

**DIESEL ENGINE CONDITION MONITORING TECHNIQUES****TECNICAS DE SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE MOTORES DIESEL****PhD. Simón J. Fygueroa Salgado****Departamento de Ingeniería Mecánica, Industrial y Mecatrónica.**  
Universidad de Pamplona. Ciudadela Universitaria. Pamplona. Colombia.  
sjfigueroa@unipamplona.edu.co

**Abstract:** Besides the known condition monitoring capacity as a highly reliable diesel engines predictive maintenance method its practical application in Colombia is already low due to the little knowledge about different apparatus and techniques used for this purpose. Present work constitutes a short review about condition monitoring techniques used to diagnose diesel engines like non destructive, temperature, wear, vibrations and performance tests. Because engine operation level, size and load are very dissimilar this general study is made in order to provide the fundamentals to select the right technique for a specific application. Finally a group of conclusions are presented.

**Resumen:** A pesar de la reconocida capacidad que posee el seguimiento del estado (condition monitoring) como método altamente confiable para el mantenimiento predictivo de motores Diesel, su aplicación práctica en Colombia es todavía muy reducida, debido principalmente a falta de conocimiento de las diferentes aparatos y técnicas que se emplean con esta finalidad. En el presente trabajo se hace una somera revisión de las técnicas de seguimiento del estado que se pueden aplicar a los motores Diesel: No destructivas, temperatura, desgaste, vibraciones, y prestaciones. Se lleva a cabo un estudio general, debido a que los rangos de operación, tamaño y carga de los motores son muy distintos; de esta manera se tienen los fundamentos necesarios para seleccionar la técnica más adecuada para aplicar en una situación específica. Finalmente se presentan una serie de conclusiones.

**Keywords:** Predictive maintenance, diesel engines, condition monitoring, wear, performance

## 1. INTRODUCCIÓN

La actual demanda de mejores métodos para el mantenimiento de motores Diesel ha motivado un creciente interés en el potencial que ofrecen las modernas técnicas de seguimiento del estado.

Con su utilización para detectar fallas inminentes se puede conseguir una significativa reducción de las actividades de mantenimiento, y al mismo tiempo, eliminar prácticamente, la posibilidad de paradas del motor no programadas.

Simultáneamente se pueden lograr beneficios adicionales, a causa de que la información obtenida suministra al ingeniero de mantenimiento un conocimiento creciente sobre como se está comportando el motor. Conocimiento que puede emplearse para optimizar su eficiencia, con la consiguiente reducción del consumo de combustible y por lo tanto, con la mejora de su economía de funcionamiento.

A pesar de las grandes posibilidades que presenta el seguimiento del estado, en la práctica su adopción ha sido bastante limitada. La razón principal de esta situación, está en que muchas de las características del estado del motor Diesel no son medibles directamente. Por el contrario, se deben deducir a partir de otros parámetros cuantificables, cuyos valores, frecuentemente, están influenciados por varios de sus diferentes sistemas y por los procesos que se producen en el motor, así como por las condiciones del entorno. Por esta razón, para obtener la información necesaria respecto a su estado, se requiere personal altamente calificado junto con técnicas y equipos de análisis muy sofisticados. Los costos asociados con estas exigencias, en algunos casos, son prohibitivos.

En este trabajo se presentan las principales técnicas de seguimiento del estado que se pueden aplicar al mantenimiento de motores Diesel. Se da un tratamiento un tanto general al tema, a causa de la diversidad de rangos de tamaño, potencia y otras características de estos motores y a que la selección de la técnica adecuada para una aplicación específica depende de las necesidades individuales de cada caso.

## 2. SELECCION DE LA TECNICA DE SEGUIMIENTO

El principal objetivo de cualquier política de mantenimiento de motores, es evitar que se produzcan averías, que van desde la pérdida de capacidad para producir las prestaciones de diseño, hasta las fallas catastróficas que implican su detención y un daño importante. Las últimas pueden atribuirse a errores de diseño, de fabricación de algunas de sus piezas y del operario que en ocasiones, exige del motor más de lo que está en capacidad de producir; estas eventualidades son impredecibles y por lo tanto, no son susceptibles de

un fácil seguimiento. Por el contrario, éste se utiliza, más bien, para detectar el deterioro progresivo de los componentes del motor o la paulatina contaminación de sus fluidos antes que se alcancen niveles críticos que produzcan fallas.

Para seleccionar una técnica de seguimiento se debe tener principalmente en cuenta que prevea, tanto como sea posible, las fallas inminentes y el tiempo restante para que estas se produzcan (Weiss et al., 1995). El tiempo restante permite, no solo la adquisición de repuestos, sino la programación de la parada y los trabajos necesarios para efectuar la reparación. Por lo tanto, la técnica de seguimiento y los parámetros de control que se escojan deben ser sensibles al defecto o falla que se trata de detectar.

Es importante además, que los sensores de seguimiento y los métodos de medición de parámetros sean exactos y confiables. En muchos casos se ha ordenado la detención de grandes motores a causa de instrumentación en mal estado. Por estas razones se deben revisar y recalibrar los sensores y medidores cada cierto tiempo, por ejemplo cada año. Cuando sea posible la calibración se debe hacer sobre el motor o cerca de él. Se pueden utilizar por ejemplo, hornos portátiles para calibrar pirómetros y termopares, tacómetros manuales para revisar sensores de velocidad y probadores de peso muerto para comprobar medidores de presión.

## 3. TECNICAS DE SEGUIMIENTO DEL ESTADO

Las técnicas de este tipo más empleadas en el mantenimiento de motores Diesel son:

- Técnicas de seguimiento no destructivas.
- Técnicas de seguimiento de la temperatura.
- Técnicas de seguimiento del desgaste.
- Técnicas de seguimiento de vibraciones.
- Técnicas de seguimiento de prestaciones.

### 2.1. Técnicas de seguimiento no destructivas

Emplean para el seguimiento de motores, instrumentos de inspección y prueba no destructivos, con los cuales se obtienen, además de parámetros mesurables, algunos características que identifican las fallas: Se puede fotografiar una grieta para medir su tamaño o para compararla con otra fotografía hecha previamente.

La técnica no destructiva básica es la inspección visual, que puede auxiliarse de intensificadores de imagen para iluminar el interior del motor y de fibras ópticas flexibles para llegar a sitios inaccesibles. Durante las revisiones periódicas se puede examinar el estado de las válvulas, pistones y camisas mediante inspección con endoscopios. La inspección se puede aprovechar mejor, si se utiliza una videocámara para visualizar el interior del motor; de esta manera, los resultados pueden almacenarse con facilidad en un computador, para que su posterior interpretación se haga de una manera más efectiva.

### 2.2. Técnicas de seguimiento de la temperatura

Las características térmicas de las partes o sistemas del motor Diesel se pueden seguir fácilmente con gran variedad de sensores como termómetros de contacto, termopares, termistores, detectores infrarrojos e imágenes termográficas. El seguimiento de la temperatura se lleva a cabo con alguno de los siguientes objetivos:

- Para efectuar el control de este parámetro en algún proceso, por ejemplo la combustión, o para comprobar si en realidad está siendo controlado adecuadamente.
- Para detectar una variación del calor generado a causa de alguna falla, tal como un cojinete en mal estado.

Para detectar una variación del calor transmitido por y hacia el exterior del bloque del motor, a causa de un defecto de alguno de sus elementos, como la bomba de refrigeración

### 2.3 Técnicas de seguimiento del desgaste

Comprenden tanto el uso de sensores para determinar las holguras entre partes del motor (por ejemplo, juego entre el pistón y la camisa) como el de las técnicas de seguimiento de las concentraciones de elementos metálicos presentes en muestras del lubricante, con la finalidad de efectuar un control total del desgaste del motor. El principio fundamental en que se basa esta última aplicación, es que los aceites lubricantes y los fluidos hidráulicos que circulan dentro del motor transportan las partículas que se producen por su desgaste interno y corrosión. Haciendo un seguimiento de la cantidad, tamaño y forma de éstas, es posible conocer que partes del motor se están deteriorando y con que velocidad se está produciendo este proceso.

En general, el seguimiento de la contaminación del lubricante puede tomar una de las tres siguientes formas (Fygueroa, 1994):

- Análisis de las partículas grandes que se encuentran en los filtros o son recogidas por colectores magnéticos específicos.
- Análisis de las partículas pequeñas que se encuentran suspendidas en el aceite.
- Análisis del estado del propio aceite.

Dependiendo del tipo de seguimiento empleado y de los análisis que se hagan al aceite, se tienen diferentes parámetros de seguimiento para obtener la información característica del estado del motor, por ejemplo los análisis que se hacen a las partículas grandes recogidas por colectores magnéticos, para caracterizar el estado tribológico del sitio desgastado, son: Cantidad, forma, tamaño y composición. La variación de la cantidad en el tiempo, es indicativa de la tendencia, de la magnitud y de la velocidad del desgaste; la morfología de las partículas caracteriza el tipo de desgaste, el tamaño advierte sobre su estado y finalmente la composición revela que parte del motor es la que falla por desgaste (Verdegan, 1988).

Para analizar las partículas pequeñas que se encuentran suspendidas en el aceite, se emplean técnicas espectrométricas o ferrográficas (Beck et al., 1984). De las primeras, la más ampliamente usada en la actualidad es la espectrometría de emisión con la cual se determina la composición y concentración de las partículas. La ferrografía emplea un instrumento que utiliza un potente magneto selectivo que separa las partículas según su tamaño, posteriormente se lleva a cabo su caracterización cuantitativa con la aplicación de alguna técnica de microscopía óptica o electrónica

Los análisis para determinar el estado del aceite son pruebas de laboratorio para encontrar algunas de sus propiedades como la viscosidad, la detergencia o la reserva alcalina que son características de su degradación; o ensayos para determinar los contenidos de agua, combustible, materia carbonosa e insolubles que son característicos de su contaminación. En el mercado se encuentran equipos portátiles para hacer a los aceites, in situ, las pruebas más representativas.

Para la detección de las partículas de desgaste en funcionamiento, se emplean sensores que se disponen en el interior del sistema de lubricación y que indican continuamente su presencia. En los últimos diez años se han desarrollado una serie de sensores de este tipo, para aplicaciones aeronáuticas, entre los que se encuentran: Detectores de contacto eléctrico interrumpido, de chip magnético instrumentado, inductivos de flujo total, filtros indicadores y seguidores de abrasividad de película resistiva (Yarrow, 1993).

#### 2.4 Técnicas de seguimiento de vibraciones

Como su nombre lo indica, estas técnicas se basan en la medición y subsiguiente interpretación de las firmas (gráficas que caracterizan la vibración) del motor y sus componentes. Algunas de sus aplicaciones especiales como el seguimiento de los pulsos de choque, son de especial importancia en la detección de fallas en rodamientos y cojinetes. Para la aplicación del que se podría llamar seguimiento normal de vibraciones, se pueden establecer los siguientes pasos:

- Captación de la señal. Corrientemente se utiliza con esta finalidad un acelerómetro o un sensor inductivo de proximidad.
- Análisis frecuencial. Es el método utilizado para descomponer las vibraciones complejas en sus componentes fundamentales; se basa en el filtrado de las señales ya sean de desplazamiento, velocidad o aceleración del movimiento vibratorio. El análisis puede hacerse sobre una banda de frecuencias muy amplia y considerar solo el valor pico del parámetro vibracional respectivo, o sobre bandas de frecuencia restringidas, una octava o menos.
- Interpretación de las frecuencias discretas. Se trata del análisis de la dinámica de los componentes del motor con la finalidad de que se pueda llevar a cabo la evaluación de las frecuencias discretas seleccionadas.

El seguimiento de las vibraciones se puede aplicar tanto a las lineales como a las torsionales. En el último caso, las medidas se hacen con un sensor de proximidad que detecta el movimiento de un disco dentado o ranurado montado sobre el componente o eje rotativo correspondiente; puede utilizarse con esta finalidad cualquier tipo de sensor de velocidades

angulares. El análisis de la firma de vibraciones torsionales se utiliza, por ejemplo, para dar una indicación de la eficiencia de los amortiguadores de vibraciones torsionales que se montan en el extremo libre del cigüeñal del motor. Este se lleva a cabo ya sea con el análisis frecuencial, con el cual se obtienen las componentes armónicas rotativas de la firma torsional, o rastreando los armónicos seleccionados en un cierto rango de velocidades del motor.

Respecto al análisis de las vibraciones lineales, la experiencia ha comprobado que las frecuencias discretas producidas en los rodamientos de bolas o de rodillos y en el acoplamiento de los dientes de los engranajes son síntomas, además de inequívocos, muy importantes puesto que una de las consecuencias de su deterioro, es el aumento de los juegos entre las partes en movimiento y por lo tanto, el incremento de la amplitud de las vibraciones que se presentan a frecuencias discretas particulares.

El seguimiento de los movimientos de los cojinetes de deslizamiento se hace con dos sensores de proximidad colocados a 90°. En este caso, las salidas del sensor se filtran a la frecuencia correspondiente a la velocidad de rotación del eje y luego se envían a un osciloscopio en el cual se visualizan sus órbitas de giro, lo cual permite la evaluación de su excentricidad.

#### 2.5 Técnicas de seguimiento de prestaciones

Según Macían (1994), las prestaciones a las que convencionalmente se hace un seguimiento son: Potencia, par, velocidad, consumo de combustible y consumo de aceite. El seguimiento de las prestaciones, por lo general, va más encaminado a la optimización de la eficiencia del motor que a ser una herramienta de mantenimiento.

En su forma más sencilla, el seguimiento de las prestaciones no es más que el registro manual y sistemático de los parámetros del motor para que los ingenieros puedan estudiar las consecuencias que se producen cuando se modifican sus valores. En su forma más compleja, necesita un computador con múltiples entradas de señales para registrar las procedentes de diferentes sensores. El computador debe poseer toda la información referente a la evaluación teórica de las prestaciones y un sistema de comparación completo que incluye pantallas amigables e impresión de tendencias y límites de

alarma. El sistema manual, simplemente grafica datos en bruto sin tomar en consideración los cambios de las condiciones del entorno, las variaciones de carga, etc. El seguimiento computarizado moderno, por el contrario, procesa información grabada sobre el comportamiento en funcionamiento, para tener en cuenta automáticamente tales variaciones, presentando como salida en pantalla, parámetros adimensionales de comparación para que sean evaluados.

### 3. EVALUACION DE LOS RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO

Con cada una de las técnicas que se han presentado anteriormente, se obtiene información cuantitativa respecto a la condición del motor, ya sea directamente o mediante un adecuado análisis y normalización de los parámetros medidos. La evaluación de los resultados, que caracteriza el estado al motor, se lleva a cabo de dos maneras: Mediante la comparación del estado o mediante el reconocimiento de la tendencia.

#### 3.1 Comparación del estado

En esta fase, cada vez que se hace una nueva medida, los parámetros relacionados con el estado se comparan con los de referencia o normales que se conoce están relacionados con un estado general de funcionamiento correcto. En algunos casos, el parámetro de referencia es un número tal como por ejemplo, la viscosidad normal de un lubricante; en otros, la referencia es muy compleja, como es el caso de un espectro de vibraciones. Sin embargo, en ambos casos se aplica el concepto fundamental, que la presencia de una falla se detecta por la desviación de algún parámetro, fuera de las tolerancias permitidas, respecto de su valor de referencia.

Para que la comparación del estado sea efectiva se deben establecer parámetros de referencia y límites de alerta y alarma adecuados (Collacot, 1982). Este proceso necesita una cantidad considerable de conocimientos anteriores, generalmente grabados, respecto al comportamiento del motor o parte específica. Este procedimiento se simplifica, cuando varios motores o sus partes semejantes, trabajan en estrecha vecindad, puesto que en este caso se pueden establecer comparaciones in situ.

#### 3.2. Reconocimiento de la tendencia

La labor primordial en esta etapa, consiste en reconocer la tendencia de los parámetros característicos del estado del motor (Jones, 1992). Cuando son un número único, las tendencias se identifican fácilmente en un gráfico de la variación de su valor en función del tiempo. Cuando se trata de parámetros complejos, como el espectro frecuencial de una vibración, el establecimiento de la tendencia no es tan sencillo; en este caso, se necesita un almacenamiento o grabación sistemática de gran cantidad de información previa.

El análisis de la tendencia presenta, respecto a la comprobación del estado, la gran ventaja de que extrapolando las tendencias almacenadas se puede dar una estimación cuantitativa del tiempo restante hasta la falla.

### 4. CONCLUSIONES

1. Todas las técnicas de seguimiento tratadas tienen aplicación en el campo motorístico; sin embargo, se enfatiza que, ha sido demostrado por la experiencia, que la gran mayoría trabajan mejor cuando se utilizan para detectar un solo síntoma característico de una falla. Si se desea una señal de una falla incipiente por adelantado, el método de detección más sensible es, por supuesto, aquel que capta más finamente el defecto específico de interés. Para aprovechar los grandes beneficios potenciales del seguimiento del estado, se debe utilizar el enfoque del síndrome, que consiste en emplear un conjunto colectivo de síntomas, obtenidos con la técnica apropiada, para valorar un estado y reconocer la existencia de la falla.
2. Debido a que la instrumentación que se emplea en el seguimiento del estado es muy costosa y puesto que un motor Diesel puede fallar por innumerables causas, en el momento actual no es económicamente factible el control de todos sus posibles defectos; por lo tanto, se recomienda identificar los que se presentan con mayor frecuencia y los que de ocurrir producen mayores pérdidas, para luego diseñar una estrategia de mantenimiento por seguimiento del estado, a la medida, más acorde con la situación.

## REFERENCIAS

- Beck, J.; Johnson, J. (1984). The application of analytical ferrography and spectroscopy to detect normal and abnormal Diesel engine wear. SAE Transaction 841371.
- Collacot, R. (1982). *Mechanical fault diagnosis and condition monitoring*. Chapman and Hall. New York.
- Fygueroa, S. (1994). *Diagnóstico del desgaste y el estado de motores de encendido por compresión*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Jones, M. y Massoudi, A. (1992). Profitable condition monitoring the role for contamination control. BHRA Conference on Condition Monitoring. Stratford-upon-Avon.
- Macián, V. (1993). *Mantenimiento de motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Verdegan, B.; Thibodeau, L. y Fallon, S. (1988). Lubricating oil condition monitoring through particle size analysis. SAE paper 881824.
- Weiss, P.; Smith, A. y Perkins, K. (1995). *Guide to Condition Based Maintenance*. Elsevier Advanced Technology. Southampton.
- Yarrow, A. (1993). *Condition monitoring by wear debris analysis*. Noise & Vibration Worldwide. ATL Group Ltd. London.
- Ikeda, M. and Siljak, D. (1992). Robust stabilization of nonlinear systems via state feedback. In: *Robust Control Systems and Applications, Control and Dynamic Systems*, Ed C.T. Leondes, Vol. 51, pp. 1-30. Academic Press, New York.
- Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Tadmor, G. (1989). Uncertain feedback loops and robustness. *Automatica*, Vol. 27, pp. 1039-1042.