



Escuela Universitaria de  
Ingeniería  
Técnica Industrial  
**Universidad Zaragoza**



PROYECTO DE FIN DE CARRERA

# Análisis de Vibraciones y Ultrasonidos en MACI<sup>1</sup>

Autor:

**Javier Viñuales Navarro**

Director:

**Mariano Muñoz Rodríguez**

Especialidad:

**Mecánica**

Convocatoria:

**Diciembre 2011**

---

<sup>1</sup> Motores Alternativos de Combustión Interna



## Resumen:

El presente proyecto tiene como objetivo fundamental establecer un método de diagnóstico precoz de fallos en motores alternativos de combustión interna mediante el análisis de vibraciones y ultrasonidos mientras se encuentra en funcionamiento. Esto será una herramienta que formará parte del mantenimiento predictivo de un motor, efectuando un diagnóstico precoz de fallos

El procedimiento experimental que se ha seguido consiste en:

- Mediciones de vibraciones y ultrasonidos sobre el motor estudiado en correcto funcionamiento sobre un banco de ensayo.
- Mediciones de vibraciones y ultrasonidos sobre el motor tras haberle provocado unos fallos determinados.
- Comparación de ambas señales, con el fin de obtener un patrón de señal que identifique la presencia de cada fallo en concreto en el motor.

Los fallos que se han provocado controladamente al motor en el banco de ensayo son los siguientes:

- Variación de la holgura de taqués
- Variación del encendido
- Segmento quitado
- Holgura en el casquillo de la biela



## Memoria

1. Objetivo y alcance .....	2
2. Justificación .....	3
3. Vibraciones y ultrasonidos en MACI .....	3
4. Cadena de medida.....	7
5. Fallos inducidos al motor .....	9
6. Resultados del análisis e indicadores .....	9
6.1 Variación de la holgura de taqués.....	10
6.2 Variación del encendido.....	12
6.3 Segmento quitado .....	13
6.4 Holgura en el casquillo de la biela.....	14
7. Conclusiones.....	14
8. Bibliografía .....	15

## 1. Objetivo y alcance

El principal objetivo del presente proyecto es desarrollar y probar un método para detectar fallos en un MACI mientras se encuentra en funcionamiento. Esto será una herramienta que formará parte del mantenimiento predictivo de un motor, efectuando un diagnóstico precoz de fallos. Las técnicas para implementar dicho método serán las siguientes:

- Análisis de Vibraciones en el motor (frecuencias menores a 15 kHz)
- Análisis de Ultrasonidos en el motor (frecuencias mayores a 15 kHz)

El proceso de investigación que se ha seguido consiste en un método experimental sobre un motor en un banco de ensayo. El procedimiento es el siguiente:

- Mediciones de vibraciones y ultrasonidos sobre el motor en correcto funcionamiento.
- Mediciones de vibraciones y ultrasonidos sobre el motor tras haberle provocado unos fallos determinados.
- Análisis de las señales, con el fin de obtener un patrón de señal que identifique la presencia de cada fallo en concreto en el motor.

El presente proyecto solo se ocupa del análisis de las señales pues las mediciones fueron realizadas anteriormente. Este trabajo de análisis ha constado de las siguientes fases:

- Clasificación de las medidas:

En un principio hubo que organizar y ordenar los ficheros resultantes de las mediciones en el motor. Originalmente estos ficheros estaban ordenados en bruto y por fecha de captura, lo que dificultaba su acceso y consulta. El trabajo de clasificación, al contrario de lo que pueda parecer, fue largo y laborioso. Una vez clasificados se buscó y seleccionó los ficheros que posteriormente fueron analizados. Estos ficheros se seleccionaron en base al criterio de comparar condiciones de trabajo equivalentes. Es decir, que el motor estuviera en las mismas condiciones de carga y régimen de giro. Así como en las mismas condiciones de medición (mismos sensores en las mismas posiciones).

- Tratamiento de la señal:

Una vez organizados y seleccionados los ficheros que iban a ser analizados, hubo que prepararlos para su posterior visualización. A las señales medidas hubo que aplicarles un tratamiento a través del programa "Visualización y Análisis de Señales en MACI". A las señales se les aplicó un tratamiento frecuencial específico para cada señal que se especifica en el anexo 4.

- Visualización de la señal:

Una vez tratada la señal ya está lista para su visualización mediante el programa "Visualización y Análisis de Señales en MACI". Las graficas analizadas consisten en:

- Presión del cilindro vs posición angular del cigüeñal.
- Vibración vs posición angular del cigüeñal.
- Ultrasonido vs posición angular del cigüeñal.

Las gráficas de las señales que se analizan visualmente son un promediado de todos los ciclos. El promedio elegido para el análisis de la señal fue el valor eficaz, por estar relacionado más directamente con la energía de la vibración en cada instante. El objetivo de esta fase consiste en la comparación de las señales del motor funcionando correctamente y funcionando con un fallo provocado, para detectar, por inspección directa de la señal en el dominio temporal, patrones de dicho fallo.

- Búsqueda de indicadores

Tras haber sacado unas conclusiones de la comparación de las señales del motor, se procedió a buscar ciertos indicadores que sirvieran para demostrar numéricamente aquellos patrones que se habían observado visualmente.

Por último, hacer saber que este proyecto surge de una línea de investigación ya creada por el Laboratorio de Motores de la Universidad de Zaragoza, que debe ser continuada estableciendo un método sólido de análisis de vibraciones y ultrasonidos en MACI.

## 2. Justificación

Una vez presentado los objetivos y el alcance del proyecto es necesario justificar la importancia del análisis de vibraciones y ultrasonidos como herramienta para el mantenimiento predictivo de motores alternativos de combustión interna. En la actualidad el análisis de vibraciones supone la principal herramienta de análisis predictivo en máquinas rotativas, lo que cubre gran parte de la industria. Estas técnicas de análisis de vibraciones se basan en el estudio de la señal de vibración en el dominio frecuencial, ya que en nivel de vibración de las máquinas rotativas en buen estado es muy bajo, lo que hace que un aumento de la amplitud en una frecuencia concreta pueda ser detectado fácilmente. Sin embargo un MACI presenta niveles altos de vibración aun funcionando en buen estado, lo que hace que resulte complejo este tipo de análisis y es por esto que el análisis de vibraciones clásico ha tenido relativamente poca utilización en el campo de los MACI.

Sin embargo muchos problemas de los MACI pueden ser detectados por un análisis de vibraciones en el dominio temporal, como por ejemplo problemas con el ajuste de apertura/cierre de válvulas, problemas de encendido o rayado del cilindro [1]. El coste inicial es similar al de un equipo de análisis de vibraciones en máquinas rotativas, aunque superior al incorporar también un sensor de ultrasonidos, con su respectivo acondicionador de la señal. El ahorro de costes potencial, al igual que en el análisis de máquinas rotativas, es elevado, evitando paradas no previstas y pudiendo planificar el mantenimiento.

## 3. Vibraciones y ultrasonidos en MACI

Para empezar conviene dar una breve definición de lo que son vibraciones y ultrasonidos

- Vibración: Se trata un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud de las partículas de elemento en torno a una posición de equilibrio que se toma como referencia. El transductor que va a transformar la vibración en una señal eléctrica que se pueda medir y analizar es el acelerómetro.

- Ultrasonido: El ultrasonido es una onda acústica cuya frecuencia se considera, en el ámbito del análisis de ultrasonidos, por encima de unos 12 kHz. Dicha onda es elástica y es generada por la rápida liberación de energía en la fuente causante de la emisión acústica.

Hay muchas fuentes de vibraciones y ruido ultrasónico en los MACI. Las fuerzas de inercia alternativas causan vibraciones, los componentes en rotación también causan vibraciones. Además de, por ejemplo, los impactos mecánicos y los flujos de gas. Todas estas señales pueden ser medidas y analizadas.

Las principales fuentes de vibraciones y ruido ultrasónico en un MACI son:

- Impactos mecánicos tales como:
  - Apertura cierre de válvulas

El sistema mecánico de distribución abriendo y cerrando las válvulas causa impactos. El más importante es el impacto que se produce cuando la válvula cierra y golpea en su asiento. Aunque también existen impactos en la apertura de la válvula, estos son de mucha menor amplitud. En la figura 3.1 se muestra una señal de ultrasonidos del impacto de la válvula de admisión cerrando en el motor analizado.

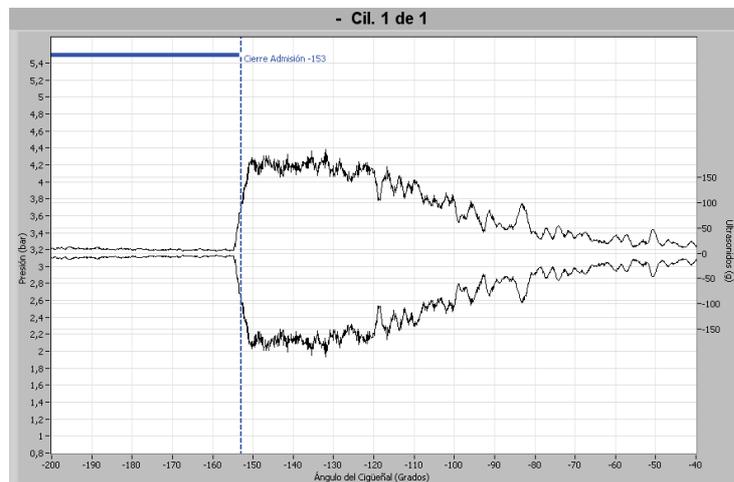


Figura 3.1: Cierre válvula admisión, ultrasonidos. 2400 rpm 80% carga.

- Impactos debidos a holguras

Las holguras son necesarias en un motor para su correcto funcionamiento con un buen rendimiento. Sin embargo son causa de impactos mecánicos, por ejemplo el que se produce entre el casquillo de la biela y el bulón del pistón. Otro impacto importante debido a holguras es el piston slap que se produce entre el cilindro y el pistón.

- Flujos de gas, tales como:
  - Salida de los gases de escape

Cuando la válvula de escape abre, la diferencia de presión entre el cilindro y el conducto de escape hace que se produzca la salida espontánea de los gases de escape. Dicho flujo de gases crea un efecto de silbido de alta frecuencia que es detectado por el sensor de ultrasonidos. En la figura 3.2 se muestra una señal de ultrasonidos de la apertura de la válvula de escape en el motor analizado.

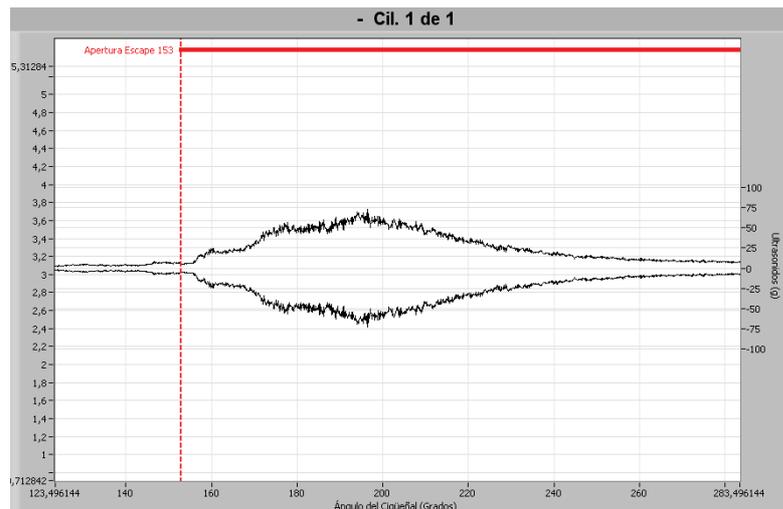


Figura 3.2: Apertura válvula escape, ultrasonidos. 2400 rpm 80% carga.

- Fugas

Las fugas producen un fenómeno similar al de los gases de escape y se pueden producir a través de los anillos del pistón o a través de las válvulas.

- Rugosidad mecánica

El deslizamiento entre dos elementos siempre es causa de vibración debido a la rugosidad mecánica. Un ejemplo es el deslizamiento entre el pistón y el cilindro.

- Combustión

Durante la combustión se produce la expansión de la mezcla lo que produce fuerzas sobre los elementos que la contienen induciendo vibraciones y emisiones acústicas que son reconocibles en un análisis.

Los eventos del motor que producen señales de vibración o ultrasonidos ocurren típicamente una vez por ciclo mecánico. Son caracterizados por ciertas formas o patrones [1] que se pueden ver en la figura 3.3. En ella se ve un ciclo completo de un motor de cuatro tiempos (como el motor analizado), en el que están señalados los puntos muertos. Dichos patrones ayudan en la identificación de los distintos eventos que se producen en un MACI.

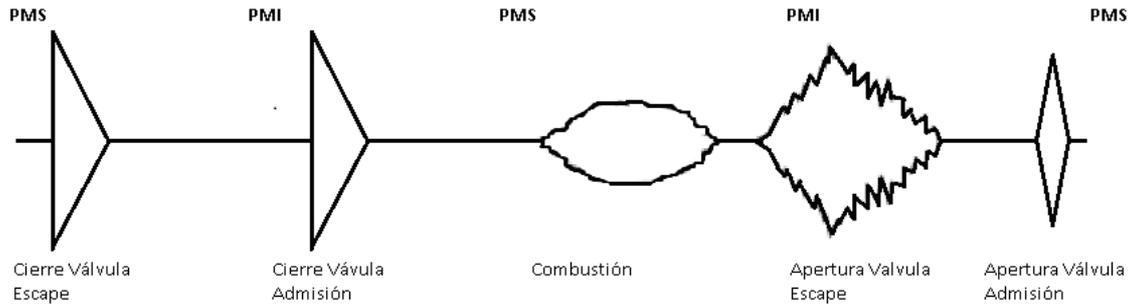


Figura 3.3: Patrones típicos de vibración en MACI.

En la figura 3.4 se muestra una de las graficas de las señales del motor estudiado analizadas. En ella se muestran las señales de ultrasonidos, vibraciones y presión en función del ángulo del cigüeñal.

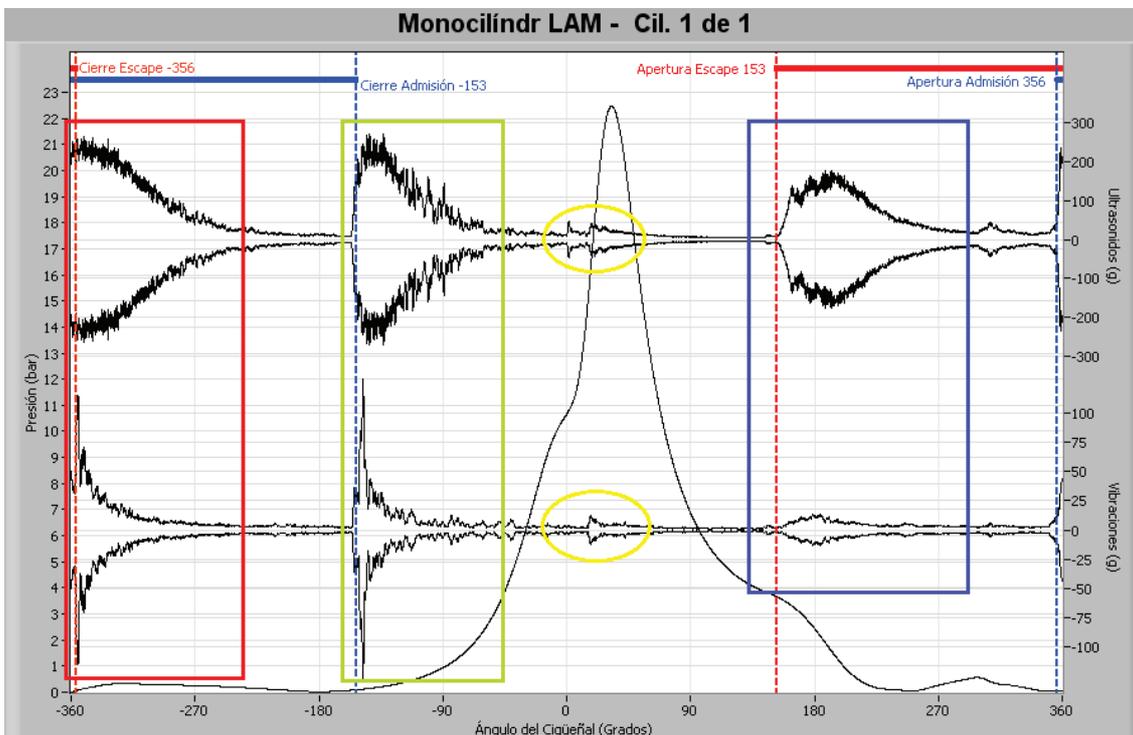


Figura 3.4: Gráfica de vibraciones y ultrasonidos del motor estudiado. 2400 rpm, carga 100%.

Gracias a los patrones de la figura 3.3 se puede reconocer en la figura 3.4: el cierre de la válvula de escape (señalado con un rectángulo rojo), el cierre de la válvula de admisión (señalado con un rectángulo verde), las fuerzas de combustión (recalcadas con elipses amarillas) y la apertura de la válvula de escape (señalada con un rectángulo azul).

Simultáneamente a las fuerzas de combustión ocurren otros fenómenos como piston slap o impacto debido a la holgura en el casquillo de la biela que por esto son más difíciles de identificar.

#### 4. Cadena de medida

La cadena de medida utilizada durante las pruebas en el banco de ensayo consta de de los siguientes elementos:

- Transductores
- Acondicionadores de la señal
- Tarjeta electrónica de adquisición de datos
- Encoder óptico
- Software de adquisición de datos

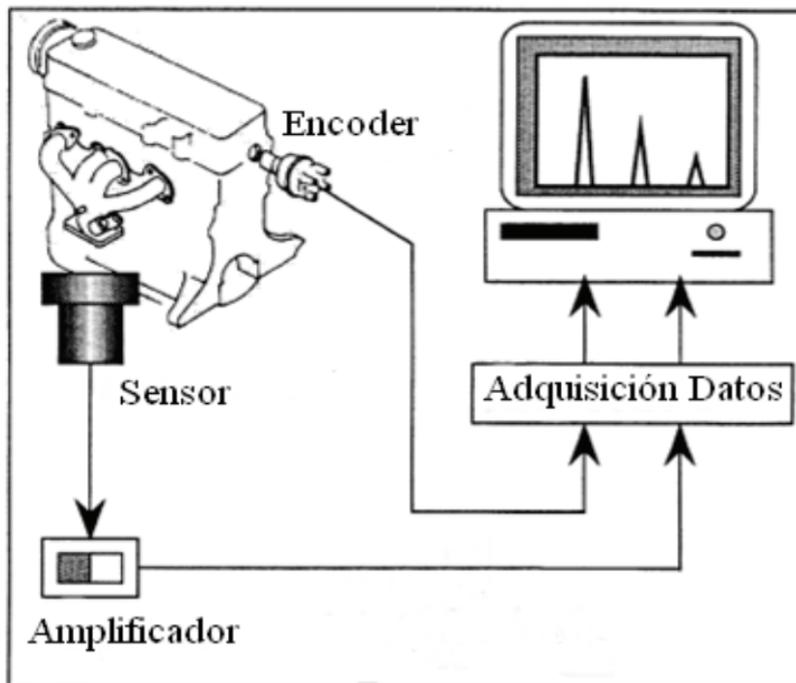


Figura 4.1: Esquema de la cadena de medida

- **Transductores**

Convierten las magnitudes físicas que se desean medir en una señal eléctrica. Los transductores usados son acelerómetros para medir vibraciones y sensor de emisión acústica para medir ultrasonidos.

Los sensores de vibración y ultrasonidos fueron colocados en distintas localizaciones del motor en función del tipo de fallo que se provoque. Se debe colocar el sensor lo más próximo posible a la fuente de emisión de la señal de vibraciones ó de emisión acústica [2]. Las distintas localizaciones se detallan en el anexo 4.

El método de sujeción de los sensores al mediante vástago roscado debido a que es la forma que mayor rango frecuencial permite medir, frente a otros métodos como adhesivo o imán. Para esto hubo que mecanizar el motor y fabricar unas bases para los sensores.

- **Acondicionadores de la señal**

Normalmente las señales generadas por los transductores no tienen el nivel suficiente para poder ser usadas en los equipos de medición, análisis y visualización de la señal. Por eso hay que poner un sistema de adaptación (preamplificadores o acondicionadores de la señal). Estos equipos encargan de generar una señal apta para ser introducida en el sistema de medida.

- **Tarjeta de adquisición de datos**

La señal analógica que envía el acelerómetro (previamente amplificada), debe ser transformada en una señal discretizada. Lo que se obtiene es una señal digital que puede ser almacenada y tratada en un computador. De esto se encarga la tarjeta de adquisición de datos. En la figura 4.2 se tiene una señal analógica (arriba), discretizada (en medio) y posteriormente reconstruida digitalmente (abajo).

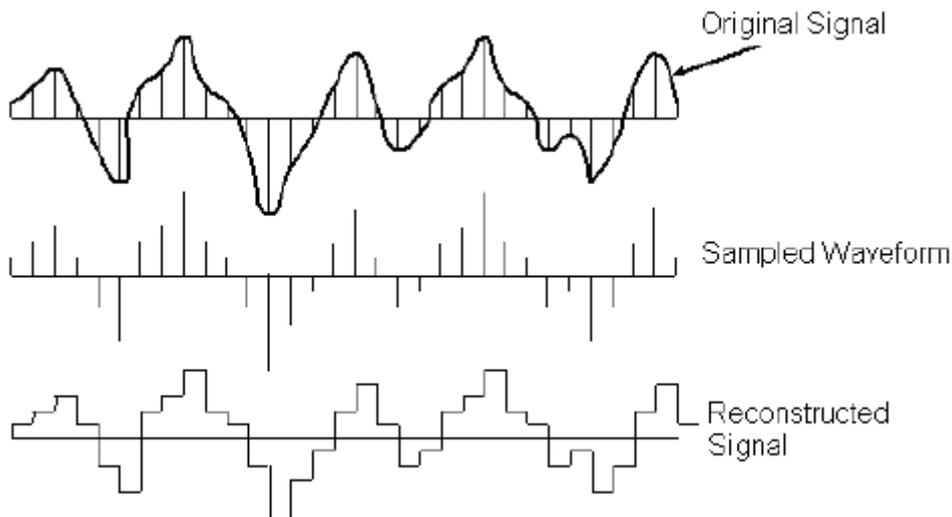


Figura 4.2: Conversión de una señal analógica en una señal digital

La frecuencia de muestreo en la toma de medidas fue de 125 KHz, por lo que debido al teorema de Nyquist se conoce que la frecuencia máxima que se podrá captar será de 62,5 KHz. [12]

- **Encoder óptico**

Se encuentra en el motor y da una señal que sirve como referencia de la posición del cigüeñal, así posemos conocer en que ángulo se encuentra en cada instante. El encoder está programado para que de un pulso cada vez que el pistón pase por el PMS. Posteriormente gracias a la señal del encoder se podrán separa las señales de vibraciones y ultrasonidos por ciclos.

## 5. Fallos inducidos al motor

Las ventajas de utilizar este método experimental son la desaparición de los errores de usar un modelo físico, además de la posibilidad de repetir las pruebas y ensayos tantas veces como sea necesario hasta poder validar la consistencia de los resultados. Por otra parte, al trabajar en un banco de ensayo se tiene un fácil acceso al motor para poder practicarle fallos y controlar sus parámetros. Por último, un banco de ensayo da seguridad en caso de que uno de los fallos provocara una avería catastrófica. [2]

Se pueden provocar muchos tipos de fallos, pero los que se van a efectuar serán fallos que no causen daños al motor. A continuación se muestran los distintos fallos inducidos al motor con una breve explicación del fallo y los resultados de análisis de la señal.

- **Variación de la holgura de taqués**

Los taqués son unos empujadores que transmiten el movimiento vertical a las válvulas y elimina el horizontal. El taqué del motor es mecánico, esto quiere decir que necesita un juego u holgura que permita la dilatación térmica de los elementos de distribución cuando el motor esté en funcionamiento.

- **Variación del encendido**

El motor lleva un encendido electrónico, con el que podremos controlar exactamente los grados que adelantamos o retrasamos el encendido. Esto tendrá consecuencias directas en el proceso de combustión. El encendido normal en el motor de estudio se encuentra 12° antes del PMS.

- **Segundo segmento quitado**

Se ha eliminado uno de los segmentos para observar el fenómeno de “blow-by” (fugas de la cámara de combustión a través de los segmentos). Al eliminar uno de los segmentos que impiden el paso de los gases de combustión hacia el cárter se producirán fugas que se espera que sean detectadas por el análisis de vibraciones y ultrasonidos.

- **Holgura excesiva del casquillo de la biela**

El pistón transmite los esfuerzos y el movimiento a la biela a través de un bulón. Dicho bulón no está directamente conectado a la biela sino que entre ambos existen un casquillo que facilita el giro del pie de la biela con respecto al pistón (ver anexo 1).

## 6. Resultados del análisis e indicadores

En este apartado se van a exponer los resultados del análisis de la señal y los distintos indicadores que se han ido utilizando. En el anexo 5 se encuentran explicados en profundidad los distintos indicadores y en el anexo 6 los resultados completos del análisis.

## 6.1 Variación de la holgura de taqués

- En caso de holgura insuficiente de taqués, el cierre de las válvulas ocurre mas tarde y la fuerza del impacto de la válvula en su asiento disminuye. En la figura 6.1.1 se representa el cierre de la admisión en la grafica de ultrasonidos para un caso del motor funcionando correctamente con la holgura de diseño de 0,15 mm (izquierda) y para una holgura de 0 mm (derecha).

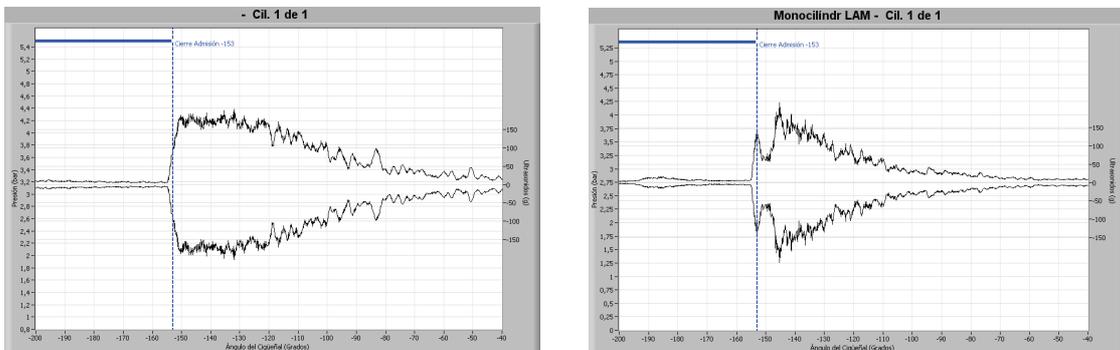


Figura 6.1.1: Cierre de la admisión, ultrasonidos. Holgura de taqués 0,15 mm y 0 mm. 2400 rpm, carga 80%.

En el caso de holgura excesiva de taqués, el cierre de las válvulas ocurre antes y la fuerza del impacto de la válvula en su asiento aumenta. En la figura 6.1.2 se representa el cierre de la admisión en la grafica de ultrasonidos para un caso del motor funcionando correctamente con la holgura de diseño de 0,15 mm (izquierda) y para una holgura de 0,5 mm (derecha).

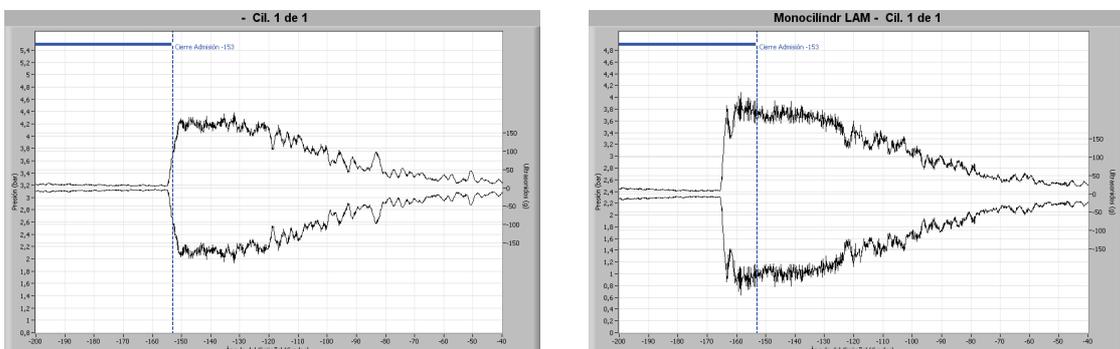


Figura 6.1.2: Cierre de la admisión, ultrasonidos. Holgura de taqués 0,15 mm y 0,5 mm. 2400 rpm, carga 80%.

Tal y como se define en el anexo 5, se utilizó el ángulo del cierre de la admisión como indicador de la variabilidad en el momento del cierre de las válvulas. En la figura 6.1.3 se muestra dicho ángulo en función de la holgura de taqués. Se puede ver como se adelanta el cierre de la válvula al aumentar la holgura de taqué.

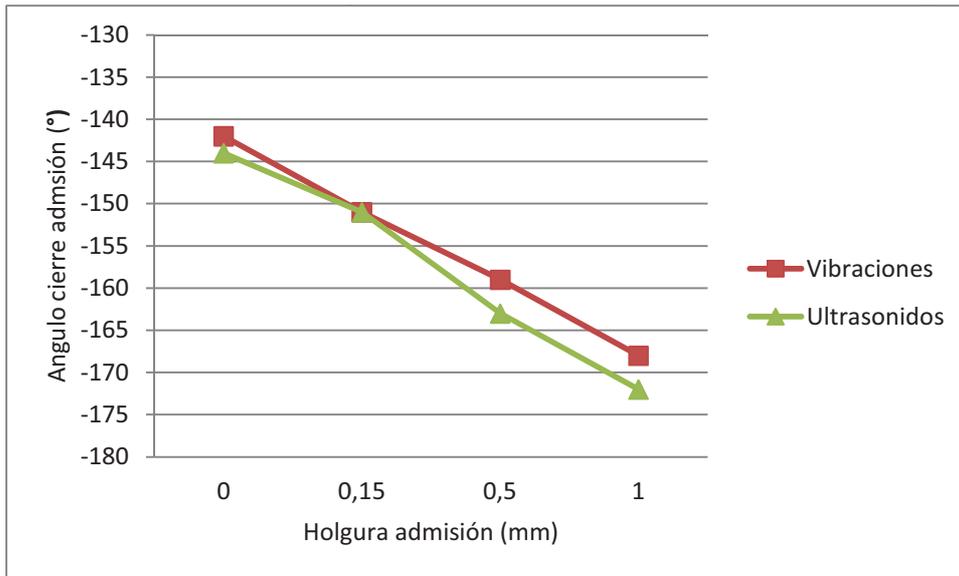


Figura 6.1.3: Angulo del cierre de la admisión. 2400 rpm, carga 80%.

Para medir la fuerza del impacto del cierre de válvulas se usó la amplitud máxima y la integral definida del cierre de la admisión tanto en vibraciones como en ultrasonidos. En la figura 6.1.4 se representa la integral definida en el cierre de la admisión para vibraciones en función de la holgura de taqués. Se deduce de la imagen que el impacto del cierre de la válvula es mayor al aumentar la holgura de taqués

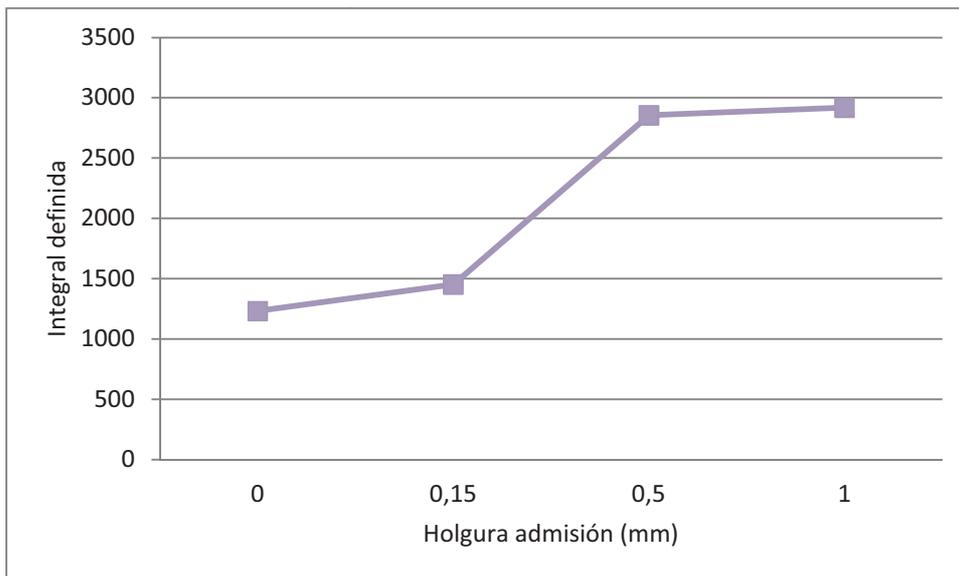


Figura 6.1.4: Integral definida de la vibración en el cierre de la admisión. 2400 rpm, carga 80%.

- En el caso de holgura insuficiente de taqués, la apertura de las válvulas se adelanta. Para el caso de holgura excesiva se esperaba que la apertura se retrasase (ver anexo 1) y sin embargo no se ha podido observar este fenómeno. Para evaluar esto se utilizó el ángulo de apertura de la válvula de escape como indicador. La figura 6.1.5 muestra la apertura de la válvula de escape para un caso del motor funcionando correctamente (izquierda) y con una holgura de -0,025 mm (derecha).

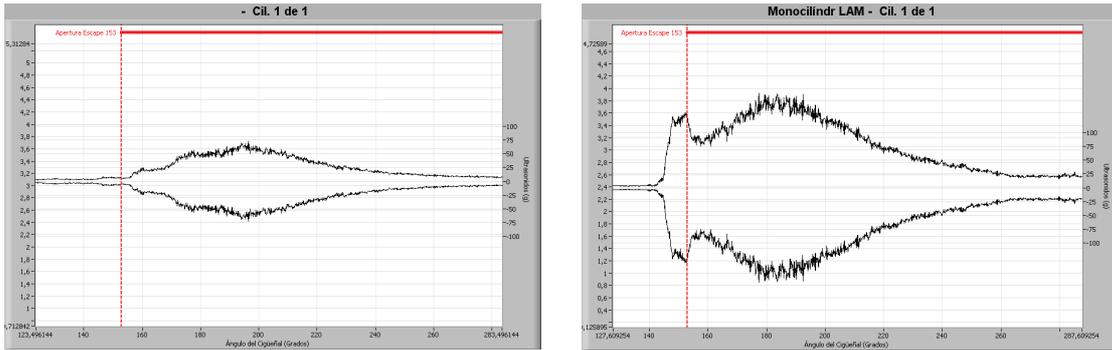


Figura 6.1.5: Apertura del escape, ultrasonidos. Holgura de taqués 0,15 mm y -0,025 mm. 2400 rpm, carga 80%.

- La amplitud de la nube de flujo de gas que se produce en la apertura de la válvula de escape aumenta al disminuir la holgura de taqués, especialmente cuando la holgura es negativa (lo que se conoce como válvula pisada). Mediante la integral definida para la apertura del escape en ultrasonidos se evaluó este fenómeno. En la figura 6.1.5 se puede observar este aumento.
- En la apertura de la válvula de escape se producen unas vibraciones que son consecuencia de impactos debidos a la holgura de taqués. Dichas vibraciones son mayores al aumentar la holgura de taqués. El indicador que se usó para medir estas vibraciones fue la integral definida para la apertura del escape en vibraciones. En la figura 6.1.6 se representa esta integral en función de la holgura de taqués.

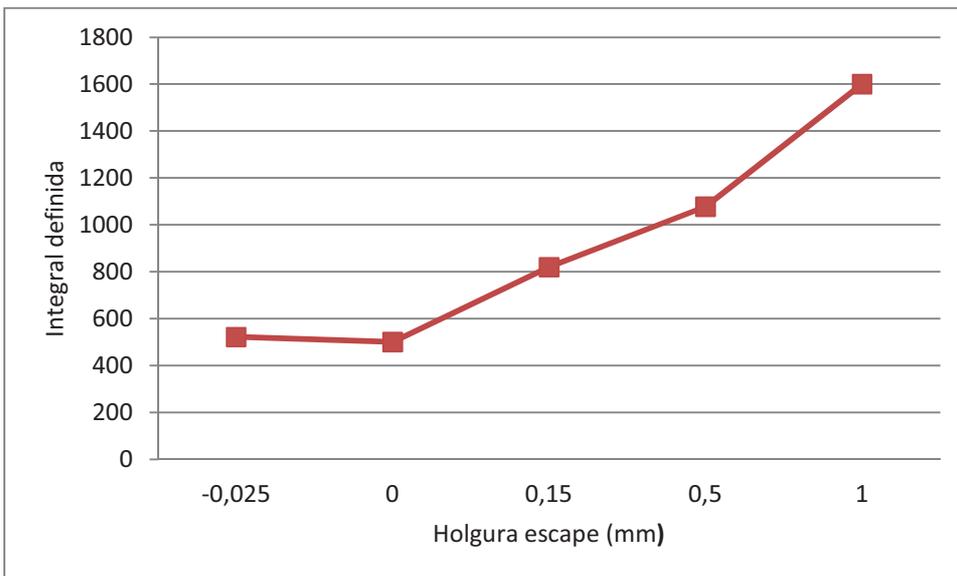


Figura 6.1.6: Integral definida de la vibración en la apertura del escape. 2400 rpm , carga 80%.

## 6.2 Variación del encendido

- Al avanzar el encendido las fuerzas de combustión aumentan y se alejan al PMS. En el caso de retrasar el encendido ocurre lo contrario. Para medir las fuerzas de combustión se ha usado como indicador la integral definida en la zona de combustión. En la figura 6.2.1 se representa dicha integral en función de la posición del encendido.

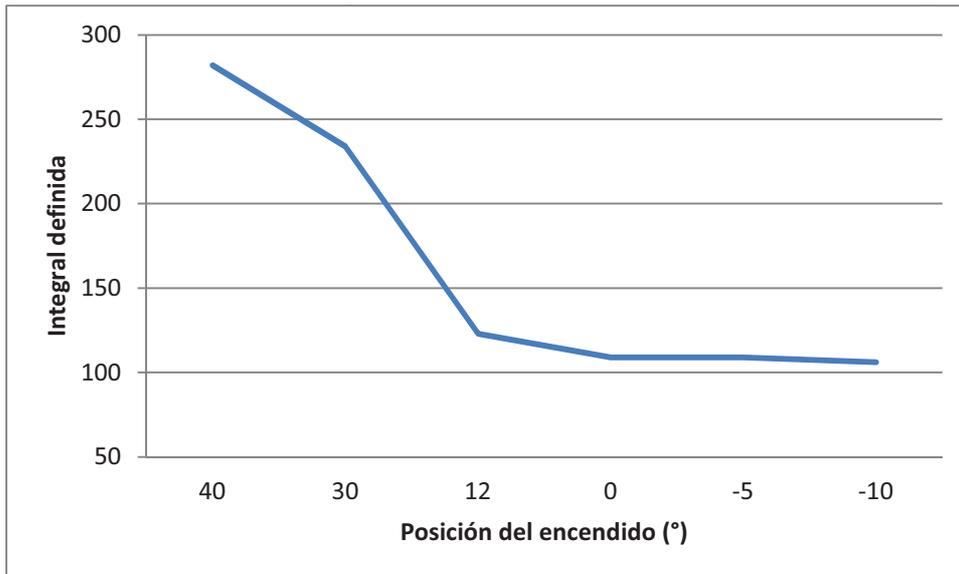


Figura 6.2.1: Integral definida en la zona de combustión. Vibraciones. 2400 rpm, carga 100%.

De la figura 6.2.1 se deduce que retrasar en encendido más allá del PMS (0°), no afecta prácticamente a las fuerzas de combustión.

- La variación del encendido también repercute en la presión. Al existir un avance mayor, se alcanza una presión máxima mayor y más cercana al PMS. La figura 6.2.3 se muestra la presión máxima y el ángulo a la que se produce en función del avance.

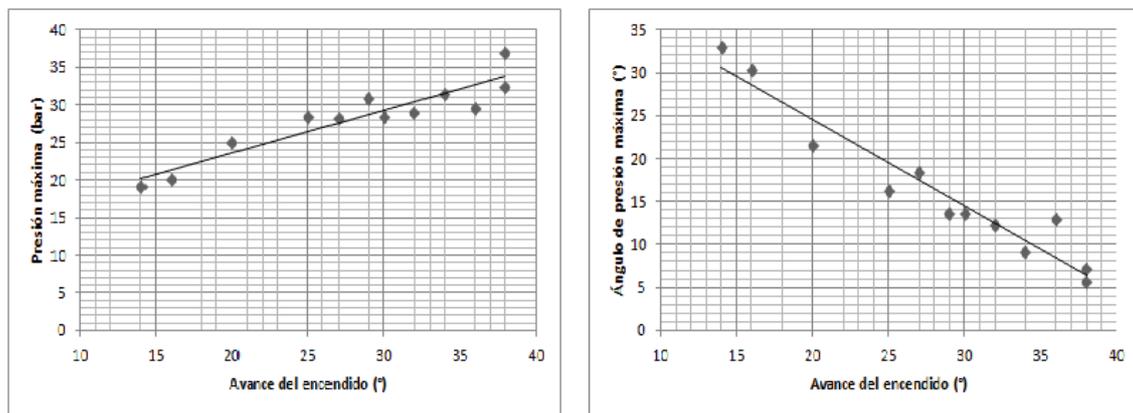


Figura 6.2.3: Presión máxima y ángulo a la que se produce en función del avance. 2400 rpm, carga 40-50%.

### 6.3 Segmento quitado

- Se observa un aumento del piston slap, detectable en la grafica de vibraciones. Esto se evaluó mediante la integral definida en la zona de combustión en vibraciones, que aumentaba su valor al retirar el segundo segmento.
- Se detectó un aumento de las fuerzas de combustión en ultrasonidos al mismo tiempo que estas tomaban la forma del patrón típico de flujo de gas. Esto se interpreta como indicios de que están produciéndose fugas a través de los anillos. El aumento de las fuerzas de combustión en ultrasonidos se evaluó mediante la integral definida en la zona de combustión en ultrasonidos. En la figura 6.3.1 se muestra las graficas de

ultrasonidos para un caso del motor funcionando correctamente (izquierda) y del motor con el segmento retirado (derecha).

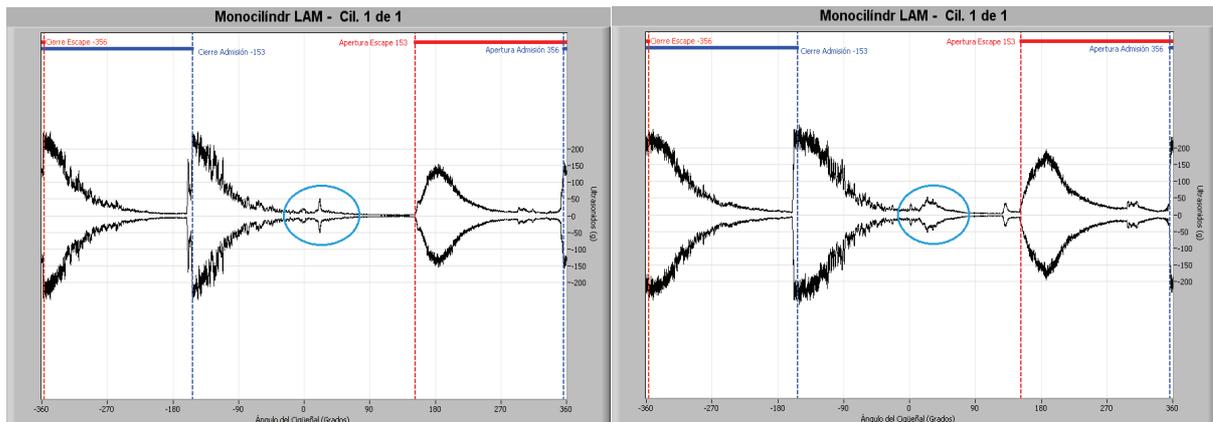


Figura 6.3.1: Motor funcionando correctamente (izq.) y con el segmento retirado (der.). Ultrasonidos. 2400 rpm, carga 40% y 60%.

#### 6.4 Holgura en el casquillo de la biela

No se han encontrado cambios significativos en las señales analizadas que evidencien este tipo de fallo.

### 7. Conclusiones

En primer lugar este proyecto permite valorar la importancia del análisis de vibraciones y ultrasonidos como herramienta para el mantenimiento predictivo de MACI. Con un mantenimiento predictivo bien realizado los elementos son reparados o sustituidos en el momento oportuno, aprovechando su vida útil al máximo pero antes de que falle y provoque una parada no planificada. Además el análisis de vibraciones y ultrasonidos en MACI permite detectar defectos incipientes sin necesidad de parar ni desmontar el motor.

A la vista de las conclusiones del análisis de la señal expuestas en el anexo 6, el método de análisis de vibraciones y ultrasonidos en MACI desarrollado en este proyecto da resultados positivos puesto que ha servido para identificar todos los fallos provocados al motor a excepción de la holgura en el casquillo de la biela.

Finalmente, a nivel personal del autor, cabe resaltar la ampliación de conocimientos y el interés despertado por, una parte, los motores alternativos de combustión alterna y también por el mantenimiento predictivo, especialmente el análisis de vibraciones. Si bien es cierto que el proyecto se centra en los MACI, el campo de aplicación del análisis de vibraciones y ultrasonidos abarca cualquier tipo de máquina. A un nivel más personal, la realización de este proyecto ha supuesto tener que aprender a buscar información de forma selectiva, a mejorar la capacidad de redacción y de organización y, tras un año realizando el presente proyecto, a hacer frente a un esfuerzo cuya recompensa no se obtiene a corto plazo.



## 8. Bibliografía

- [1] Manual técnico, Diesel Engine Analysis Guide, Electric Power Research Institute (NMAC), 1997.
- [2] Carmen Ripalda, Diagnostico de fallos en motores alternativos de combustión interna mediante análisis de vibraciones y ultrasonidos, Universidad de Zaragoza, sin publicación.
- [3] M. Muñoz, F. Payri, Motores de combustión interna alternativos Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales (Universidad Politécnica de Madrid), 1989.
- [4] Pedro V. Arnal Atares, Antonio Laguna Blanca, Tractores y motores agrícolas, Ediciones Mundi Prensa, 1996.
- [5] Luis Soldevilla, Apuntes de Cinemática y Dinámica de Maquinas, Universidad de Zaragoza, sin publicación.
- [6] Jean Louis Ligier y Elian Baron, Acyclisme et Vibrations, Editions TECHNIP, 2002
- [7] A-MAQ S.A. (ANÁLISIS DE MAQUINARIA). Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico. 2005.
- [8] Paul A. TIPLER y Gene MOSCA, Física para la ciencia y la tecnología, Editorial Reverté
- [9] Glenn White. Introduction to Machine Vibration. DLI Enginnering Corporation, 1997.
- [10] Evelio Palomino Marín, La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de maquinas rotatorias, Centro de estudios Innovación y Mantenimiento, 1997.
- [11] Antonio Ordóñez Guerrero, Introducción al mantenimiento predictivo, Universidad de Sevilla
- [12] Javier Abad, Apuntes de Vibraciones Mecánicas, Universidad de Zaragoza, sin publicación.
- [13] Margarita Piedra Diaz y Raul Armas Cardona, Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo.
- [14] Manés Fernández Cabanas y Manuel García Melero, Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas, Editorial Marcombo S.A., 2000.
- [15] Franco Irene, Mantenimiento Predictivo, Escuela De Mantenimiento Industrial de la Universidad Gran Mariscal De Ayacucho, 2004.
- [16] Eduardo Abian Serrano, Análisis de medidas de vibraciones y ultrasonidos en motores alternativos de combustión interna, Centro Politécnico Superior de Ingenieros de la Universidad de Zaragoza, 2008.