



MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN TRACTORES AGRÍCOLAS. PROPUESTA DE METODOLOGÍA ORIENTADA AL MANTENIMIENTO CONECTADO

CARLOS MAFLA¹, CRISTINA CASTEJON², HIGINIO RUBIO²

¹Universidad Técnica del Norte
Departamento de Ingeniería Automotriz
Av. 17 de julio, 5-21, 100150, Ibarra, Imbabura, Ecuador

²Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. De la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España

(Recibido 3 de marzo de 2022, para publicación 3 de abril de 2022)

Resumen – Las técnicas de mantenimiento predictivo, y en particular las basadas en la condición (*Condition Monitoring*) están cobrando gran interés dentro de la gestión de mantenimiento por su interacción con los pilares del paradigma Industria 4.0 que se están integrando en la industria. El predecir fallos antes de que estos ocurran es una de las ventajas más importantes de esta técnica que permite evitar paradas inesperadas y reduce los costos de mantenimiento y operación. El objetivo de este estudio es dar a conocer las técnicas asociadas a la implementación de un mantenimiento predictivo en tractores agrícolas y las ventajas que estas podrían generar. Para ello, en este trabajo se detallan, además de las averías comunes de los motores de vehículos agrícolas y los fallos de mayor frecuencia, la metodología para implantar un sistema de mantenimiento predictivo en los elementos críticos de un vehículo agrícola.

Palabras clave – Vehículo agrícola, mantenimiento predictivo, averías en tractores, Industria 4.0, monitorización basada en la condición.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es el conjunto de actividades que tratan de subsanar la degradación o fallo que se produce, por el tiempo y el uso en una máquina o equipo con el fin de garantizar su normal funcionamiento. Este conjunto de actividades es de vital importancia en la industria, pues garantiza la calidad en los procesos y productos. Así, la misión del departamento de mantenimiento es la de asegurar disponibilidad, fiabilidad, vida útil y costo de mantenimiento. La optimización y mejora de dichas operaciones permite reducir costes garantizando el buen funcionamiento de la máquina. En este sentido el mantenimiento tradicional vincula diferentes estrategias (correctivo, preventivo y predictivo). Estas estrategias se fundamentan en la determinación de la probabilidad de ocurrencia de fallos empleando herramientas de análisis, listas de chequeo y programación de tareas, sin embargo, no muestra cómo llegar a ellas y se sostiene en escasas variables [1]. De ahí el interés de incorporar de manera extensiva las técnicas de mantenimiento predictivo, gracias a la incorporación de tecnologías IoT (del inglés *Internet of things* / internet de las cosas) en la industria.

El mantenimiento en la industria evoluciona constantemente introduciendo en sus procesos nuevos equipos y sensores para la medida y el control más económicos y eficientes gracias al rápido desarrollo de la electrónica y las comunicaciones. Con esto se logra tener datos en tiempo real y monitorear el estado de las máquinas o equipos, siendo las técnicas utilizadas para ello: análisis de vibraciones, termografía infrarroja, baroscopio, análisis de aceites, emisión acústica, humos de combustión, entre otros.

El mantenimiento predictivo tiene como misión predecir fallos en los componentes de la maquinaria, con el objetivo de reemplazar o reparar el elemento deteriorado antes que este provoque una falla colectiva y la

máquina requiera de una tarea de mantenimiento correctivo, con las consecuencias de pérdida de productividad que lleva la parada imprevista de la máquina.

El mantenimiento predictivo instituye procedimientos y considera información de daños históricos establecidos a partir de relaciones de una determinada variable y la vida útil del componente. Se logra esa información adquiriendo datos de ciertos parámetros representativos del estado del elemento en intervalos predeterminados periódicamente hasta que dicho elemento presenta un fallo.

Dentro de este ámbito, este trabajo se centra en el mantenimiento eficiente de maquinaria agrícola. El tractor es la fuente de energía móvil y versátil más importante con que se cuenta actualmente para la producción comercial en el área agropecuaria y forestal [2]. Este vehículo agrícola se desplaza por el terreno arrastrando y/o empujando implementos, portando sobre sí herramientas y sistemas mecánicos para sembrar, fertilizar y controlar malezas y plagas, y puede también accionar y controlar el funcionamiento de otras máquinas más complejas.

La maquinaria agrícola trabaja en condiciones de operación críticas, ya que debe estar operativa cuando sea necesaria principalmente en campañas (recolección u otras) debe garantizar el funcionamiento hasta su terminación, de ahí que tenga estrictos protocolos de mantenimiento específicos.

2. MANTENIMIENTO

El mantenimiento es un conjunto de tareas realizadas sobre un producto o servicio destinadas a conservar o corregir su estado para que pueda desempeñar la función que se le requiere. Existen diferentes estrategias de mantenimiento que fueron apareciendo en el tiempo y que en la actualidad deben convivir: correctivo, preventivo y predictivo. En la actualidad comienza a hablarse de una cuarta estrategia denominada mantenimiento proactivo o prognosis (aunque algunos autores la incluyen dentro de la estrategia de mantenimiento predictivo) [3].

Durante la primera revolución industrial el mantenimiento correctivo (sustitución del elemento cuando falla) era el único que se utilizaba. Dicha estrategia provocaba accidentes y pérdidas de equipos, además de paradas no programadas. La preocupación de las aseguradoras, que exigieron mejores cuidados, provocó la creación de talleres mecánicos para la sustitución efectiva de los elementos y los almacenes de repuestos. La experiencia de los usuarios de las máquinas y la normalización de los elementos mecánicos, para mantener la productividad y evitar fallos catastróficos, condujo a estrategias conservadoras de mantenimiento, englobadas en el mantenimiento preventivo, donde se establecían periodos de sustitución o revisión de los elementos en función del tiempo de uso y de la experiencia de fabricantes y usuarios. Es en los años sesenta, con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáutica, cuando se incorpora el mantenimiento predictivo a las estrategias de mantenimiento, donde la actuación no depende del tiempo de funcionamiento (mantenimiento preventivo) sino del estado o condición y de la fiabilidad mecánica del sistema [4].

La organización de los sistemas productivos ha evolucionado hacia una mejora basada en la productividad de los equipos, por tal motivo es necesario que operen con los máximos niveles de eficiencia y calidad, para consolidar un sistema productivo que pueda tener como objetivo los tres ceros; cero despilfarros, cero defectos y cero averías y problemas de seguridad [5].

El departamento de mantenimiento es el principal responsable de sostener los activos de la empresa en el nivel más alto de disponibilidad, a través de programas de mantenimiento preventivo y el control de las acciones correctivas. Para alcanzar la excelencia operativa y reducir las pérdidas a lo largo de la cadena de operación y al mismo tiempo, mejorar la capacidad de gestión del personal de producción, se debe buscar la integración completa de todo el equipo [6]. Para enfrentar este desafío, se han desarrollado nuevos métodos o modelos de administración aplicables a estos entornos:

- Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)
- Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)
- Mantenimiento basado en la condición (CBM)
- Mantenimiento basado en la disponibilidad (ABM)
- Gestión de activos basada en evidencia (EBAM)

- *Prognosis Help Management* (PHM)

Las técnicas de mantenimiento avanzadas requieren en la mayoría de los casos de sistemas de gestión o herramientas informáticas [7]. La implementación de sistemas computarizados, con el objetivo de administrar los activos de la compañía, se considera una buena práctica de mantenimiento para lograr la excelencia. A pesar de esta realidad, el éxito depende de la adecuación del sistema informático a los requisitos funcionales de la empresa, y se pueden obtener muchos beneficios aplicando estrategias de administración de activos basadas en aplicaciones informáticas [8].

El uso de sistemas de mantenimiento inteligentes para predecir y monitorear el estado de las máquinas y sus componentes integrados con interfaces de realidad mixta puede brindar un valioso apoyo a los operadores de mantenimiento, para aislar y reparar los componentes del equipo que posiblemente fallen, según el análisis de sus comportamientos. Esto ayudaría a reducir el tiempo de mantenimiento y los costos causados por averías imprevistas de equipos industriales críticos, en los cuales, las fallas, pueden comprometer gravemente el proceso de producción [9].

En la actualidad, el mantenimiento ha evolucionado con la disponibilidad de equipos electrónicos de diagnóstico y de control sumamente fiables, para realizar mediciones periódicas y conocer el estado real de los equipos.

2.1. Objetivos del mantenimiento

La *European Federation of National Maintenance Societies* (EFNMS) define el mantenimiento como [10]: todas las acciones que tienen como objetivo mantener un equipo o restaurarlo a un estado en el cual se pueda llevar a cabo alguna función, estas acciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes.

Un mantenimiento correctamente gestionado, aumenta la vida útil de los equipos, además se alcanzan rendimientos aceptables durante más tiempo y se reduce las paradas inesperadas. El objetivo del mantenimiento se determina en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, reparar, los fallos
- Disminuir la gravedad de fallos
- Evitar paradas de la maquinaria
- Evitar accidentes
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas
- Reducir costes
- Aumentar la vida útil de los equipos

2.2. Gestión del Mantenimiento

El desarrollo actual de la industria ha evolucionado el concepto de reparación. Antiguamente, el mantenimiento era considerado como una actividad auxiliar, donde el costo de éste era elevada. En la actualidad, el mantenimiento interviene en el proceso productivo, su costo ha disminuido y aumentado la vida útil de la maquinaria o los equipos.

Para organizar y modernizar el proceso de mantenimiento (resumido en la Fig. 1) se estudia la situación, se recopilan datos, se confeccionan estadísticas, se organiza científicamente el trabajo y, todo ello, va conformando un cuerpo de doctrina [11]. En la Fig. 1 se presenta un esquema sobre las diferentes fases de la organización del mantenimiento y los factores que influyen en estos.

Los principales factores que impiden lograr maximizar la eficiencia global de un equipo se han clasificado en seis grandes grupos y son conocidos como las seis grandes pérdidas, que se representan en la Fig. 2 con sus efectos. Las pérdidas se agrupan en tres categorías, tomando en consideración el tipo de mermas que pueden representar en el rendimiento de un sistema productivo, con intervención directa o indirecta de los equipos de producción [13].

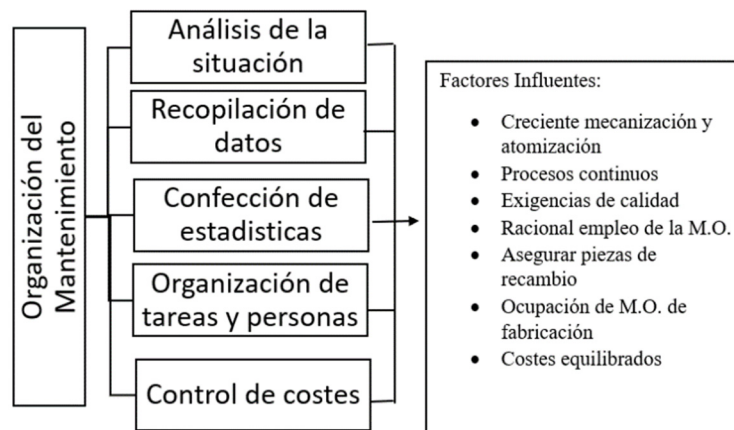


Fig. 1. Organización del mantenimiento [12].



Fig. 2. Las siete pérdidas y su agrupación [14].

3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Con el mantenimiento predictivo se efectúa un seguimiento de las variables concernientes al funcionamiento de las máquinas para poder predecir posibles fallas y tomar las acciones correctivas en el momento oportuno [14].

La ejecución del mantenimiento predictivo, en la actualidad implica costos elevados de inversión en equipos, desarrollo y formación de los operarios. A pesar de estas desventajas, hoy en día, hay una tendencia creciente a su implementación en la mayoría de las industrias, por los beneficios que esta presenta, en especial, el poder conocer el estado de las máquinas en cualquier instante del tiempo, logrando un funcionamiento óptimo, aumentando la seguridad, reduciendo el stock de piezas para el mantenimiento correctivo, aumentando los tiempos de inspección del mantenimiento preventivo y evitando fallos catastróficos.

En el marco del mantenimiento predictivo existen una serie de ensayos no destructivos, enfocados al diagnóstico del funcionamiento de los equipos, para descubrir advertencias que indiquen un mal funcionamiento en alguna de sus partes [15]. Una vez descubiertos los desperfectos, se programan las reparaciones o revisiones respectivas, sin afectar al proceso de producción o funcionamiento de las máquinas [16]. Por otra parte, dentro del mantenimiento predictivo se encuentra la monitorización de la condición, donde se

visualizan un conjunto de variables representativas durante el funcionamiento de la máquina y se establecen unos valores de alerta y alarma para la toma de decisiones. Seguidamente, se exponen las técnicas más comunes utilizadas en el mantenimiento predictivo.

3.1. Análisis de vibraciones

La vibración se define como el cambio de posición en el tiempo, de una parte, o de todo un elemento respecto a su posición de equilibrio [17].

Según la normativa ISO 10816 [18] se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. El análisis de las vibraciones puede realizarse en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o, en su caso, en el dominio tiempo-frecuencia [19].

El análisis de vibraciones se utiliza fundamentalmente en la monitorización de máquinas rotativas. Tradicionalmente, en el análisis en el dominio del tiempo se estudiaba la evolución temporal de parámetros estadísticos como RMS, curtosis o valor de pico, entre otros. En el dominio de la frecuencia, los estudios de los espectros de frecuencia mediante la aplicación de la transformada de Fourier permiten detectar el tipo y severidad de fallo de algunos elementos críticos de la máquina (como rodamientos, ejes o engranajes, entre otros) debido a que sus frecuencias de fallo son ampliamente conocidas. Aunque no siempre es posible detectarlas en servicio.

3.2. Termografía

La termografía es una técnica que ha tenido una constante evolución, como medio de monitoreo en tiempo real de la temperatura; en equipos, máquinas y motores. Provee datos para conocer el estado o condiciones de los equipos, y así evitar daños o paradas inesperadas, con el desarrollo de nuevas herramientas de procesamiento de imágenes termográficas y el aprendizaje autónomo se ha logrado obtener resultados más pronto y sin interferencia humana. A diferencia de otras metodologías de monitoreo de condición, la termografía infrarroja proporciona una imagen pseudo codificada por colores en tiempo real del objeto y la manifestación visual de los defectos [20].

3.3. Emisión acústica

Se basa en el estudio de las ondas del sonido de alta frecuencia (superiores a las que percibe el oído humano) que se producen en las máquinas. El oído humano puede percibir frecuencias de 20 Hz y 20 kHz [21]. Dependiendo de la condición operativa de la máquina dichas ondas serán diferentes y permitirán analizar el estado de la máquina. La aplicación de análisis por emisión acústica se hace indispensable especialmente en la detección de fallas existentes en equipos rotantes que giran a velocidades inferiores a 300 rpm [22], donde la adquisición de vibraciones no ofrece diagnóstico concluyente, por otra parte esta técnica no es viable en la aplicación de vehículos por el régimen de trabajo ya que se hace necesario el desmontaje del elemento a auscultar.

3.4. Análisis de aceites

El análisis de aceites estudia las propiedades fisicoquímicas y el tamaño de las partículas del fluido, utilizado en una determinada máquina, ayudando así a conocer la operación y el estado de la misma. El aceite, por su función lubricante, tiende a contaminarse y, por ello, se debe sustituir cada determinado tiempo (mantenimiento preventivo). Sin embargo, cuando el aceite presenta, en su composición, determinados contaminantes (como partículas metálicas o degradación del mismo), es síntoma que la máquina no funciona correctamente y esto se puede identificar con el estudio del aceite usado. El grado de contaminación del aceite está relacionado con la presencia de partículas de desgaste, de sustancias extrañas o degradación química de su composición [23].

4. TRACTOR AGRÍCOLA

Se entiende por tractores agrícolas a los vehículos autopropulsados con motor, capaces de arrastrar, empujar y accionar máquinas, móviles o estacionarias y que pueden trabajar fuera y dentro de las vías públicas. Se puede decir que el tractor agrícola es una máquina dotada de una fuente de potencia (motor diésel) y medios de locomoción propios (ruedas/orugas), utilizada principalmente, como sistema de tracción y transporte de otros equipamientos, para la realización de distintas operaciones en la propiedad rural [24]. En la Fig. 3 se presenta el esquema de un vehículo agrícola con sus partes mecánicas críticas.

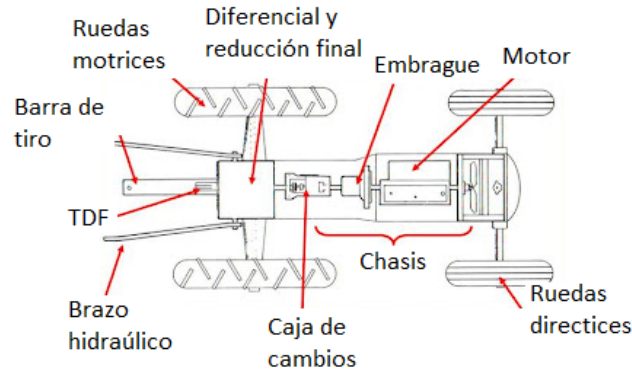


Fig. 3. Esquema general del tractor.

La maquinaria agrícola es un elemento primordial e importante en la agricultura extensiva y se convierte en una inversión fundamental para el desarrollo de esta actividad. La conservación y reparación de la maquinaria agrícola son un componente importante de los costos operativos. Sin embargo, variables como los costos de mantenimiento y las horas acumuladas de uso se han considerado ampliamente para determinar la vida útil óptima del tractor [25].

Los costos de conservación y reparación dependen de la operación del tractor, la falta de repuestos, las habilidades del operador, las condiciones de cultivo, clima, la política de mantenimiento y otros factores [26].

El empleo de maquinaria tiene una influencia directa en la industria agrícola, donde se pueden mencionar como características más importantes las siguientes: reducción de tiempos y costos de cosecha, contrarrestar el déficit creciente de mano de obra y el poder realizar la cosecha en el horario más conveniente [27]. De todas las averías detectadas en vehículos agrarios, los relacionados con el motor se consideran las más críticas por diferentes motivos, el primero por del funcionamiento del motor depende el funcionamiento del resto de los sistemas asociados y, por otra parte, porque el mantenimiento del mismo no es una tarea sencilla a realizar por parte del operador. Bakht *et al.* estudiaron las averías de los tractores agrícolas y su mantenimiento en setenta granjas y los resultados arrojaron que el 69% cambian el aceite del motor cerca de lo indicado por el fabricante y tan solo el 23% cambian el aceite de la transmisión en las horas de trabajo estipuladas. Dando como resultado que un 41% de tractores tengan desperfectos mecánicos por no cambiar aceite (motor, transmisión), seguido de problemas en el sistema de combustible (inyector, bomba) 39%, por último las fallas en el sistema hidráulico fueron del 20% [28]. Tomando en cuenta los datos antes mencionados se puede comprender la importancia de mantener el buen funcionamiento del motor, ya que de este dependen los demás sistemas que conforman el tractor agrícola, uno de los aspectos esenciales a tomar en cuenta para su correcto funcionamiento es el mantenimiento preventivo (cambio de lubricantes), los daños del sistema de combustible se producen por la mala calidad de combustible o por problemas en la filtración, esto ocasiona fallos en el motor y posibles paradas no programadas.

5. DIAGNOSIS DE AVERÍAS EN ELEMENTOS MECÁNICOS ASOCIADOS AL TRACTOR

La medición de la vibración en motores de combustión interna ciclo diésel se ha comprobado como una herramienta idónea para monitorear y diagnosticar el motor en funcionamiento y predecir posibles fallas antes de estas afecten al trabajo del vehículo agrícola.

Uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta para evitar averías es el manejo u operación del tractor, donde el operario debe contar con los conocimientos de mecánica necesarios, tanto teóricos como prácticos, que le puedan llevar al diagnóstico de una determinada avería. Actualmente, debido a la tecnología empleada en la maquinaria agrícola, estos conocimientos deben estar complementados con conocimientos de sistemas eléctricos y electrónicos. La implantación de un sistema automatizado de diagnóstico facilitaría la toma de decisiones del operario, así como permitiría guiarle en las tareas de mantenimiento.

5.1. Clasificación de las averías

Las averías en un motor de vehículo agrícola pueden ser originadas por diferentes causas y pueden presentar diversos síntomas. Se puede hacer una clasificación donde se puedan agrupar la mayoría de las averías según su probabilidad de ocurrencia:

- *Repetitivas*. Son las más habituales, el operario realiza un diagnóstico rápido, aunque debe establecer alguna prueba que confirme la causa de esta, para no equivocarse.
- *Menos frecuentes*. Son averías esporádicas que aparecen normalmente cuando el vehículo no está en el taller. Se debe realizar un seguimiento hasta que aparezca el síntoma con claridad y localizar la avería.
- *Muy poco frecuentes*. Estas averías, en su diagnóstico, presentan un grado mayor de dificultad, ya que el motor funciona perfectamente y no existe motivo alguno para el fallo. Suelen ser motivo de falsos contactos u otros fallos, que aparecen y desaparecen esporádicamente, muy difíciles de localizar. Requieren de la intuición y experiencia del operario y de un prolongado tiempo de seguimiento, aunque, una vez detectada la avería, no suele ser difícil de reparar.

5.2. Diagnóstico de averías en el motor

En este apartado se describen las averías del motor por los síntomas que presentan (en la Tabla 1) y las averías del motor por los elementos que lo conforman (Tabla 2).

Tabla 1. Averías por síntomas.

SÍNTOMA	AVERÍA		
Al motor le resulta imposible girar	Segmentos pegados Distribución a destiempo Motor recalentado Motor congelado		
El motor puede girar, pero no arranca	Falta de combustible	Comprobación del sistema de inyección	
	Fallo en el encendido	Estado de las bujías	Electrodos desgastados Electrodos engrasados Aislante agrietado
		Fallo en el circuito de alta tensión o bobinas	
		Comprobación de sensores y generadores de impulso	
	Falta de compresión	Defectos de ajuste de la culata	Junta de culata defectuosa Válvulas pisadas
		Desgaste entre cilindros y émbolos	Ovalado del cilindro Segmentos deformados Pistones defectuosos
		Desgaste en las válvulas	Holgura excesiva Asiento de válvulas defectuoso
	Mala sincronización de los elementos.	Comprobación de la distribución	

SÍNTOMA (Cont.)	AVERÍA (Cont.)	
	Entrada de líquido refrigerante en los cilindros.	Falta de hermeticidad de la junta de culata.
Al motor le cuesta arrancar	En frío	Comprobación sistema de alimentación y/o precalentamiento (MEC) Mal funcionamiento de la inyección Defectos en el sistema de encendido Falta de compresión en los cilindros
	Arranca en frío, pero se para	Mal funcionamiento de la inyección Comprobación del circuito de encendido
	En caliente	Falta de hermeticidad en los cilindros
Al vehículo le falta potencia	Avería en el circuito de engrase	Lubricante no adecuado Avería en la bomba de engrase
	Reglaje de encendido incorrecto	Mala puesta a punto inicial Bujías en mal estado
	Válvulas que no cierran	Válvulas picadas Muelles flojos Holgura excesiva en las guías de válvulas Asientos en mal estado Levas desgastadas
	Comprobación del sistema de alimentación	
	Comprobación de la compresión de los cilindros.	Cilindros ovalados Pistones defectuosos
	Mala refrigeración	Falta de líquido refrigerante Bomba de agua defectuosa Pérdida de líquido refrigerante Radiador obstruido Mal funcionamiento del termostato Mal funcionamiento del electroventilador
	Escape obstruido	
El motor es irregular a bajas revoluciones	Mala puesta a punto Mal calado de la distribución Mal funcionamiento del sistema de alimentación Entradas indebidas de aire	
El motor se calienta	Reglaje de encendido defectuoso, demasiado adelanto o atraso Hermeticidad de la culata defectuosa Fallos en el circuito de engrase o refrigeración	
El motor presenta vibraciones	Puesta a punto defectuosa Fallo en los cilindros Equilibrados defectuosos Sistema de inyección defectuoso	
Se observa un elevado consumo de combustible	Puesta a punto defectuosa Verificación del sistema de alimentación Verificación de la inyección	
En el motor se escuchan ruidos extraños	Picado y/o detonación	
	Autoencendido	
	Ruido en un solo cilindro a cada vuelta	El émbolo golpea alguna válvula
	Ruidos con el ritmo de las explosiones	Holgura excesiva de los taqués Segmentos rotos Piezas rodantes defectuosas Muelles de válvulas flojos
Sale mucho humo por el escape	Humo negro	Filtro de aire sucio Mezcla muy rica Presión de combustible muy elevada
	Humo azul	Segmentos en mal estado Retenes de válvulas en mal estado Desgastes en los émbolos y en los cilindros
	Humo blanco	Junta de culata rota Culata agrietada o deformada

A continuación, en la Tabla 2 se analizará las averías del motor por los elementos que lo conforman:

Tabla 2. Averías por elemento.

SÍNTOMA	AVERÍA		
En la culata y en las válvulas	Compresión baja o desigual en los cilindros	Válvulas	Holgura incorrecta Quemadas o deformadas Asientos en mal estado Muelles flojos o rotos Distribución mal sincronizada
		Culata	Junta de culata quemada Culata en mal estado Pistones
	Compresión muy alta.	Exceso de carbonilla en la cabeza del pistón o en la zona alta de la cámara de combustión	
Ruido en la parte alta del motor	Holgura excesiva en el juego de válvulas Válvula gripada en su guía Muelle roto Árbol de levas desgastado o roto Cadena o correa de distribución floja Tensor correa/cadena floja o rota		
En el bloque de cilindros	Golpes en el cigüeñal	Juego excesivo entre el cojinete y las muñequillas del cigüeñal Muñequillas ovaladas Cigüeñal desequilibrado	
	Ruidos en la biela	Juego excesivo entre cojinetes y muñequillas de la biela Muñequillas de biela defectuosas Aceite inadecuado Lubricación insuficiente	
	Ruidos en los pistones	Juego excesivo entre émbolo y cilindro. Juego excesivo entre segmentos y ranuras de alojamiento	
	Eje de pistón	Juego excesivo entre émbolo y bulón Juego excesivo entre el eje de émbolo y el cojinete de pie de biela	
En la lubricación	La luz testigo se enciende durante el funcionamiento del motor	Falta de aceite en el cárter Aceite muy diluido o inadecuado Aceite muy caliente Bomba de aceite defectuosa Cojinetes del motor desgastados	
	El manómetro no marca	Falta de aceite en el cárter Aceite muy diluido Bomba de aceite defectuosa	
	El manómetro marca a ralentí, pero desciende al acelerar	Falta de nivel de aceite en el cárter Filtro de aceite obstruido	
	El manómetro marca una presión excesiva	Aceite frío Tuberías obstruidas Aceite muy espeso	
	Oscilaciones en el manómetro	Falta de aceite en la bomba	
	Consumo excesivo de aceite	El aceite penetra por los segmentos y se quema dentro del cilindro Consumo de aceite por las guías de válvulas Junta de culata deteriorada Grieta en la culata Pérdidas de aceite por juntas de estanqueidad	
	Aumento del nivel de aceite en el cárter	El líquido refrigerante penetra en el cárter, por alguna grieta o por deterioro de la junta de culata Combustible en el cárter	

6. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN MOTORES AGRÍCOLAS

En base a los estudios anteriores en esta sección se propone una tarea de mantenimiento basado en la condición del motor de un vehículo agrario. Como método indirecto para el diagnóstico de la combustión, la vibración del motor ayuda a extraer información concerniente a esta.

En primer lugar, las vibraciones mecánicas en motores de combustión interna tienen un grado de importancia dentro del mantenimiento, ya que se puede identificar el estado del motor y prevenir fallas.

Según Rodríguez las principales fuentes de vibración en motores de combustión interna son debidas a: el movimiento del cigüeñal, el movimiento del sistema biela – manivela, la combustión y la operativa de las válvulas. De todas ellas, las dos últimas son inevitables mientras que el resto dependen del diseño y tipo de motor [29].

La combustión, por sus características de transformar una energía química en mecánica, presenta un contenido de baja frecuencia, estas se dan por la fuerza de impacto que ocasionan en el trabajo de las válvulas (por las holguras con las que trabajan) y en el inyector de combustible (en la cámara de combustión).

Las vibraciones en el mecanismo de las válvulas ocurren por el impacto de su trabajo (holgura térmica), a mayor número de válvulas mayor serán las vibraciones y por ende el ruido en los motores, de igual manera depende del régimen al cual trabajen.

Las fallas más comunes en los motores de tractores agrícolas (motores diésel) están relacionados con el sistema de alimentación del combustible, que afecta al correcto funcionamiento de los inyectores y la bomba. Esto puede producirse debido a dos aspectos principales: mala calidad de combustible y/o falencias en el mantenimiento. El primero es uno de los aspectos más problemáticos ya que disminuye la vida útil y aumenta el coste del mantenimiento, el segundo se produce por la falta de herramientas tecnológicas. Las rutinas de mantenimiento en general se basan a kilometrajes y/o horas de trabajo (mantenimiento preventivo) y no a la condición o estado de los elementos que deben ser sustituidos.

Otra falla rutinaria se la considera al sistema de válvulas (admisión de aire y escape de gases), esto es debido al trabajo que están sometidos los tractores, donde el cambio del régimen del motor es constante por la topografía de la zona, de igual manera por las condiciones de trabajo (clima y presión atmosférica).

El sistema de mantenimiento predictivo de motor de combustión interna propuesto pretende monitorizar el funcionamiento del motor, desde el punto de vista del proceso de la combustión, mediante la adquisición de medidas de vibración y el procesamiento de las mismas. Desde el punto de vista teórico se conoce que existen unas ventanas de frecuencia en las señales de vibración donde es posible analizar el proceso de combustión [30], [31]. Estas bandas de frecuencia se analizan tradicionalmente usando la transformada de tiempo-frecuencia y análisis de coherencia, obteniendo diferentes rangos en función de la máquina que se encuentran en torno a los 500 Hz (para velocidades de rotación del motor en el rango de las 2000 rpm). Por otra parte, la diferencia del comportamiento de la presión en el cilindro y el impacto de la válvula se aprecia en componentes de frecuencia del orden 3,2 ~ 6,4 kHz [34].

La metodología a seguir para la monitorización de la condición de un motor de un vehículo agrario se resume en la Fig. 4.

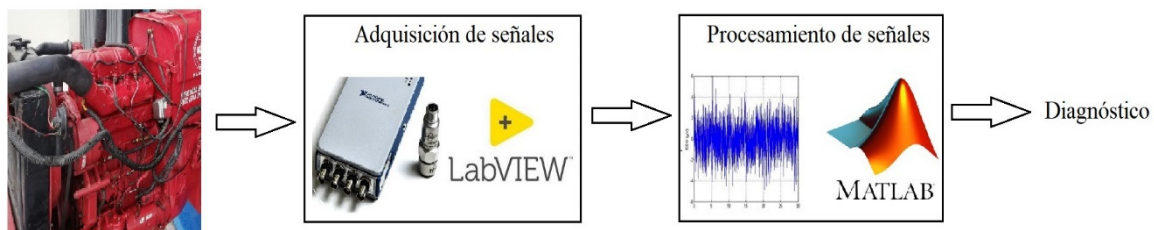


Fig. 4. Esquema de monitorización de estados.

Para la validación del sistema propuesto se hace necesario obtener un número considerable de datos para interpretar su comportamiento en diferentes condiciones de funcionamiento. Para ello se está desarrollando un banco de ensayos de un motor de un vehículo agrícola genérico (ver Fig. 4 imagen izquierda). El motor deberá permitir la inclusión de diferentes tipos de fallos de entre los más comunes. Al motor se le

incorporará un sistema sensorial para la adquisición de medidas de vibración, temperatura y régimen del motor (en Fig. 4, adquisición de datos, imagen central).

En cuanto a la medida de vibración, se prevé utilizar un acelerómetro unidimensional (ICP 603C01 con sensibilidad de 10.2 mV/(m/s²)). La señal es adquirida por la tarjeta de adquisición (NI 9250) con una frecuencia de muestreo es de 8.000 Hz, y el programa utilizado para la etapa de adquisición es LABVIEW. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de una primera señal adquirida del motor sin falla.

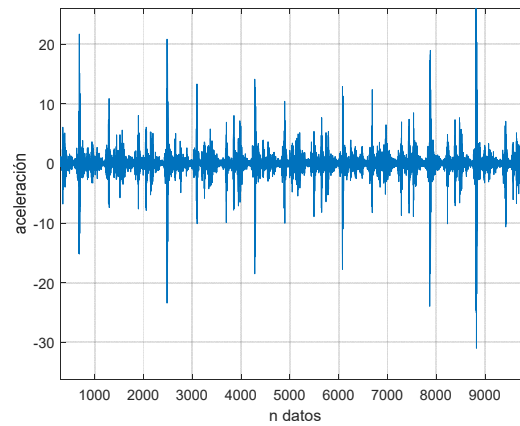


Fig. 5. Señal de vibraciones motor sin falla.

Las señales obtenidas necesitan un procesamiento para poder representar de manera óptima el comportamiento dinámico del sistema, dando como resultado características de las señales para cada estado real (en la Fig. 4. procesamiento de señales. Imagen derecha). El objetivo final de esta metodología será diagnosticar de manera remota, evitando que el personal de mantenimiento tome decisiones sobre el estado del motor.

De esta manera se propone un sistema de monitorización de vibraciones de un motor diésel de un vehículo agrícola, incluyendo un sensor de medida el cual estará ubicado en el bloque de cilindros lo más cercano a la cámara de combustión, el sensor proveerá de medidas de vibración a un sistema de adquisición que se diseñó en LabVIEW, se propone el uso de una tarjeta de adquisición de vibraciones la cual esta incorporada a un chasis para poder enlazar el sensor con el ordenador, posterior a esta acción llevará dichas señales a un procesador en el cual se utilizará el software MATLAB® para procesar los datos por medio de la Transformada de Fourier y así realizar la conversión en medidas para monitorizar y predecir fallas en los sistemas del motor en especial en los críticos (válvulas e inyectores) que están relacionados directamente con la combustión.

La señal, se procesa con el cálculo de la Densidad de Potencia Espectral (PSD, del inglés *Power Spectral Density*) para un primer análisis del comportamiento del sistema. En la Fig. 6 se presenta la PSD de la señal mostrada en la Fig. 5, donde se pueden observar las frecuencias características del motor.

Una vez analizadas las señales en el dominio de la frecuencia e identificadas las frecuencias características, el trabajo futuro se dirige hacia el estudio de la selección de patrones que permitan identificar de manera clara el comportamiento y estado de la máquina durante su vida útil.



Fig. 6. Procesamiento de señales PSD.

7. CONCLUSIONES

El mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones es una metodología confiable que permite analizar el motor en buen estado y con diferentes fallas, obteniendo datos fiables para la predicción de anomalías, mejorando la etapa de decisión sobre las acciones a llevar a cabo en las tareas de mantenimiento programadas.

Los sistemas que presentan inconvenientes rutinarios en un tractor agrícola son: sistema de inyección y sistema de admisión de aire y salida de gases. Estos sistemas afectan directamente a la combustión provocando un aumento de vibraciones y por ende fallas en el motor.

Según la Tabla 2, el motor tiende a cambiar la vibración cuando tiene defectos en el funcionamiento de los cilindros, mala sincronización y fallos en el sistema de inyección. Estos defectos están asociados a los sistemas que fallan rutinariamente, y afectan directamente a la combustión provocando una pérdida de trabajo y futuros daños considerables del motor.

Para un correcto manejo de la gestión del mantenimiento predictivo se debe tomar en cuenta el historial de los fallos y la bitácora de mantenimiento, de igual manera se debe conocer las posibles defectología de los tractores para determinar las zonas críticas y los puntos adecuados de toma de señales.

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología novedosa que tiene como objetivo adquirir características del comportamiento del motor (combustión) a partir de un sensor de vibraciones (acelerómetro) ubicado en el bloque de cilindros.

El experimento tendrá lugar en un motor diésel. El procesamiento de los datos obtenidos permitirá validar la existencia de una banda de frecuencia en las vibraciones que dependen del estado del motor (buen o mal estado), donde se tratará de determinar que bandas son independientes a las condiciones del funcionamiento del motor.

Indicar, que los resultados se obtendrán en primera instancia en un motor acoplado a una bancada fija, y se comprueba que el comportamiento es similar a otros resultados encontrados en la literatura. Esto permite validar el banco de ensayos, a partir de aquí habrá que incluir señales de ruido y medidas en campo para validar la metodología en campo.

AGRADECIMIENTO

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-116984RV-C22, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, los autores quieren agradecer también a la Universidad Técnica del Norte (Ibarra – Ecuador) por la financiación recibida para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. López-Nuñez, C.A. Trinchet-Varela, R. Pérez-Rodríguez, J.A. Vargas-Guativa, “Procedimiento para evaluar el mantenimiento en una flota de transporte de combustibles por carretera,” *Ing. Mecánica*, **24**(1), 1–14 (2021)
- [2] E. Hetz, L. Reina, “Consumo y alternativas de ahorro de combustible en la utilización de tractores agrícolas,” *La Técnica Rev. las Agrociencias. ISSN 2477-8982*, 9, 6 (2013), doi: 10.33936/la_tecnica.v0i9.541.
- [3] L. Sanzol, “Implantación de plan de mantenimiento TPM en planta de cogeneración,” *Tesis*, 2010, [Online]. Available: <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/2049/577191.pdf?sequence=1>.
- [4] D. Mesa, Y. Ortiz, M. Pinzon, “LaConfiabilidadLaDisponibilidadYLaMantenibilidadDi-4830901,” *Sci. Tech. Año XII*, 30, 155–160 (2006)
- [5] R. Carro, D. González, Gómes, “El sistema de producción y operaciones,” *Fac. Cienc. económicas y Soc.*, vol. 1, p. 28, 2007, doi: 10.1109/CLEO.2007.4453360.
- [6] M.H.G.I.A. Rodríguez, M. Ii, E. Martínez, D. Ii, “A new approach for strategic maintenance management based on soft-computing generics algorithms Un nuevo enfoque para la gestión del mantenimiento estratégico basado en algoritmos genéricos informatizados,” *21*(2), 101–107 (2018)
- [7] M. Herrera, E. Martínez, “Management audit applied to the maintenance department in hospital facilities,” *Ing. Mecánica*, **20**(3), 152–159 (2017) [Online]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v20n3/im07317.pdf>.

- [8] J.E. Amadi-Echendu, F.C.P. de Wit, "Technology adoption: A study on post-implementation perceptions and acceptance of computerised maintenance management systems," *Technol. Soc.*, **43**, 209–218 (2015) doi: 10.1016/j.techsoc.2015.09.001.
- [9] D.B. Espíndola, L. Fumagalli, M. Garetti, C. E. Pereira, S.S.C. Botelho, R. Ventura Henriques, "A model-based approach for data integration to improve maintenance management by mixed reality," *Comput. Ind.*, **64**(4), 376–391 (2013) doi: 10.1016/j.compind.2013.01.002.
- [10] Asociación Española para la Calidad, "Mantenimiento" 2019. https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/mantenimiento?p_p_id=56_INSTANCE_e0N5&p_p_lifecycle=0&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&_56_INSTANCE_e0N5_struts_action=%2Fjournal_content%2Fview&_56_INSTANCE_e0N5_groupId=10128&_56_INSTANCE_e0N5_articleId=1133065&_56_INSTANCE_e0N5_viewMode=print (accessed May 29, 2021).
- [11] R. Calduch, "Metodos y tecnicas de investigacion," *Esc. Norm. Super. Argentinos*, **2**, 180 (2014)
- [12] J. Ardila Marin, M. Ardila Marín, D. Rodríguez, D. Hincapié Zuluaga, "La gerencia del mantenimiento: Una revisión," *Dimens. Empres.*, **14**(2), 129–144 (2016)
- [13] J. Jaumandreu Patxot, "Ingeniería de mantenimiento.," *Ing. química*, **31**(360), 87–91 (1999)
- [14] P.K. Behera, B. S. Sahoo, "Leverage of Multiple Predictive Maintenance Technologies in Root Cause failure analysis of Critical Machineries," *Procedia Eng.*, **144**, 351–359 (2016) doi: 10.1016/j.proeng.2016.05.143.
- [15] A. Moosavian, G. Najafi, B. Ghobadian, M. Mirsalim, "The effect of piston scratching fault on the vibration behavior of an IC engine," *Appl. Acoust.*, **126**, 91–100, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.017.
- [16] A. Moosavian, G. Najafi, H. Nadimi, M. Arab, "Estimation of engine friction using vibration analysis and artificial neural network," *2017 Int. Conf. Mech. Syst. Control Eng. ICMSC 2017*, 130–135, 2017, doi: 10.1109/ICMSC.2017.7959457.
- [17] J.R. Sánchez Soto, A. del C. Téllez Anguiano, R.F. Escobar Jimenez, G.M. Chávez Campos, J.A. Gutiérrez Gneccchi, "Vibration analysis system applied to fault detection in wind turbines," *Ing. Investig. y Tecnol.*, **20**(3), 1–13 (2019) doi: 10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.028.
- [18] I. O. for Standardzation, "Norma ISO 18816." 24 (2011)
- [19] G. Marichal, M.L. Castillo Zas, J. López, I. Padrón, M. Artés, "Diagnóstico de engranajes en sistemas de propulsión marinos utilizando técnicas ANFIS," *Rev. Iberoam. Ing. mecánica*, **20**(1), 37–47 (2016)
- [20] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring - A review," *Infrared Phys. Technol.*, **60**, 35–55 (2013) doi: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
- [21] K. Wegener, F. Bleicher, U. Heisel, H.W. Hoffmeister, H.C. Möhring, "Noise and vibrations in machine tools," *CIRP Ann.*, **70**(2), 611–633 (2021), doi: 10.1016/J.CIRP.2021.05.010.
- [22] Renovetec, "No Title," *Análisis de ultrasonido* (2018) <http://www.renovetec.com/268-renovetec-servicios/analisis-de-ultrasonido>.
- [23] F. Saldivia, "Aplicación De Mantenimiento Predictivo . Caso Estudio: Analisis De Aceite Usado En Un Motor De Combustion Interna," *Innov. Eng. Technol. Educ. Compet. Prosper.*, 1–10 (2013)
- [24] N. Andersson, A. Machado, A. dos Reis, M. Conill Gomes, M. Ferreira, "Desenvolvimento da metodologia multicritério como modelo na seleção de tratores de quatro rodas," *Rev. la Fac. Agron.*, **114**(2), 265–270 (2015)
- [25] S.A. Al-Suhaibani, M.F. Wahby, "Farm tractors breakdown classification," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, **16**(3), 294–298 (2017) doi: 10.1016/j.jssas.2015.09.005.
- [26] M. Lips, "Repair and maintenance costs for nine agricultural machine types," *Trans. ASABE*, **56**(4), 1299–1307 (2013) doi: 10.13031/trans.56.10083.
- [27] C. Bocca *et al.*, "Estructura De Parral," **15**, 23–32 (2011)
- [28] G. M. K. Bakht, H. Ahmadi, A Akram, M. Karimi, "Repair and Maintenance Cost Models for Mf285 Tractor:A Case Study in Central Region of Iran," *Adv. Biol. Res. (Rennes)*, **3**(1–2), 76–80 (2009)
- [29] J. Rodríguez-Matienzo, "Diagnosis of IC Engines using vibrations," *Ing. Mecánica*, **21**(2), 82–92 (2018)
- [30] Arnone, L., Boni, M., Manelli, S., Chiavola, "Monitoreo de la combustión del motor diésel a través del análisis de señal de vibración de bloque," *SAE World Congr. Exhib.*, **9** (2019)
- [31] L. Arnone, M. Boni, S. Manelli, O. Chiavola, S. Conforto, E. Recco, "Diesel engine combustion monitoring through block vibration signal analysis," (2009) doi: 10.4271/2009-01-0765

- [32] S. Lee, Y. Lee, S. Lee, H.H. Song, K. Min, H. Choi, “Study on the Correlation between the Heat Release Rate and Vibrations from a Diesel Engine Block,” *SAE Tech. Pap.*, April (2015), doi: 10.4271/2015-01-1673.
- [33] I. Jung, J. Jin, K. Won, S. Yang, K. Min, H. Choi, “Closed-loop control for diesel combustion noise using engine vibration signals,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-June (2015), doi: 10.4271/2015-01-2297.
- [34] W. Yang, C. Yong, “Vibration Measurement for Combustion Phase Evaluation in a CI Engine,” *IFAC-PapersOnLine*, **51**(31), 821–826 (2018), doi: 10.1016/j.ifacol.2018.10.122.

PREDICTIVE MAINTENANCE IN AGRICULTURAL TRACTORS

Abstract – Predictive maintenance techniques, and in particular those based on condition monitoring are gaining great interest within maintenance management for their interaction with the pillars of the Industry 4.0 paradigm that are being integrated into the industry. Predicting failures before they occur is one of the most important advantages of this technique that allows you to avoid unexpected stops and reduces maintenance and operation costs. The objective of this study is to present the techniques associated with the implementation of predictive maintenance in agricultural tractors and the advantages that these could generate. To this end, this paper details, in addition to the common breakdowns of the engines of agricultural vehicles and the most frequent failure elements, the methodology to implement a predictive maintenance system in the critical elements of an agricultural vehicle.

Keywords – Agricultural Vehicle, Predictive Maintenance, Tractor Breakdowns, Industry 4.0, Condition-Based Monitoring.