



Recepción: 16 / 03 / 2019

Aceptación: 21 / 04 / 2019

Publicación: 05 / 05 / 2019



Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

Evaluación y validación de un sensor para conteo y clasificación de partículas contaminantes en aceites lubricantes: Caso Universidad Politécnica de Valencia

Evaluation and validation of a sensor for counting and classification of polluting particles in lubricating oils: Case Universidad Politécnica de Valencia

Avaliação e validação de um sensor para contagem e classificação de partículas poluentes em óleos lubrificantes: Case Universidad Politécnica de Valencia

Alex Alberto González-Hernández^I
alex19@hotmail.com

Tania Karina Berrezueta-Espín^{II}
taniakarinate@hotmail.com

Correspondencia: alex19@hotmail.com

- ^I. Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento, Ingeniero Mecánico Automotriz, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- ^{II}. Ingeniera de Mantenimiento; Magister en Gestión de Operaciones; Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador.

Resumen

El estudio se basó en determinar el grado de limpieza de un fluido, por medio de un innovador dispositivo on-line de tipo óptico utilizado en la ingeniería mecánica y automotriz para el conteo y clasificación de partículas contaminantes en aceites lubricantes, este dispositivo cumple con la norma de limpieza ISO 4406 determinando códigos que involucran el tamaño (<4, <6, <14) μm y cantidad de partículas contaminantes por ml. en la muestra analizada. El ensayo estaba sólo recomendado para “sistemas hidráulicos u otros sistemas limpios como turbinas”, ya que los niveles de desgaste eran bajos, el sensor on-line demostró ser una herramienta de diagnóstico eficiente en donde el código ISO 4406 mostrará un valor alto en sus componentes numéricos si el contenido de partículas es elevado y será muy bajo si el fluido está limpio, para garantizar estos resultados se ha calibrado el equipo basándose en la norma ISO 11171 que recomienda un fluido de calibración con requerimientos SRM 2806 (Standard Reference Material) certificado por NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología). Se concluye que, monitorizar el tamaño y cantidad de partículas contaminantes en aceites lubricantes de un sistema, permite la detección de estados iniciales de fallos.

Palabras claves: Monitorización; conteo; partículas; clasificación; lubricación.

Abstract

The study was based in determining the degree of cleanliness of a fluid, through an innovative on-line device of optical type used in mechanical and automotive engineering for the counting and classification of polluting particles in lubricating oils, this device complies with the ISO 4406 cleaning standard determining codes that involve size (<4, <6, <14) μm and amount of contaminating particles per ml. in the sample analyzed. The test was only recommended for "hydraulic systems or other clean systems such as turbines, since wear levels were low, the on-line sensor proved showed to be an efficient diagnostic tool where the ISO 4406 code will show a high value in its numerical components if the content of particles is high and will be very low if the fluid is clean, to ensure these results the equipment has been calibrated based on the ISO 11171 standard that recommends a calibration fluid with requirements SRM 2806 (Standard Reference Material) certified by NIST (National Institute of Standards and Technology). It is concluded that monitoring the size and quantity of contaminating particles in lubricating oils of a system allows the detection of initial failure states.

Keys words: Monitoring; counting; particles; classification; lubrication.

Resumo

O estudo foi baseado na determinação do grau de limpeza de um fluido, por meio de um dispositivo on-line inovador do tipo óptico usado em engenharia mecânica e automotiva para a contagem e classificação de partículas contaminantes em óleos lubrificantes, este dispositivo está em conformidade com o Norma de limpeza ISO 4406 que determina códigos que envolvem tamanho (<4, <6, <14) um e número de partículas contaminantes por ml. na amostra analisada. O teste foi recomendado apenas para "sistemas hidráulicos ou outros sistemas limpos, como turbinas", já que os níveis de desgaste eram baixos, o sensor on-line provou ser uma ferramenta de diagnóstico eficiente onde o código ISO 4406 mostrará um valor alto em seu componentes numéricos se o conteúdo das partículas for alto e será muito baixo se o fluido estiver limpo, para garantir esses resultados o equipamento foi calibrado com base na norma ISO 11171 que recomenda um fluido de calibração com os requisitos SRM 2806 (Standard Reference Material) certificado pelo NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia). Conclui-se que monitorar o tamanho e a quantidade de partículas contaminantes em óleos lubrificantes de um sistema permite a detecção de estados iniciais de falha.

Palavras chaves: Monitoramento, Contagem, Partículas, Classificação, Lubrificação.

Introducción

El mantenimiento de las máquinas y/o equipos en una empresa representa un coste significativo de inversión, por lo que la implantación de un mantenimiento integral se está convirtiendo en un reto muy importante para fortalecer el mantenimiento predictivo. La monitorización por condición nos ayuda a estudiar el comportamiento de un elemento o sistema y así prever daños de mayor magnitud e incluso aprovechar al máximo la vida útil de los componentes en observación. Para la selección del innovador sensor de conteo y clasificación de partículas contaminantes se ha tomado en cuenta las prestaciones y coste de implantación del mismo para su montaje en un laboratorio de Lubricantes y Combustibles del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, con el fin de verificar el grado de limpieza del fluido analizado, según la norma ISO 4406 (International Organization for Standardization).

El proyecto ha contado con la garantía del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, que aportó con la supervisión e instalaciones requeridas para el óptimo emprendimiento del trabajo de investigación.

Conceptualización:

Partículas que se producen en el desgaste de elementos mecánicos

El análisis del desgaste es complejo debido a la intervención de factores en los materiales como la dureza, tenacidad, estructura, composición química, tipos de carga, velocidad, tipo de superficie y más. Se podría decir que el desgaste no ocasiona fallos catastróficos, pero sí consecuencias en la eficiencia de operación del sistema (Miró, G., Tormos, B., Allmaier, H., Sander, D. E., & Knauder, C. (2017). Current trends in ICE wear detection technologies: from lab to field. *ASRO Journal of Applied Mechanics*, 2(1), 32-41)

Estudio del conteo y clasificación de partículas

La contaminación es la causa número uno de fallo de cualquier elemento mecánico lubricado. Un control efectivo del desgaste se consigue controlando los contaminantes presentes en el lubricante. El conteo de partículas consiste en la medida de la contaminación sólida en el lubricante, en donde cuenta el número de partículas y clasificación del grado de contaminación en función del tamaño o concentración de partículas. Conocer el grado de limpieza de un fluido es fundamental a la hora de realizar un control de la contaminación presente en el sistema. Existen diversas normas internacionales utilizadas para clasificar un fluido en función de la cantidad de contaminantes sólidos presentes en el.

La normativa empleada en el presente trabajo de investigación para la obtención del código de limpieza de un aceite lubricante por conteo y clasificación de partículas es ISO 4406, que es una norma para medir e informar sobre los niveles de contaminación en un fluido y usa una tabla numérica como se muestra en la Tabla 1 que posee rangos establecidos para la clasificación de la muestra analizada, dependiendo de la cantidad de partículas por ml y del tamaño predeterminado, obteniendo así un código compuesto por tres valores que indican partículas superiores a 4 μm , superiores a 6 μm y superiores a 14 μm , que dan la calificación R4 / R6 / R14. Como se muestra en la siguiente tabla (Bilbao Manuel, Málaga Adolfo, 2012, Contaje de partículas, Lubrication management, España.).

Tabla 1
Escala de contaminación ISO 4406

Número de partículas por ml			
Desde	Hasta	Rango	de
2500000		>28	
1300000	2500000	28	
640000	1300000	27	
320000	640000	26	
160000	320000	25	
80000	160000	24	
40000	80000	23	
20000	40000	22	
10000	20000	21	
5000	10000	20	
2500	5000	19	
1300	2500	18	
640	1300	17	
320	640	16	
160	320	15	
80	160	14	
40	80	13	
20	40	12	
10	20	11	
5	10	10	
2.5	5	9	
1.3	2.5	8	
0.64	1.3	7	
0.32	0.64	6	

Fuente: (Bilbao M., 2012)

Metodología

Calibración de contadores automáticos de partículas para líquidos.

Los contadores de partículas determinan la concentración y distribución del tamaño de las partículas por lo que garantizar el correcto resultado de los análisis es muy importante y se lo consigue por medio de la calibración.

Actualmente el patrón de calibración se basa en el estándar Internacional ISO 11171, según NIST SRM 2806, esta norma internacional establece un procedimiento de calibración estándar recomendado para determinar el tamaño de partícula y la precisión del conteo. Se compone de un polvo de prueba ISO (ISO 12103-A3), en aceite hidráulico que sirve como elemento para la calibración de contadores automáticos de partículas (González Alex, 2017, *Puesta en marcha y Validación experimental de un sensor para conteo y clasificación de partículas contaminantes en aceites lubricantes*, Tesis de Máster en Ingeniería del Mantenimiento, España).

Fluido de calibración.

Para la calibración del contador automático de partículas se ha seleccionado el fluido hidráulico certificado Mil-H 5606, el cual antes de añadir el polvo test, se filtra para asegurar un alto grado de limpieza. Este aceite puede ser solamente usado si no contiene más de 200 partículas por mililitro, mayores de 4 μm (c). Este aceite limpio es mezclado con el polvo test ISO MTD, rellenando botellas previamente lavadas. Según la ISO 11171, la distribución del tamaño de las partículas de la suspensión producida es finalmente determinada por el contador automático de partículas.

Antes del test, las botellas de suspensión son tratadas en un baño de ultrasonidos para dispersar uniformemente las partículas en el líquido. La distribución exacta de los tamaños de las partículas de calibración producidas, es mostrada en el certificado de cada producto.

El fluido de calibración seleccionado tiene un código de limpieza 16/15/11 que hace referencia a un aceite muy limpio, tomando como referencia el código de calibrado certificado conforme a ISO 11171, trazable a NIST 16/14/12, se puede usar para la calibración de nuestro equipo ya que se apega a las especificaciones del calibrado certificado.

Preparación estandarizada de la muestra.

Antes de cualquier análisis de recuento de partículas, la muestra debe de ser adecuadamente preparada para su medición. En el caso de medidas en línea, la preparación de la muestra no es del todo necesaria, dado que el líquido entra directamente en su estado original.

Las medidas en laboratorio, sin embargo, requieren de una precisa preparación de la muestra, puesto que ésta es recogida y almacenada en botellas después de su extracción. Dado que, durante su estancia en el laboratorio, la homogeneidad del líquido a analizar puede ser modificada. Durante una operación normal, la distribución de las partículas es homogénea, ya que dichas partículas están equilibradas por el movimiento del líquido en el sistema. Mientras el líquido permanece así, las partículas debido a la gravedad caen al fondo, en muestras en reposo. Como consecuencia de esto, reducido o perdido el movimiento y la falta de energía influyen en la distribución de las partículas y originan una sedimentación y aglomeración.

Por lo tanto, sin preparación de la muestra, el resultado de la medida podrá estar modificado o falseado. Antes de poder analizar una muestra en el laboratorio, es necesario re dispersar las partículas en el líquido. Por consiguiente, será necesario aplicar una energía al líquido y a las partículas en orden de homogeneizar la distribución de dichas partículas para asegurar unas condiciones de análisis iguales a las reales. Existen diferentes métodos estandarizados para la preparación de las muestras, en este caso se usará la siguiente:

- **ISO 11500 para hidráulicos o aceites de lubricación** (p.e. aceites de motor): Durante la preparación de la muestra, los aglomerados son reconvertidos en partículas y la distribución de las partículas es homogeneizada en tres pasos consecutivos:

- **Primero**, la botella de muestra es agitada vigorosamente a mano, luego agitado ultrasónicamente al menos durante 30 segundos y después agitado con un agitador mecánico durante al menos un minuto.

- **Segundo**, la botella con el material de referencia estándar, debe mantenerse en posición vertical y nunca debe calentarse por encima de 80 ° C y la botella debe abrirse y muestrearse en un entorno libre de polvo para evitar la contaminación.

Precaución: Si la suspensión no se utiliza inmediatamente después de agitar y evacuar, partículas grandes se depositarán en el fondo de la botella y se omitirán de la población de partículas medida.

(The Pamas Journal, 2013, *Preparación estandarizada de muestra*, Alemania)

Muestreo.

Hay que tener mucho cuidado a la hora de analizar sistemas muy limpios, ya que se puede introducir suciedad en la muestra tanto en la etapa de muestreo de la misma como en la de análisis. Para ello se debe utilizar botes con un alto grado de limpieza. Además, en el laboratorio de análisis se debe poseer un procedimiento de manejo de las muestras que eviten todas las fuentes posibles de entrada de suciedad en el fluido tabla (Bilbao Manuel, Málaga Adolfo, 2012, *Contaje de partículas*, Lubrication management, España.).

Interpretación de análisis.

Se debe tener claro que los sistemas que trabajan con un fluido de elevado grado de contaminación, acortan su vida útil y pueden generar fallos de mayor magnitud, por lo que controlar el nivel de limpieza de un fluido garantiza un óptimo funcionamiento. Al analizar un fluido el código ISO 4406 mostrará un valor alto en sus componentes numéricos si el contenido de partículas es elevado y será muy bajo si el aceite está limpio (The Pamas Journal, 2011, *Calibración de contadores de partículas automáticos según la ISO 11171*, Alemania).

Proveedores de rodamientos, turbinas y sistemas hidráulicos están cada vez más interesados en especificar un nivel de limpieza de aceites nuevos y aceites en uso. Esto implica, muchas veces, establecer procesos de limpieza de aceites nuevos, antes de incorporarlos a los sistemas, para cumplir con aquellas especificaciones. Como consecuencia se han desarrollado procesos de filtración de aceites en uso para mantener los niveles de limpieza adecuados. En todo caso, cualquier variación del Código ISO 4406 se debe investigar, porque puede representar una anomalía. Otro aspecto menos común y de menor desarrollo aún, es la interpretación y seguimiento de los valores obtenidos para cada rango de tamaños de partículas, permitiendo investigar anomalías o causas raíz de fallos en los sistemas lubricados, que se pueden corregir de forma prematura, incluso antes de que se inicie el fallo.

Coste de implementación.

Inicialmente se deben considerar los activos fijos y costes variables que se ha invertido para la implementación del equipo en las instalaciones del laboratorio de Lubricantes y Combustibles del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, como se muestra en la tabla 2, 3 y 4:

Tabla 2
Activos fijos

ACTIVOS FIJOS	Precio
Mano de obra mes / 3 meses	1 245 €
Sensor Oil Wear 2.0 – 100 System. Incluye comunicación USB + Licencia	7 125 €
Bomba de engranajes	690 €
Fuente alimentación	135 €
Estructura metálica (Caja)	80 €
TOTAL	9 275 €

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Tabla 3
Costes variables

COSTES VARIABLES	Precio
Aceite Repsol 5w40, 5L (Usado para la referencia a cero del sistema “Encerado”)	25 €
Éter de petróleo, 2,5 L x 5 unidades	247,55 €
Material de calibración	263 €
Partículas de hierro < 10 um, 250 g	67 €
Filtro, Cañerías ¼ Y accesorios varios	470 €
TOTAL	1 072.55 €

Fuente: Investigación de campo
Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Tabla 4
Resumen de inversión inicial

RESUMEN DE INVERSIÓN INICIAL	
Descripción	Valor
ACTIVOS FIJOS	9 275.00 €
COSTES VARIABLES	1 072.55€
TOTAL, INVERSIÓN INICIAL	10 347.55 €

Fuente: Investigación de campo
Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Puesta en marcha del sensor de conteo y clasificación de partículas.

Para la puesta en marcha del trabajo investigativo se debe considerar el estudio de la iniciación del software que trae el dispositivo y los elementos que complementan el equipo, como bomba de engranajes, circuito eléctrico, cañerías, etc. Además, se ha realizado el diseño de una estructura para el montaje mecánico/eléctrico del dispositivo, un manual de operación y mantenimiento del equipo y una hoja de troubleshooting. El sensor elegido es el Oil Wear S100 que cuenta con las características y especificaciones técnicas mostradas en la tabla 2 y el esquema de funcionamiento del equipo en la figura 1:

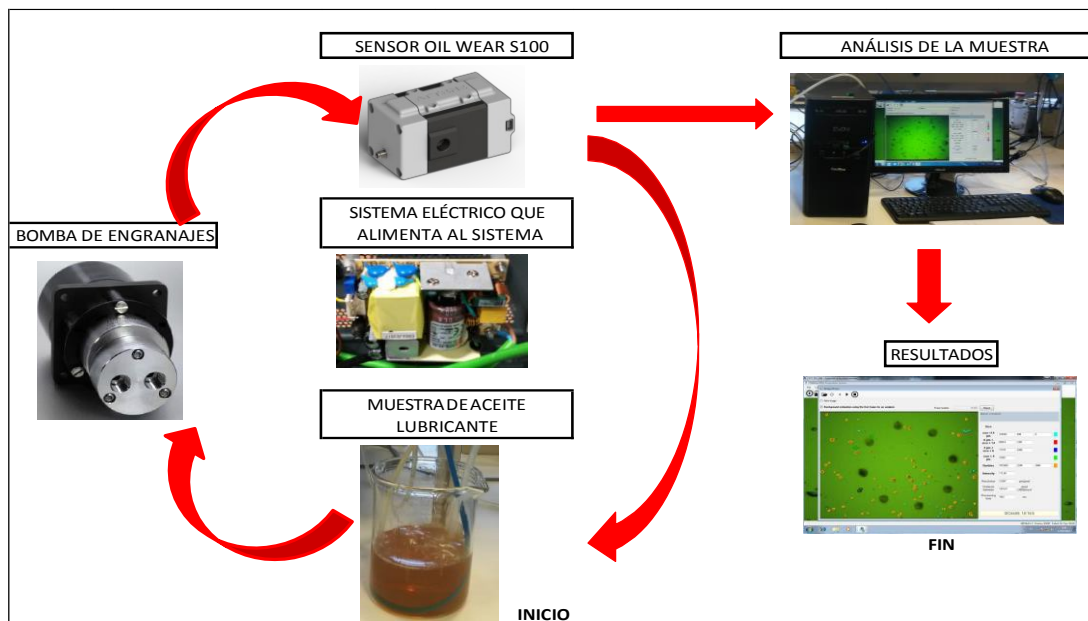
Tabla 5
Características y especificaciones del Sensor Oil Wear S100

	Clasificación de las partículas: ISO 4406, NAS 1638, SAE AS4059, etc.
	Clasificación de las partículas por su forma y tamaño:
Medida	Fatiga Deslizamiento Corte
Calibración	ISO 11171
Precisión	±1 ISO
Variables adicionales	Sensor de temperatura Detección de burbujas de aire
Posición de montaje	Vertical
Alimentación	24 V
Consumo	<1 ^a
Salidas analógicas	0-10 V (4–20 mA) [Bajo pedido]
Salidas Digitales	RS485 (ModBUS RTU) Ethernet RJ45 (ModBUS TCP/IP, FTP, Telnet)

Presión operación	20 bar máximo
Temperatura operación	Desde 0°C hasta 70°C
Viscosidad	< 460 cSt
Flujo operación	Auto regulado
Tamaño / Peso	250 x175 x 115mm / 3.000 gr
Acoplamiento	1/8" BSP
Materiales	Acero inoxidable
Memoria	Últimas 500 medidas (parámetros e imágenes)
Protección	IP65

Fuente: (Preditec, Grupo Alava, 2017)

Figura 1 Esquema de funcionamiento del equipo



Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Resultados y Discusión.

Para la medición y obtención de los resultados se deben establecer los siguientes parámetros:

- Tiempo de análisis,
- Régimen de giro,
- Caudal constante
- Cantidad de contaminación en el fluido
- Cantidad de muestra de fluido
- Viscosidad del fluido
- Lugar de toma de muestra.

Fluidos utilizados para las pruebas experimentales

Se debe considerar las características y propiedades técnicas de los elementos que complementan el equipo como de los aceites lubricantes utilizados en la validación experimental, debido a que la operación y pruebas experimentales pueden verse afectados por la alta viscosidad, en este caso se trabajó con los siguientes fluidos:

Tabla 6
Fluidos utilizados

Fluidos Utilizados	
1	Líquido de limpieza Éter de petróleo
2	Aceite lubricante Galactic Maxima E6 Saps
3	Repsol elite evolution fuel economy 5w30
4	Repsol diésel turbo uhp 10w40

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Para la presentación de resultados el software del dispositivo presentará un formato por defecto llamado el “Informe de resultados” como se muestra en la figura 2 y Figura 3, en donde muestra una serie de información detallada referente al ensayo como, representación gráfica del análisis, contenido

de partículas, contenido de burbujas, obtención del código ISO 4406, tiempo del proceso de análisis y una recolección de imágenes aleatorias recogidas por el sensor durante el ensayo. Se debe recalcar que es fundamental la limpieza del sistema del equipo antes de realizar las pruebas experimentales con el fin de eliminar los residuos contaminantes de pruebas anteriores o del polvo, en este caso para la limpieza se ha utilizado éter de petróleo y por ningún motivo utilizar agua como agente de limpieza, ya que por la inmiscibilidad de los mismos puede crear burbujas y residuos pastosos que pueden entorpecer los resultados.

Figura 2. Formato del informe de resultados

Mask created.

Nº de partículas/burbujas acumuladas en todas las imágenes procesadas.

Nº de partículas/burbujas por ml.

Nº de partículas/burbujas por ml. corregido.

Size				
size > 14 μm	13	0	0	Partículas grandes $\varnothing > 14 \mu\text{m}$
6 $\mu\text{m} <$ size < 14	1	0		Partículas medianas \varnothing entre 6-14 μm
4 $\mu\text{m} <$ size < 6	0	0		Partículas pequeñas \varnothing entre 4-6 μm
size < 4 μm	0			Partículas muy pequeñas $\varnothing < 4 \mu\text{m}$
Burbles	7	0	0	Burbujas

Intensity: 143.03

Resolution: 2.1335 $\mu\text{m}/\text{pixel}$

Distance between: 1406.14 pixel (3000/resol)

Processing time: 86 ms

Intensidad (valor medio de gris) de la última imagen.

Valor calculado. Siendo la distancia entre los centros de los fiduciales 3mm y habiendo medido la misma distancia en la imagen en pixeles. Resolución = 3000/distancia entre fiduciales

Distancia entre centros de los fiduciales en pixel-s

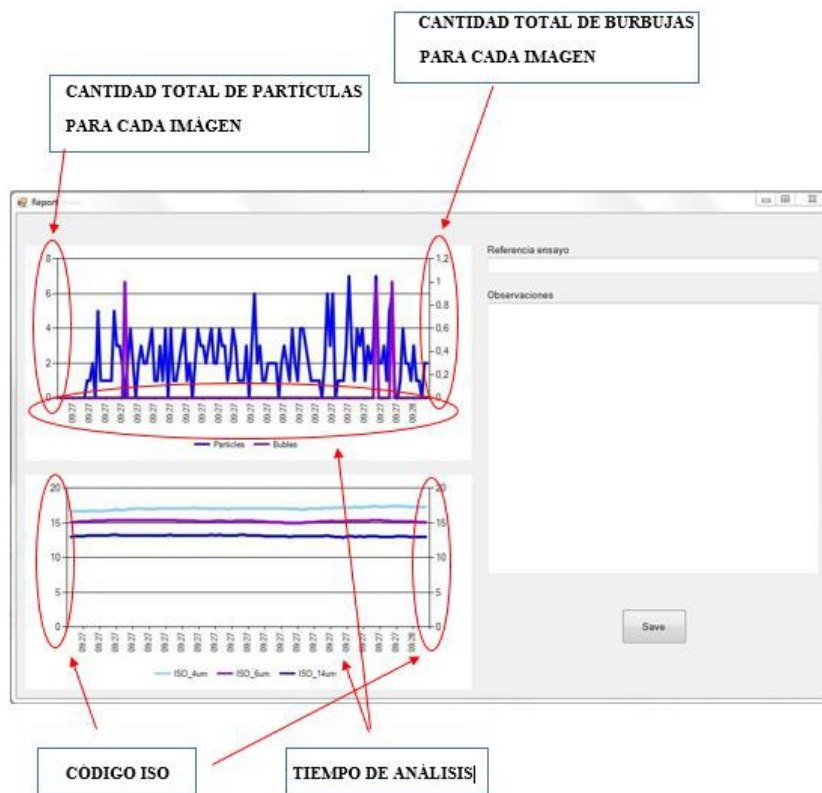
Tiempo de procesamiento de la última imagen.

ISO4406: 6/6/6

Resultado del grado de limpieza del aceite en base a la norma ISO 4406:1999

Fuente: (Preditec, Grupo Alava, 2017)

Figura 3. Formato gráfico del informe de resultados



Fuente: (Preditec, Grupo Alava, 2017)

Pruebas experimentales.

Para la determinación del grado de limpieza, las pruebas experimentales se basan en la simulación de situaciones reales del comportamiento de las partículas en un sistema,

Se ha separado a los tipos de pruebas en tres fases. En la “FASE I” se ha utilizado el aceite lubricante “Galactic Maxima E6 Saps” en donde se realizó el análisis del éter de petróleo utilizado como agente de limpieza, el aceite lubricante limpio para obtener una referencia de partida, también se ha almacenado una muestra de aceite lubricante durante tres meses sin cubrir dentro de las instalaciones del laboratorio, luego se ha generado burbujas durante el análisis para determinar si influye en la obtención del código ISO 4406 y finalmente se ha contaminado el aceite lubricante gradualmente con partículas de hierro < 10 um para comparar los resultados del conteo, clasificación, obtención del código ISO 4406, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Resultados de la fase I.

TIPOS DE PRUEBAS - FASE I.				
TIPO DE ACEITE	AGENTE CONTAMINANTE	Nº PRUEBAS	DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS	CÓDIGO ISO 4406
GALACTIC MAXIMA E6 5W30 SAPS	PARTÍCULAS DE HIERRO < 10 µm	1	LÍQUIDO DE LIMPIEZA (ÉTER DE PETRÓLEO)	16/14/10
		2	REFERENCIA - ACEITE LIMPIO	16/13/11
		3	REFERENCIA - ACEITE ALMACENADO (3 MESES)	16/15/12
		4	GENERACIÓN DE BURBUJAS	20/19/16
		5	CONTAMINACIÓN CON 0,1 GRAMOS	21/19/14
		6	CONTAMINACIÓN CON 0,2 GRAMOS	25/23/18
		7	CONTAMINACIÓN CON 0,3 GRAMOS	26/24/18
		8	CONTAMINACIÓN CON 0,5 GRAMOS	27/25/19
		9	CONTAMINACIÓN CON 1 GRAMOS	28/26/21

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Luego en la Figura 5 se ha realizado la clasificación de los códigos ISO 4406 obtenidos en las pruebas experimentales dependiendo del grado de contaminación. Los parámetros considerados para la nomenclatura son, “muy limpio”, “limpio”, “sucio” y muy sucio” respectivamente. Se considera un valor referente para considerar a un fluido “limpio” dado por el código de limpieza ISO 4406, 18/16/14.

Figura 5 Clasificación de las pruebas por su grado de contaminación

CLASIFICACION DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES POR SU GRADO DE CONTAMINACION				
DESCRIPCIÓN	MUY LIMPIO	LIMPIO	SUCIO	MUY SUCIO
		CÓDIGO DE LIMPIEZA ISO 4406, CONSIDERADO COMO UN FLUIDO LIMPIO		
FLUIDO LIMPIO		18/16/14		
LÍQUIDO DE LIMPIEZA (ÉTER DE PETRÓLEO)	16/14/10			
REFERENCIA - ACEITE LIMPIO	16/13/11			
REFERENCIA - ACEITE ALMACENADO	16/15/12			
GENERACIÓN DE BURBUJAS			20/19/16	
CONTAMINACIÓN CON 0.1 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <10 µm			21/19/14	
CONTAMINACIÓN CON 0.2 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <10 µm				25/23/18
CONTAMINACIÓN CON 0.3 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <10 µm				26/24/18
CONTAMINACIÓN CON 0.5 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <10 µm				27/25/19
CONTAMINACIÓN CON 1 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <10 µm				28/26/21

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

En la “FASE II” se ha utilizado el aceite lubricante Repsol elite evolution fuel economy 5w30, por lo que se ha realizado el análisis del aceite lubricante limpio para obtener el código ISO 4406 de referencia, luego se ha realizado la contaminación gradual de la muestra con una cantidad de 0.1 gramos hasta 1 gramo, utilizando el tamaño de partículas < 44 µm. Posteriormente se ha realizado una prueba de una hora de duración con la cantidad de 1 gramo de agente contaminante, para analizar el comportamiento de las partículas en ese periodo de tiempo, otro tipo de prueba fue el dejar en reposo la muestra contaminada con 1 gramo de partículas de hierro durante un día para conseguir que las partículas se asienten en el fondo del bote y finalmente se realizó una agitación manual de 2 minutos previo al análisis para mezclar la muestra y así comparar las cantidades de partículas y obtención de los códigos ISO 4406 entre ambas pruebas, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Figura 6.

Figura 6. Pruebas realizadas en la FASE II. Con partículas de hierro < 44 um,

TIPO DE ACEITE	AGENTE CONTAMINANTE	Nº PRUEBAS	DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS	CÓDIGO ISO 4406		
REPSOL ELITE EVOLUTIO N FUEL ECONOMY 5W30	PARTÍCULAS DE HIERRO < 44 um	1	REFERENCIA DE LA MUESTRA	16/14/10		
		2	CONTAMINACIÓN CON 0,1 GRAMOS	24/22/19		
		3	CONTAMINACIÓN CON 0,2 GRAMOS	25/23/20		
		4	CONTAMINACIÓN CON 0,5 GRAMOS	25/24/22		
		5	CONTAMINACIÓN CON 1 GRAMOS	26/25/22		
		6	COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN 1 HORA DE ANÁLISIS			INICIO: 26/25/23
			Nº DE PRUEBAS	TIEMPOS DE DATOS (Min)	FRAME	
			1	Respuesta: 3:20	79	
			2	13:40	229	
			3	25:20	407	
			4	40:20	648	
		5	1h14	1228	FINAL: 26/25/22	
		7	ANÁLISIS DE LA MUESTRA UN DÍA DESPUÉS			23/22/18
			REPOSO (PARTÍCULAS ASENTADAS)			
			Nº DE PRUEBAS	TIEMPOS DE DATOS (Min)	FRAME	
			1	RESPUESTA: 1:42	52	
			2	5	131	
			3	8	205	
		8	MUESTRA MEZCLADA (AGITACIÓN MANUAL DE 2 MIN)			26/25/22
			Nº DE PRUEBAS	TIEMPOS DE DATOS (Min)	FRAME	
			1	RESPUESTA: 6:43	52	
			2	8	59	
			3	10	70	
		4	15	101		

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

También se realizará una tabla de clasificación de los diferentes tipos de contaminación en la Fase II con partículas <44 um. Ubicando los códigos ISO 4406 en la tabla considerando el estado del fluido en cada prueba experimental, mostrada en la Figura 7.

Figura 7. Pruebas experimentales por su grado de contaminación. Fase II

CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES POR SU GRADO DE CONTAMINACIÓN				
DESCRIPCIÓN	MUY LIMPIO	LIMPIO	SUCIO	MUY SUCIO
		CÓDIGO DE LIMPIEZA ISO 4406, CONSIDERADO COMO UN FLUIDO LIMPIO		
FLUIDO LIMPIO		18/16/14		
REFERENCIA - ACEITE LIMPIO	16/14/10			
CONTAMINACIÓN CON 0.1 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE <44 µm				24/22/19
CONTAMINACIÓN CON 0.2 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE < 44µm				25/23/20
CONTAMINACIÓN CON 0.5 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE < 44µm				25/24/22
CONTAMINACIÓN CON 1 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE FE < 44 µm				26/25/22
COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN UNA HORA DE ANÁLISIS	INICIO			27/26/21
	FIN			27/26/20
PARTÍCULAS ASENTADAS EN EL FONDO DEL BOTE			23/22/18	
AGITACIÓN MANUAL DE 2 MINUTOS PREVIO AL ANÁLISIS DEL BOTE CON LAS PARTÍCULAS ASENTADAS.				26/25/22

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Mientras que en la “FASE III” se ha utilizado una muestra real en donde se obtuvo el código de limpieza ISO 4406 del aceite lubricante, luego se procedió a contaminar la misma muestra con una cantidad de 0.2 gramos de partículas de hierro < 10 µm durante el proceso de análisis para verificar si el equipo es capaz de percibir el aumento de agente contaminante mientras está funcionando. Finalmente se realizó el estudio del comportamiento de las partículas de la muestra real durante una hora de análisis. A continuación, se muestran los tipos de pruebas experimentales propuestos, en la Figura 8. (González Alex, 2017, *Puesta en marcha y Validación experimental de un sensor para conteo y clasificación de partículas contaminantes en aceites lubricantes*, Tesis de Máster en Ingeniería del Mantenimiento, España).

Figura 8. Clasificación de las pruebas experimentales por su grado de contaminación. Fase III

Clasificación de las pruebas experimentales por su grado de contaminación				
DESCRIPCIÓN	MUY LIMPIO	LIMPIO	SUCIO	MUY SUCIO
		CÓDIGO DE LIMPIEZA ISO 4406, CONSIDERADO COMO UN FLUIDO LIMPIO		
FLUIDO LIMPIO		18/16/14		
REFERENCIA -ACEITE LIMPIO		19/16/11		
MUESTRA REAL ACEITE LUBRICANTE UHPD 10W40			22/20/16	
MUESTRA REAL ACEITE LUBRICANTE UHPD 10W40, CON UN AUMENTO DE 0.2 GRAMOS DE PARTÍCULAS DE HIERRO <10µm DURANTE EL ANÁLISIS	SIN AUMENTO			24/22/15
	CON AUMENTO			26/24/18
COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN UNA HORA DE ANÁLISIS	INICIO			27/25/19
	FIN			27/25/19

Fuente: Investigación de campo

Elaborado: Autores de trabajo. 2017

Conclusiones

Se puede concluir que:

El sensor on-line demostró ser una herramienta innovadora eficiente y eficaz para la detección de agentes contaminantes en los fluidos, ya que ha sido sometido a diferentes tipos de pruebas experimentales con diferentes cantidades de contaminación y volúmenes de muestra, dando a conocer el grado de limpieza del aceite lubricante.

Se ha establecido un código de limpieza ISO 4406 de referencia (16/14/10) con el líquido disolvente “Éter de petróleo” para considerar limpio el sistema y un código ISO 4406 de referencia (16/14/10) con un aceite para motor “Repsol elite evolution fuel economy 5w30” para considerar “Encerado” el sistema y proceder a la realización de las pruebas siguientes, garantizando la correcta obtención de datos de conteo y clasificación de partículas. Además, se podrá economizar la compra del fluido de calibración que incluso requiere de una preparación estandarizada.

Se ha podido determinar que el sensor on-line es capaz de cuantificar las partículas de una muestra real de aceite lubricante para motor considerado como “sucio” e incluso puede percibir si existe una adición de partículas contaminantes durante el proceso de análisis ya que modifica el código de

limpieza ISO 4406 mientras es analizado, reflejando esta adición en el reporte gráfico proporcionado por el software donde es evidente la variación de la línea correspondiente a las partículas.

Referencias Bibliográficas

Miró, G., Tormos, B., Allmaier, H., Sander, D. E., & Knauder, C. (2017). Current trends in ICE wear detection technologies: from lab to field. *ASRO Journal of Applied Mechanics*, 2(1), 32-41

Bilbao Manuel, Málaga Adolfo, 2012, *Contaje de partículas*, Lubrication management, España.

González Alex, 2017, *Puesta en marcha y Validación experimental de un sensor para contaje y clasificación de partículas contaminantes en aceites lubricantes*, Tesis de Máster en Ingeniería del Mantenimiento, España.

The Pamas Journal, 2013, *Preparación estandarizada de muestra*, Alemania.

The Pamas Journal, 2011, *Calibración de contadores de partículas automáticos según la ISO 11171*, Alemania.