durante la práctica de gasto de combustible y caudal de aire, calcular el dosado  $F$  con el que está actuando el motor.
4. Comentar la forma en que se quema la carga del motor indicando si se distinguen las etapas de retardo, combustión de premezcla y combustión controlada por el mezclado. Incluir las gráficas que se considere preciso y no olvidar consignar el valor de  $FR$  utilizado en el ensayo.
5. Indicar y decir si son razonables los rendimientos obtenidos. Explicar cómo se obtiene el rendimiento mecánico.

